



**GRUPOS FUNCIONALES FITOPLANCTONICOS Y
SU RELACIÓN CON VARIABLES AMBIENTALES
EN UNA CIÉNAGA COSTERA TROPICAL**

FARID JESÚS OSORIO ÁVILA

MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y BIODIVERSIDAD

FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA

2020



GRUPOS FUNCIONALES FITOPLANCTONICOS Y SU RELACIÓN CON VARIABLES AMBIENTALES EN UNA CIÉNAGA COSTERA TROPICAL

Presentado por

FARID JESÚS OSORIO ÁVILA

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de
Maestría en Ecología y Biodiversidad

Área

Biodiversidad y herramientas para medición y conservación

Director

JAVIER RODRIGUEZ BARRIOS, Dr.

Docente Universidad del Magdalena

Grupo GIEN

Maestría en Ecología y Biodiversidad

Facultad de Ciencias Básicas

Universidad del Magdalena

2020



Agradecimientos

A la Universidad del Magdalena, en especial a la vicerrectoría de investigación, por apoyar la realización del presente estudio, mediante la convocatoria FONCIENCIAS 2017 y al equipo de colaboradores de esta dependencia.

A los docentes de la maestría, por abrirme al mundo de la ecología y la biodiversidad.

A mis compañeros de maestría, fue un placer coincidir con ustedes, sus historias de vida, sus ganas de aprender y su pasión por la biología me han inspirado infinitamente.

A Elda Garrido, Héctor García, Javier Rodríguez gracias por su apoyo sin ustedes esto no hubiera sido posible.

A Juan Bautista, Samir y la gente de Sevillano gracias por enseñarnos esos lugares tan mágicos y por compartir el saber ancestral que se esconde en la Ciénaga Grande de Santa Marta.

A mi familia por ser mi apoyo día y noche y por animarme en los momentos más difíciles.

A todos los que creyeron en mi incluso cuando yo no creía, A Dios y la naturaleza gracias por la vida.



Tabla de Contenido

Resumen	10
Abstract	11
Introducción.....	12
Planteamiento del Problema	14
Justificación.....	16
Antecedentes	17
Marco Teórico	20
Hipótesis.....	24
Objetivos	25
Objetivo General	25
Objetivos específicos	25
Metodología.....	26
Área de estudio.....	26
Zonificación.....	26
Clima e Hidrografía	27
Análisis de muestras	29
Recolección de muestras.....	29
Conteo e identificación de organismos	29
Análisis de datos	31
Diversidad alfa fitoplanctónica	31
Diversidad beta fitoplanctónica	32
Grupos funcionales basados en morfología (GFBM).....	33
Relación entre Grupos Funcionales Basados en Morfología (GFBM) y Variables ambientales	34
Resultados	35



Variablen ambientales.....	35
Diversidad Alfa - Abundancia de especies.....	35
Diversidad del Fitoplancton entre estaciones y épocas climáticas.....	43
Diversidad Alfa – Abundancia de especies.....	43
Diversidad Beta entre épocas climáticas	53
Escalamiento Multidimensional No Métrico (nMDS)	53
Prueba de hipótesis	54
Dendrogramas de similitud entre estaciones y épocas climáticas	54
Grupos Funcionales Basados en Morfología (GFBM).....	55
Rasgos funcionales definitorios y distribución ambiental de los GFBM	55
Relación entre los GFBM y las variables ambientales	58
Discusión.....	60
Diversidad Alfa	60
Diversidad Beta.....	62
Grupos funcionales basados en morfología.....	62
Relación de las variables ambientales con los GFBM	65
Conclusiones.....	66
Referencias	67
ANEXOS	78



Lista de Tablas

Tabla 1. Características morfológicas de los grupos funcionales de fitoplancton, filiación taxonómica, volumen (V), superficie (S), relación superficie volumen (S/V), dimensión lineal máxima (DLM). Rasgos especializados como aerótopos (Aer), flagelos (Fla), mucílago (Muc), heterocitos (Het) y sílice (Si). Modificado de Kruk <i>et al.</i> (2010).	22
Tabla 2. Ubicación geográfica de las Estaciones de muestreo.	26
Tabla 3. Valoración de la diversidad alfa a partir de estimadores clásicos relacionados a la abundancia de taxones, en las dos épocas evaluadas (Seca y Lluviosa)	37
Tabla 4. Listado de las especies de fitoplancton registradas en la Ciénaga Sevillano, Magdalena.....	37
Tabla 5. Estimación de la diversidad alfa, con números de Hill $q=0$, $q=1$, $q=2$, para el análisis realizado por épocas climáticas.....	42
Tabla 6. Valoración de la diversidad alfa a partir de estimadores clásicos relacionados a la abundancia de taxones, en las dos épocas evaluadas (Seca y Lluviosa). S: época seca, L: época de lluvia. E1 a E6: seis localidades evaluadas por cada época.....	43
Tabla 7. Listado de las especies de fitoplancton registradas en la Ciénaga Sevillano, Magdalena. S: época seca, L: época de lluvia. E1 a E6: seis localidades evaluadas por cada época.....	44
Tabla 8. Estimación de la diversidad alfa, con números de Hill $q=0$, $q=1$, $q=2$, para el análisis realizado por (1) abundancias de individuos en época seca y (2) abundancias de individuos en época lluviosa.	47

Lista de Figuras

- Figura 1. Fotografía panorámica de la zona centro de la ciénaga Sevillano, detalle de la garza (*Egretta alba*), cuya pata no alcanza a sumergirse por completo indicando la baja profundidad del sector. 26
- Figura 2. Área de estudio con los principales tensores ambientales detectados para cada sector en la ciénaga Sevillano. Modificado de FUPARCIS (2017). 27
- Figura 3. Climograma con datos de la estación climatológica de Las Flores (Barranquilla-Atlántico). Pp.prom: promedio de precipitación mensual multianual, t.prom: temperatura promedio mensual multianual. 28
- Figura 4. Riqueza de especies fitoplanctónicas por clase taxonómica..... 36
- Figura 5. Perfil de completitud de las muestras, para las dos épocas evaluadas (Seca y Lluviosa). Las líneas representan los perfiles estimados de completitud y las bandas a los lados son los límites de confianza por encima y por debajo de las líneas..... 39
- Figura 6. Perfiles de diversidad asintótica, para las dos épocas evaluadas (Lluvia y Seca). Órdenes $q= 0, 1$ y 2 , corresponden a la riqueza, Shannon y Simpson, respectivamente. (a) Perfil observado/empírico, (b) perfil estimado. Las líneas relacionan los perfiles de diversidad estimada para los diferentes órdenes q y las bandas relacionan a los límites de confianza inferior y superior de cada época, proyectados por permutaciones de Monte Carlo..... 40
- Figura 7. Curvas de diversidad interpolada (líneas sólidas) y extrapoladas (líneas punteadas), para valorar la relación entre la abundancia requerida (eje x), para estimar una diversidad óptima (asíntota o estabilidad de las curvas extrapoladas), en las épocas evaluadas (Seca y Lluviosa). Las bandas alrededor de las curvas representan a los límites de confianza por encima y por debajo de las curvas de cada época. (a) Curvas de rarefacción para la riqueza de taxones ($q= 0$), para Shannon ($q= 1$) y para Simpson ($q= 2$). 41



Figura 8. Cobertura de las muestras tomadas en dos épocas (Seca y Lluviosa), para la riqueza de taxones (a) y para la diversidad de Shannon (b). Las bandas alrededor de las curvas de cobertura representan a los límites de confianza por encima y por debajo de estas..... 42

Figura 9. Perfil de completitud de las muestras, para las dos épocas evaluadas (S: Seca (a) y L: Lluviosa (b)) y las localidades evaluadas (E1 a E6). Las líneas representan los perfiles estimados de completitud y las bandas a los lados son los límites de confianza por encima y por debajo de las líneas. 49

Figura 10. Perfiles de diversidad asintótica, para las dos épocas evaluadas (S: Seca (a y b) y L: Lluviosa (c y d)) y las localidades evaluadas (E1 a E6). Órdenes $q= 0, 1, 2$, corresponden a la riqueza, Shannon y Simpson, respectivamente. (a y c) Perfiles de las muestras/estimados, (b y d) perfiles observados/empíricos. Las líneas relacionan los perfiles de diversidad estimada para los diferentes órdenes q y las bandas relacionan a los límites de confianza inferior y superior de cada época, proyectados por permutaciones de Monte Carlo..... 50

Figura 11. Curvas de diversidad interpolada (líneas sólidas) y extrapoladas (líneas punteadas), para valorar la relación entre la abundancia requerida (eje x), para estimar una diversidad óptima (asíntota o estabilidad de las curvas extrapoladas), en las épocas evaluadas (a) Seca y (b) Lluviosa. Las bandas alrededor de las curvas representan a los límites de confianza por encima y por debajo de las curvas de cada época..... 51

Figura 12. Cobertura de las muestras tomadas en dos épocas (S: Seca y L: Lluviosa) y en las diferentes estaciones de la ciénaga Sevillano (E1 a E6). Las bandas alrededor de las curvas de coberturas representan a los límites de confianza por encima y por debajo de estas. (a) época seca, (b) época lluviosa. 52

Figura 13. Ordenación de las estaciones (puntos azules), con relación a la composición y abundancia de los 81 taxones de fitoplancton. Dim 1 y Dim 2, corresponden a los ejes sintéticos del escalamiento. Las elipses corresponden al



comparativo de grupos representados por los errores estándar de los periodos seco (S) y Lluvioso (L), con límites de confianza del 95%. 53

Figura 14. Clasificación de las estaciones (E1 a E6), por cada periodo climático (S: Seco, L: Lluvioso), con relación a la abundancia de los 81 taxones de fitoplancton. La línea punteada representa a los tres grupos generados. 55

Figura 15. Mapa de calor con la caracterización de las estaciones (E1 a E6), por cada periodo climático (S: Seco, L: Lluvioso), con relación a los Grupos Funcionales de fitoplancton (III a VII). La intensidad del color rojo representa el peso o la importancia de cada grupo funcional para la caracterización de las estaciones. ... 57

Figura 16. Caracterización de las estaciones (E1 a E6), por cada periodo climático (S: Seco, L: Lluvioso), con relación a los grupos funcionales de fitoplancton. La línea punteada corresponde a un gradiente unimodal que se presenta en la relación presentada. 58

Figura 17. Caracterización de las estaciones (E1 a E6), por cada periodo climático (S: Seco, L: Lluvioso), con relación a las variables fisicoquímicas evaluadas (vectores) y a los grupos funcionales de fitoplancton (números romanos). La línea punteada corresponde a un gradiente unimodal que se presenta en la relación presentada. 59



Resumen

Se realizó una aproximación a la evaluación de la ciénaga Sevillano (CGSM), mediante la clasificación de grupos funcionales basados en morfología del fitoplancton. Se seleccionaron seis estaciones, bajo el criterio de los tensores ambientales presentes en el humedal. Los muestreos se realizaron en 2019 durante las épocas de lluvia y de sequía. Los organismos recolectados fueron identificados hasta el máximo nivel taxonómico posible y contados en un microscopio invertido mediante el uso de cámaras de sedimentación Utermöhl. Para cuantificar la diversidad de taxones del fitoplancton se utilizaron índices basados en los números de Hill “diversidad verdadera”, a su vez se aplicaron los índices tradicionalmente utilizados (Shannon, Simpson, entre otros). Los organismos identificados se clasificaron en los grupos funcionales correspondientes según sus características o rasgos especializados propuestos por Kruk *et al.* (2010). La riqueza de especies y la abundancia fueron mayores durante la época seca, sin embargo, no se encontró diferencias significativas entre los periodos evaluados. Se registraron cinco de los siete grupos funcionales más representativos; el grupo *grandes filamentos con aerótopos*, se relacionó positivamente con la conductividad y caracterizó la zona norte tanto en lluvia como en sequía; el grupo *colonias mucilaginosas con los lípidos y aerótopos*, se relacionó con los sólidos suspendidos totales y caracterizó la zona centro de la ciénaga durante la época seca. Los resultados obtenidos permitieron observar patrones funcionales de la comunidad fitoplanctónica y explicar su variabilidad como respuesta a las características ambientales del ecosistema.

Palabras clave: Humedal, Fitoplancton, Grupo funcional, Morfología, numero efectivo de especies.



Abstract

An approach was made to the evaluation of the Sevillano swamp (CGSM), by classifying functional groups based on phytoplankton morphology. Six stations were selected, under the criteria of the environmental stressors present in the wetland. The samplings were carried out in 2019 during the rainy and dry seasons. The collected organisms were identified to the highest possible taxonomic level and counted under an inverted microscope using Utermöhl sedimentation chambers. To quantify the diversity of phytoplankton taxa, indices based on the Hill numbers "true diversity" were used, in turn the traditionally used indices (Shannon, Simpson, among others) were applied. The identified organisms were classified into the corresponding functional groups according to their characteristics or specialized traits proposed by Kruk et al. (2010). Species richness and abundance were higher during the dry season, however, no significant differences were found between the evaluated periods. Five of the seven most representative functional groups were recorded; the group of large filaments with aerotopes was positively related to conductivity and characterized the northern zone both in rain and in drought; the group mucilaginous colonies with lipids and aerotopes, was related to the total suspended solids and characterized the central zone of the swamp during the dry season. The results obtained allowed us to observe functional patterns of the phytoplankton community and explain its variability in response to the environmental characteristics of the ecosystem.

Keywords: Wetland, Phytoplankton; Functional group, Morphology, effective number of species.



Introducción

En Colombia los humedales son reconocidos como ecosistemas estratégicos por su valor en diversas escalas tanto temporales como geográficas, por su integridad ecológica de la cual dependen la biodiversidad y los procesos ecológicos de diferentes elementos (Vilardy *et al.*, 2014). Su importancia también está vinculada con el acervo cultural de los colombianos, siendo la gestión y manejo de estos ecosistemas, aspectos intrínsecos para el desarrollo sostenible del país (Mosquera & Tapia, 2015).

Aunque hay conciencia general de su importancia, los humedales son en la actualidad objeto de amenaza por la fuerte presión que se ejerce por las diferentes actividades humanas en su entorno, la poca planificación y la ausencia de técnicas de manejo adecuadas, factores que atentan seriamente contra la existencia de éstos (Rangel & Arellano, 2010). En la ciénaga Sevillano se destacan las inadecuadas prácticas de disposición final de aguas residuales domésticas, lo que se evidencia en las lagunas de oxidación que se encuentran en la zona norte del área; adicionalmente, en los alrededores de la Ciénaga (corregimiento Sevillano y vía Ciénaga- Sevillano) se presenta un mal manejo de residuos sólidos que corresponde a botaderos a cielo abierto, cuyos desechos llegan al cuerpo de agua. Al respecto se conoce que dichos tenses incrementan los niveles de nutrientes e introducen bacterias entéricas patógenas a los ecosistemas (Narváez *et al.*, 2008) y alteran la estructura y composición de los productores primarios como el fitoplancton (Varona & Gutiérrez, 2006).

Comúnmente se han utilizado a los grupos taxonómicos fitoplanctónicos mediante relaciones de parentesco (siendo las más utilizadas a nivel de clase u órdenes) para describir la dinámica ecológica y estructura de esta comunidad, sin embargo, debido a que en la comunidad fitoplanctónica los organismos tienen requerimientos ambientales similares como los nutrientes y la obtención de luz (Web *et al.*, 2002), el análisis desde el enfoque taxonómico no sería suficiente para representar las dinámicas ecológicas de los organismos en su ambiente (Kruk *et al.*, 2010). Esto se debe a que organismos que responden de forma similar al ambiente pueden estar



muy separados filogenéticamente y no obstante estar presentes en el mismo lugar (Costa *et al.*, 2009). Es por esta razón que se han desarrollado clasificaciones alternativas en las cuales el criterio de agrupamiento de los organismos no es la filiación filogenética.

Las estrategias morfofuncionales se definen como la respuesta de las formas fitoplanctónicas frente a las características del ambiente, donde la coocurrencia de estos organismos no depende del parentesco filogenético si no de las diferencias en los procesos biológicos, tamaño, estrategias de obtención de recursos, capacidad de inhibir los procesos de pérdida (herbivoría) y regulación de la flotabilidad (Margalef, 1978; Mihaljevic *et al.*, 2015). Los rasgos basados en morfología constituyen un sistema con alta potencialidad para el estudio del fitoplancton y la clasificación ecológica de los ecosistemas acuáticos en donde habitan. Los grupos funcionales pueden ser complementados mediante la utilización de herramientas analíticas adecuadas y abordar grupos de especies características de cualquier tipo de ambiente. En este trabajo se explora dicha posibilidad en una ciénaga tropical con áreas que presentan diferentes tensores ambientales.



Planteamiento del Problema

La ciénaga Sevillano hace parte del sitio Ramsar Sistema Delta Estuarino del Río Magdalena Ciénaga Grande de Santa Marta (SDERMCGSM), a pesar de esto hasta 2017 no estaba incluida dentro de las áreas monitoreadas por el INVEMAR (INVEMAR, 2016), adicionalmente son contados los documentos que aportan información de línea base biológica que permita identificar el estado ambiental del ecosistema en términos de biodiversidad.

En esta ciénaga las transformaciones antrópicas no han sido cuantificadas pese a que son de gran intensidad y permanentes en el tiempo, principalmente debido al remplazo de comunidades naturales por sistemas agrarios y pecuarios, los cuales provocan disminución en los caudales de los afluentes que aportan agua dulce al ecosistema (CORPAMAG, 2009; Aguilera, 2011). Actualmente se registra el ingreso de aguas residuales que generan una incorporación importante de nutrientes, materia orgánica y contaminación a este humedal, lo cual afecta directamente la estructura y dinámica de los productores primarios, fundamentalmente el fitoplancton (Cloern, 2001; Ayala, 2008; Escobedu, 2010).

El fitoplancton es uno de los componentes biológicos estructurales de mayor importancia en los humedales costeros (Kjerfve, 1994; Herrera *et al.*, 1999; Varona & Gutiérrez, 2006). Sin embargo, se conoce poco sobre cómo se estructuran estas comunidades y cómo responden a las variaciones de condiciones ambientales en ciénagas costeras tropicales de Colombia (Noble *et al.*, 2003; Varona & Gutiérrez 2006). En el departamento del Magdalena hay pocos estudios que relacionan a la estructura de los grupos funcionales del fitoplancton con factores ambientales característicos de los cuerpos de agua de la región; por lo que es difícil distinguir entre la variabilidad espacial y temporal que puede reflejarse con la reducción de la calidad del agua ya sea por aumento en el ingreso de nutrientes, presencia de elementos tóxicos, modificación en el régimen hidrológico, mortalidad masiva de organismos, desaparición de especies y destrucción de hábitats de importancia para el ecosistema (Nixon, 1986; Escobedu, 2010).



Ante esta situación, este trabajo pretende abordar esta problemática dando respuesta a la siguiente pregunta: ¿Existe una respuesta en la composición y estructura de los grupos funcionales fitoplanctónicos a los diferentes escenarios de alteración ambiental en la ciénaga Sevillano?



Justificación

La ciénaga Sevillano, la cual hace parte del complejo lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta, ha cobrado particular interés regional debido a la creciente presión antropogénica que provoca el vertimiento de las aguas residuales, sin tratamiento de origen doméstico provenientes de la cabecera municipal de Ciénaga, Magdalena.

Durante los últimos años es notable la degradación presente en este ecosistema principalmente en la zona norte, debido al incremento en la incorporación de nutrientes, que propician condiciones de eutrofia. El fitoplancton juega un papel fundamental en los procesos químicos de los humedales y constituye una importante herramienta para el monitoreo de cambios asociados al incremento de nutrientes y la hidrología en distintas escalas temporales y espaciales (Kjerfve, 1994; Varona & Gutiérrez, 2006).

Identificar las variables ambientales que influyen la estructura del ensamble fitoplanctónico es indispensable para interpretar aspectos tales como la eutrofización (Aranda, 2004; Andersen *et al.*, 2006) o presencia de florecimientos algales tóxicos (Varona & Gutiérrez, 2006).

El presente trabajo pretende analizar si existe una respuesta en la composición y estructura de los grupos funcionales del fitoplancton a los tensores ambientales presentes en una ciénaga costera tropical como la ciénaga Sevillano (Magdalena, Colombia). Se busca analizar el efecto de la variabilidad climática (época lluvia y época seca) y temporal a corto plazo (febrero-marzo 2019; octubre-noviembre 2019), que caracterizan la ciénaga. Esta información resulta necesaria ya que permite la generación de recomendaciones en torno al manejo; encaminado hacia la existencia de áreas de gran importancia con elevada presión ambiental (natural y antrópica) que pueden reflejar de qué forma responde la biota a los tensores ambientales que permanentemente actúan sobre estos ecosistemas.



Antecedentes

El balance entre los factores internos y externos influye en el comportamiento fisicoquímico y biológico de los humedales costeros, principalmente debido a la variabilidad ambiental por la descarga de ríos, el efecto de la mezcla por el viento y la marea (aún más en ecosistemas someros), así como por la forma física del ecosistema (Kennish, 1986; Knoppers & Kjerfve, 1999). Se ha demostrado ampliamente la importancia de utilizar el fitoplancton como indicador de los procesos presentes en humedales costeros (Troccoli *et al.*, 2004). El fitoplancton como principal productor primario en los ecosistemas marinos y continentales, es responsable de aproximadamente la mitad de la producción primaria neta global (Field *et al.*, 1998, Falkowski *et al.*, 2004; Arrigo, 2005), facilita la entrada de energía al ecosistema, regula el régimen gaseoso y tiene acción depuradora, por lo que es considerado un importante indicador de las alteraciones del medio acuático (Loza, 1994; Pinilla *et al.*, 2010).

Existen diversas investigaciones que utilizan el fitoplancton como indicador de alteraciones ambientales y fisicoquímicas en el medio acuático. Sin embargo, para el trópico son pocos los trabajos enmarcados en esta temática (Pinilla *et al.*, 2010) y que a su vez apliquen el enfoque de grupos funcionales.

En el humedal El Salitre en Bogotá mediante el uso de los grupos funcionales fitoplanctónicos se determinó el estado trófico del ecosistema, en este trabajo reportó el incremento de nutrientes en la época lluvias relacionándolo con la dominancia del grupo IV (ausencia de rasgos especializados), demostrando que las especies tienen tolerancias moderadas frente a la limitación de recursos (Pulido & Pinilla, 2017).

A escala regional, Hernández *et al.* (2020) aplicaron la clasificación basada en rasgos y grupos funcionales del fitoplancton en las regiones Caribe, Andina y amazónica colombiana, los autores establecieron que las variables ambientales de transparencia, temperatura y concentración de iones tienen relación con la dominancia del grupo VII (colonias mucilaginosas) en una llanura de inundación en el Caribe. A su vez se encontró que los grupos propuestos permitieron exponer los



patrones funcionales de la comunidad y explicar su variación como respuesta a las características de los ecosistemas. Para la región Caribe la mayoría de ambientes estudiados fueron planicies de inundación con aguas poco profundas y turbias, en las que predominaron los grupos III y V algas filamentosas con aerótopos y organismos unicelulares flagelados respectivamente. Estos grupos poseen rasgos morfológicos que favorecen la adquisición de recursos y disminuyen las pérdidas por sedimentación.

En la ciénaga de Ayapel (departamento de Córdoba) Zabala *et al.* (2019) registraron dominancia de los grupos III y V, con cambios y alternancias en las dominancias de los grupos funcionales fitoplanctónicos a lo largo de los periodos evaluados, lo cual demuestra que las condiciones ambientales generaron una transformación temporal por lo que el empleo de esta metodología constituye una herramienta de utilidad para diagnosticar los efectos de los tensores ambientales que se den en un área a través del tiempo.

Mancera & Vidal (1994), relacionaron el florecimiento algal con la mortandad masiva de peces en el complejo lagunar CGSM. Estos autores reportan la presencia en altas concentraciones de la cianófita filamentosas *Anabaenopsis* sp. (la cual puede desarrollar cepas tóxicas), y asumen que podría estar relacionada con las causas del primer evento de mortandad del estudio. A su vez, explican que cuando se incrementan las concentraciones de fósforo y al presentarse un florecimiento de nano y picoplancton, especialmente cianofíceas y algas flageladas, pueden causar condiciones hipóxicas y anóxicas que desencadenarían la muerte masiva de peces (Mancera & Vidal, 1994). A sí mismo, Vidal (1995; 2010), caracterizó las especies de fitoplancton presente en el sistema lagunar y desarrolló una guía para la identificación de muchas de las especies registradas, siendo este aporte uno de los más importantes a nivel de taxonomía de fitoplancton en la región.

A escala local INVEMAR anualmente realiza un monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales en la Ciénaga Grande de Santa Marta, el cual incluye la evaluación de tres componentes: calidad de aguas, recursos vegetales (manglares) y recurso



pesquero. Sin embargo, solo se evalúa la parte ambiental. En cuanto a los nutrientes, por ejemplo, se registran altas concentraciones que indican contaminación por vertimientos, así como concentraciones elevadas de coliformes totales y termo-tolerantes que evidencian aportes continuos de residuos fecales al sistema (INVEMAR, 2016).



Marco Teórico

Los humedales son de acuerdo con la definición Ramsar "... las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros" (Ramsar, 2013).

De acuerdo con la propuesta de Naranjo *et al.*, (1997), la Ciénaga Sevillano hace parte del complejo lagunar Ciénaga Grande de Santa Marta y se clasifica como una ciénaga interior, representando un sistema estuarino intermareal bordeado por manglares.

La creciente presión sobre los humedales costeros se refleja principalmente en el ingreso de materia orgánica e inorgánica al ecosistema (Ramsar, 2016; Escobedu, 2010), de las cuales se ha estimado que más del 75% de los contaminantes que son incorporados a la zona costera tienen su origen en el uso urbano o rural de las tierras (Briggs, 1994).

La productividad biológica del complejo lagunar Ciénaga Grande de Santa Marta proviene de nutrientes aportados por ríos que bajan de la Sierra Nevada, del río Magdalena y del mar Caribe (Aguilera, 2011). Dentro de los principales nutrientes registrados para ecosistemas acuáticos costeros se encuentran los compuestos nitrogenados, como el amonio (NH_4), los nitritos (NO_2), los nitratos (NO_3), y los compuestos fosforados, principalmente el ortofosfato (PO_4^{-3}), que cumplen una importante función dentro del mantenimiento de los ecosistemas acuáticos, en lo que corresponde al inicio de la cadena alimentaria (De la Lanza & Aguire, 1999; Aguilera, 2011).

El régimen hidrológico es uno de los factores que principalmente se ha relacionado con la diversidad del fitoplancton ya que las fluctuaciones en el nivel del agua y profundidad, las sequías y lluvias prolongadas constituyen perturbaciones que influyen la composición fitoplanctónica y determinan las estrategias morfológicas que pueden prosperar para determinada condición hidrológica (Biggs *et al.*, 1998).



El fitoplancton es el principal productor primario en los ecosistemas acuáticos continentales y marinos, además es responsable de aproximadamente la mitad de la producción primaria neta global (Field *et al.*, 1998; Falkowski *et al.*, 2004), junto con las bacterias, son garantes de la captación y transferencia de materia y energía a niveles tróficos superiores. Algunas especies dan lugar a la formación de floraciones con potencial toxicidad que son perjudiciales para la salud humana y ecosistémica. Las floraciones son habituales en ambientes acuáticos con perturbación antrópica permanente, ya que las actividades del hombre alteran las condiciones fisicoquímicas lo cual modifica la composición y abundancia de las especies que integran la comunidad fitoplanctónica (Anderson, 2002).

Las comunidades fitoplanctónicas son altamente diversas y es difícil formular modelos predictivos de su comportamiento Kruk *et al.* (2011), sin embargo, constituyen un excelente modelo para analizar diversos procesos ecológicos relacionados con la fotosíntesis, la productividad, el ciclo del oxígeno y el ciclo del carbono y relaciones de transferencia de energía (Reynolds, 2006; Sommer, 2012; Qu *et al.*, 2019), que se estudian principalmente desde un enfoque taxonómico, de diversidad de tamaños y la morfología de los organismos (Bonilla *et al.*, 2005; Borics *et al.*, 2007; Rosati *et al.*, 2017).

Las estrategias morfológicas en la comunidad fitoplanctónica están fuertemente correlacionadas con rasgos fisiológicos de los organismos, como son la tasa de crecimiento y hundimiento, o la biomasa de las poblaciones naturales (Kruk *et al.*, 2010; Nogueira, 2011). Por ejemplo, las dimensiones de un organismo pueden por sí solas explicar en buena medida la variabilidad encontrada en la tasa metabólica, tasa de hundimiento, abundancia, biomasa y diversidad de las especies (Finkel, 2001; Litchman *et al.*, 2007). De esta manera, se puede usar los rasgos morfológicos como predictores de rasgos funcionales de las especies. Es así, que Kruk *et al.* (2010) construyeron un sistema de clasificación para fitoplancton dulceacuícola basado estrictamente en la morfología de los organismos: grupos funcionales basados en morfología (GFBM).

La clasificación funcional basada en rasgos morfológicos que se utilizó en este estudio corresponde a la propuesta por Kruk *et al.* (2010), la cual integra las características funcionales y la variabilidad morfológica de los organismos en siete grupos funcionales (GFBM I, II, III, IV, V, VI y VII) que reflejan sus diferentes facultades para absorber luz y nutrientes, capacidades de crecimiento y mecanismos para eludir la sedimentación y la depredación (Pacheco *et al.*, 2010). A continuación (Tabla 1), se resumen los rasgos categóricos propuestos por Kruk *et al.* (2010), los cuales fueron tenidos en cuenta para este estudio.

Tabla 1. Características morfológicas de los grupos funcionales de fitoplancton, filiación taxonómica, volumen (V), superficie (S), relación superficie volumen (S/V), dimensión lineal máxima (DLM). Rasgos especializados como aerótopos (Aer), flagelos (Fla), mucílago (Muc), heterocitos (Het) y sílice (Si). Modificado de Kruk *et al.* (2010).

MBFG	Description	Taxonomic group	Representative taxa	V (μm^3)	S (μm^2)	S/V (μm^{-1})	MLD (μm)	Aer	Fla	Muc	Het	Si
I (n = 87)	Small organisms with high S/V	Chlorococcales, Chroococcales, Oscillatoriales, Xanthophyceae, Ulothricales	<i>Chlorella minutissima</i> Fott & Nováková, <i>Scenedesmus ellipticus</i> Corda, <i>Synechocystis aquatilis</i> Sauvageau, <i>Chroococcales</i> <1 μm , <i>Jauginema pulidum</i> (Böcher) Anagnostidis & Komárek, <i>Monodus</i> sp. Chodat, <i>Stichococcus bacillaris</i> Naegeli	12.9 0.3-120	134 2.3-8191	5.1 1.5-28.7	7.8 0.8-43.6	0.02 0-1	0.03 0-1	0.06 0-1	0.00 0	0.00 0
II (n = 69)	Small flagellated organisms with siliceous exoskeletal structures	Chrysophyceae	<i>Chromulina gyrans</i> Stein, <i>Dinobryon cylindricum</i> Imhof., <i>Mallomonas pulcherrima</i> (Stokes) Lemmermann, <i>Pseudopedinella</i> sp. Carter	626 1.0-10469	308 4.7-2783	1.6 0.3-6.8	17.1 2.0-164	0.00 0	1.00 1	0.00 0	0.00 0	1.00 1
III (n = 45)	Large filaments with aerotopes	Nostocales, Oscillatoriales	<i>Anabaena crassa</i> (Lemmermann) Komárková-Legnerová & Cronberg, <i>Aphanizomenon issatschenkoi</i> (Usacev) Proshkina-Lavrenko, <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Woloszyńska, <i>Limnolthrix planctonica</i> Meffert, <i>Planctolthrix agardhii</i> (Gomont) Anagnostidis & Komárek	1541 8.1-8708	1553 19.6-4598	1.7 0.4-4.3	95.7 2.5-259	1.00 1	0.00 0	0.27 0-1	0.64 0-1	0.00 0
IV (n = 183)	Organisms of medium size lacking specialized traits	Chlorococcales, Oscillatoriales, Xanthophyceae, Zygnematomyceae	<i>Coelastrum microporum</i> Nägeli, <i>Micractinium pusillum</i> Fresenius, <i>Monoraphidium griffithii</i> (Berkeley) Komárková-Legnerová, <i>Pediastrum duplex</i> Meyen, <i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turpin) Brébisson, <i>Pseudanabaena limnetica</i> (Lemmermann) Komárek, <i>Arachnochloris minor</i> Pascher, <i>Closterium acutum</i> Brébisson, <i>Zygnema</i> sp. Agardh	1543 12.7-48255	791 29.1-18200	1.6 0.1-5.1	37.0 4.6-700	0.00 0	0.00 0	0.00 0	0.00 0	0.00 0
V (n = 122)	Unicellular flagellates of medium to large size	Cryptophyceae, Dinophyceae, Euglenophyceae, Volvocales, Chlorococcales	<i>Cryptomonas ovata</i> Ehrenberg, <i>Ceratium hirundinella</i> (Müller) Bergh, <i>Gymnodinium cneoides</i> Harris, <i>Euglena proxima</i> Dangeard, <i>Trachelomonas curta</i> Cunha, <i>Pyramimonas longicauda</i> Van Meel, <i>Chlamydomonas globosa</i> Snow	2444 2.4-164779	764 8.9-20997	1.2 0.1-4.9	17.5 2.1-190	0.00 0	1.00 1	0.00 0	0.00 0	0.00 0
VI (n = 98)	Non-flagellated organisms with siliceous exoskeletons	Bacillariophyceae	<i>Acanthoceros zachariasii</i> (Brun) Simonsen, <i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenb.) Simonsen, <i>Cyclotella atomus</i> Hustedt, <i>Cyclotella meneghiniana</i> Kützing, <i>Urosolenia eriensis</i> (Smith) Round & Crawford, <i>Asterionella formosa</i> Hassall, <i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenb.) Lewin & Reimann, <i>Synedra acus</i> Kützing	3143 7.8-57106	1344 19.2-17473	1.1 0.2-3.6	44.1 2.8-244	0.00 0	0.00 0	0.00 0	0.00 0	1.00 1
VII (n = 106)	Large mucilaginous colonies	Chlorococcales, Chroococcales, Oscillatoriales	<i>Botryococcus braunii</i> Kützing, <i>Eutetramorus fotii</i> (Hindák) Komárek, <i>Oocystis lacustris</i> Chodat, <i>Aphanocapsa delicatissima</i> West & G.S. West, <i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing, <i>Romeria okensis</i> (Meyer) Hindák	43152 10.9-2.4e+6	3062 24.4-87616	1.0 0-6.0	30.1 3.5-244	0.04 0-1	0.00 0	1.00 1	0.00 0	0.00 0

Continuous variables include: V, individual volume; S, surface area; MLD, maximum linear dimension, mean and range are shown. Categorical variables include: presence frequency of Aer, aerotopes; Fla, flagella; Muc, mucilage; Het, heterocysts; Si, siliceous exoskeletal structures; mean frequency and range are shown in each case n, number of cases per cluster.



Los GFBM I y II principalmente se caracterizan por su tamaño pequeño y alta relación superficie-volumen, siendo la presencia de estructuras silíceas y Flagelo rasgos específicos del segundo grupo. Los GFBM IV y V los constituyen organismos de tamaño intermedio a grande, el grupo IV no presenta rasgos particulares, mientras que el grupo V agrupa organismos flagelados unicelulares. El GFBM VI incluye organismos caracterizados por la presencia de estructuras silíceas y la ausencia de Flagelo (Diatomeas), este grupo abarca un amplio rango de tamaños y estrategias de vida. Finalmente, los GFBM III y VII están compuestos por organismos de mayor tamaño, el grupo III corresponde a filamentos de gran tamaño con alta relación superficie-volumen, y el grupo VII está compuesto por grandes colonias con baja relación superficie-volumen, rodeadas de Mucilago (Kruk *et al.*, 2010).

Al igual que los grupos funcionales, la presencia y abundancia de determinadas especies fitoplanctónicas puede utilizarse a través de métodos ecológicos (riqueza específica, diversidad, índices biológicos y análisis multivariados) para evaluar el estado ambiental del medio en el que se encuentran (De la Fuente *et al.*, 2004).

En ambientes contaminados las comunidades biológicas generalmente responden con pérdidas de diversidad debido a la desaparición de organismos sensibles e incrementado las abundancias de los organismos tolerantes, lo cual favorece aumentos en la dominancia y descensos de la equitatividad (Ramírez, 2000). Los índices más utilizados para medir la calidad del agua son el Índice de Shannon-Wiener (H') y el Índice de Simpson. Respecto al índice Shannon (H') normalmente toma valores entre 1 y 4,5. Valores encima de 3 son típicamente interpretados como "diversos", es decir, cuanto más alto sea el índice de Shannon, mayor calidad tendrá el ecosistema objeto de estudio (Golicher, 2010). Sin embargo, para Jost (2006) el índice de Shannon corresponde a un análisis de entropía más que a un análisis de diversidad "verdadera", para este autor la diversidad de una comunidad puede estimarse mediante el número efectivo de especies (Números de Hill) que hay en ella, que se entienden como el número de especies de una comunidad hipotética, balanceada de forma equitativa, en la que todas las especies son igualmente



comunes, y en la cual se conserva la abundancia relativa promedio de las especies de la comunidad real.

Hipótesis

Los grupos funcionales del fitoplancton estarán determinados por el incremento de lluvias, debido a que ocasionan resuspensión en la columna de agua lo cual aumenta la presencia de fitoplancton con exoesqueleto silíceo. A su vez, los grupos funcionales de organismos filamentosos con aerótopos y flagelados unicelulares de gran tamaño, estarán determinados por la concentración de nutrientes y la salinidad en las zonas con tensores ambientales permanentes. Finalmente, la presencia de grupos de tamaño medio con rasgos especializados será más frecuente en las zonas más conservadas de la ciénaga Sevillano.



Objetivos

Objetivo General

Evaluar los grupos funcionales del fitoplancton y su relación con variables ambientales en la ciénaga Sevillano en diferentes momentos pluviométricos.

Objetivos específicos

Analizar la diversidad taxonómica del fitoplancton en diferentes sectores de la ciénaga Sevillano durante las épocas de lluvia y sequía.

Caracterizar los grupos funcionales del fitoplancton en diferentes épocas climáticas.

Determinar la relación entre los grupos funcionales fitoplanctónicos y las variables ambientales en diferentes sectores de la ciénaga Sevillano.

Metodología

Área de estudio

Zonificación

El área de estudio correspondió a la ciénaga de Sevillano (Figura 21 y 2), la cual hace parte de la unidad geomorfológica sistema lagunar marginal y forma parte de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Esta zona se caracteriza por la presencia de pantanos y lagunas, pantanos de manglar, salares y canales. Presenta rasgos menores indicadores de procesos físicos locales como espigas, bajos, barras digitadas, deltas embrionarios subacuáticos, playones, líneas de crecimiento de vegetación y otros (Bernal, 1996).



Figura 1. Fotografía panorámica de la zona centro de la ciénaga Sevillano, detalle de la garza (*Egretta alba*), cuya pata no alcanza a sumergirse por completo indicando la baja profundidad del sector.

Tabla 2. Ubicación geográfica de las Estaciones de muestreo.

Localidades	Coordenadas
ESTACIÓN 1	N 10°57'21,9" w 74°16'14,0"

ESTACIÓN 2	N 10°58'48,4"	w 74°16'28,1"
ESTACIÓN 3	N 10°59'41,9"	w 74°15'44,9"
ESTACIÓN 4	N 10°58'40,2"	w 74°15'20,6"
ESTACIÓN 5	N 10°56'01,4"	w 74°15'31,7"
ESTACIÓN 6	N 10°54'59,8"	w 74°15'40,9"

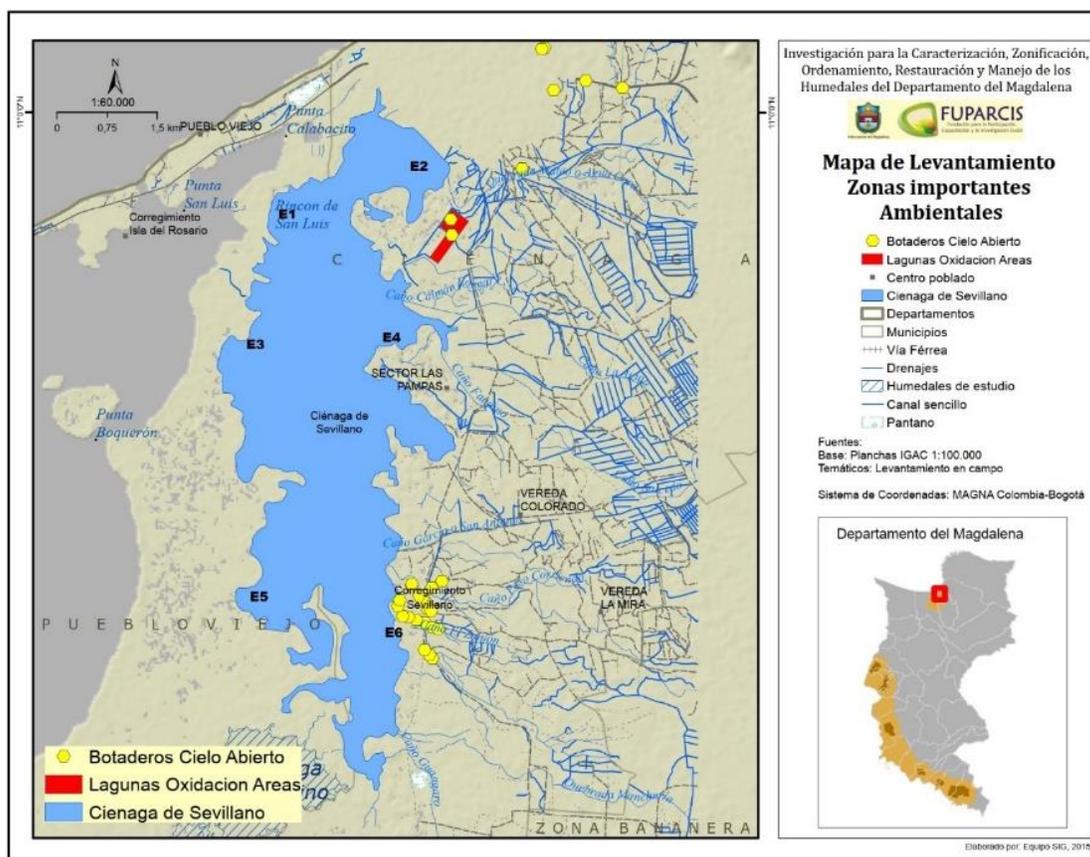


Figura 2. Área de estudio con los principales sensores ambientales detectados para cada sector en la ciénaga Sevillano. Modificado de FUPARCIS (2017).

Clima e Hidrografía

Según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2009) la Ciénaga Sevillano se encuentra en el piso térmico cálido con temperaturas medias anuales entre los 26,2°C y los 28,9°C, posee una precipitación anual que oscila entre 1000 y 2000

mm, los meses de septiembre y octubre son los de mayor precipitación, mientras que el periodo comprendido entre enero y abril es el más seco (Figura 3).

Presenta una zonificación climática cálido seco (c-S) caracterizada por evapotranspiración potencial anual (ETP) entre los 1570 a 2290 mm, con los mayores valores en los meses de mayo (IGAC, 2009). De acuerdo con su posición dentro de la zona de conservación de la Ciénaga Grande de Santa Marta, la cuenca está bajo el efecto climático de los vientos alisios, la Zona de Convergencia Intertropical, y la presencia de frentes fríos, también se siente la influencia de los eventos del Niño que provoca sequías prolongadas y de la Niña, que trae lluvias intensas.

Hidrográficamente la Ciénaga de Sevillano se encuentra influenciada directamente por las quebradas (Mateo y La aguja) y los caños (Fandiño, Pasacorriendo y Manchuria) e indirectamente por las aguas marinas que penetran a través de la Boca de la Barra.

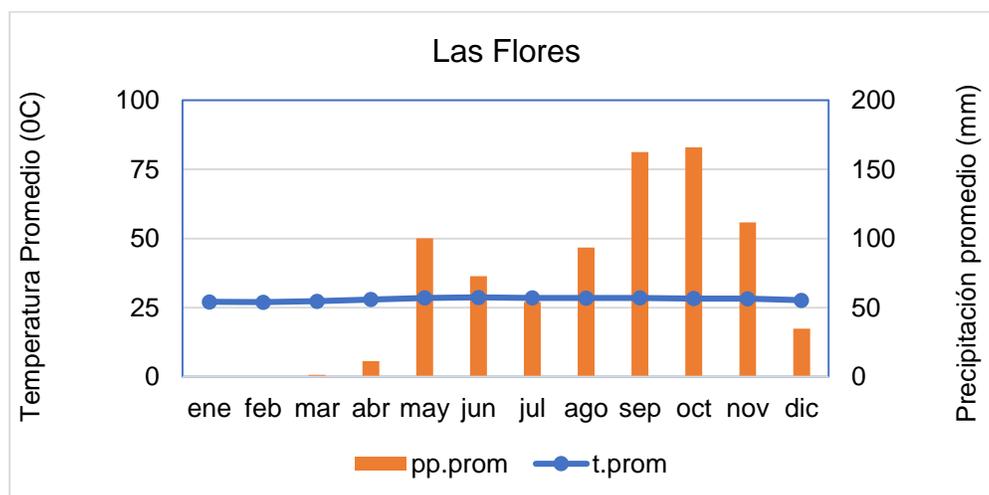


Figura 3. Climograma con datos de la estación climatológica de Las Flores (Barranquilla-Atlántico). Pp.prom: promedio de precipitación mensual multianual, t.prom: temperatura promedio mensual multianual.

Análisis de muestras

Recolección de muestras

Se seleccionaron seis estaciones de muestreo; siendo la 1, 3 y 5, las áreas más conservadas lo cual se evidenció por la presencia de vegetación emergente dominada por *Rhizophora mangle* con alternancia de individuos de *Avicennia germinans* y manglares tipo islote; mientras las estaciones 2, 4 y 6 fueron sectores con influencia de actividades antropogénicas tales como: áreas construidas (barrio Carreño), disposición de las aguas servidas de la ciudad de Ciénaga (lagunas de oxidación) y botaderos a cielo abierto (corregimiento de Sevillano) respectivamente (Figura 1). En cada estación se realizaron seis muestreos; tres de los cuales correspondieron a época seca (marzo y abril 2019) y tres a época de lluvia (septiembre y octubre 2019).

En cada estación se midieron parámetros *in situ* tales como temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y pH; con la ayuda de una sonda multiparamétrica. También, se tomaron muestras de agua superficial para análisis de variables fisicoquímicas (Clorofila *a*), microbiológicas (Coliformes totales CTT, Coliformes Termotolerantes CTE) y nutrientes (Amonio, nitritos, nitratos y ortofosfatos); siguiendo las metodologías descritas por Garay *et al.*, (2003) y de APHA *et al.*, (2012).

La recolección de las muestras biológicas se realizó a partir de una muestra en la columna de agua con tres replicas para cada estación de muestreo, se utilizó una botella Hidrobios de 2L de acuerdo a las propuestas de Kruk *et al.* (2010) y de Nogueira (2011). Las muestras fueron depositadas en frascos plásticos con capacidad de 500 ml, preservadas con lugol (Edler & Elbrächter, 2010) y almacenadas para el posterior análisis.

Conteo e identificación de organismos

Para el análisis de la muestra se empleó la metodología Utermöhl de cámaras de sedimentación, para lo cual se sedimentaron 10 ml por 24 horas (Edler & Elbrächter,



2010; Ayala, 2008). El conteo de los organismos se realizó con la ayuda de un microscopio invertido Nikon, las muestras se observaron con objetivos oculares de 10x, 40x y 100x, se contaron campos aleatorios hasta llegar a 100 células de las especies más frecuentes y se continuo el conteo haciendo un barrido por toda la cámara para registrar las especies menos frecuentes o que no habían sido observadas (Wetzel & Likens, 2000). Para este trabajo cada individuo algal (unicelular, colonia o filamento) fue considerado como una unidad. Los valores se expresan en células por mililitro, para lo cual se empleó la siguiente ecuación (APHA *et al.*, 2012).

$$Cel * mL^{-1} = \frac{C * At}{Af * F * V}$$

Dónde,

C: Número de organismos contados.

At: Área de la base de la cámara.

Af: Área de un campo.

F: Número de campos contados.

V: Volumen de la muestra sedimentada.

Para la aplicación de los grupos funcionales se implementó la metodología propuesta por Kruk *et al.* (2010), identificando a las siguientes unidades de conteo: las colonias, los cenobios, los filamentos y las células individuales.

La identificación de los organismos se hizo mediante caracteres morfológicos, siguiendo las descripciones y documentos realizados por Round *et al.* (1990), Vidal (1995), Tomas (1997), Cronberg & Annodotter (2006), Bicudo & Menezes (2006) y Vidal (2010).



Análisis de datos

Diversidad alfa fitoplanctónica

Para este análisis se siguió lo propuesto por Chao *et al.* (2020) en donde sugieren cuatro pasos como pautas para evaluar la integridad de la muestra y comparar la diversidad entre ensamblajes fitoplanctónicos. Este procedimiento de cuatro pasos vincula la completitud de la muestra, la estimación de la diversidad, la rarefacción y la extrapolación en un enfoque totalmente integrado.

Se realizó un análisis de completitud de los inventarios obtenidos, a partir de los datos de abundancia de cada especie por estación, para poder comparar la riqueza entre las estaciones. La comparación de riqueza entre ensamblajes fitoplanctónicos sólo es posible bajo niveles similares de completitud (Chao & Jost, 2015; Villegas, 2015) y dado que se alcanzó una completitud del 99%, se utilizaron los datos brutos ya que presentaron esfuerzos de muestreo comparables entre las estaciones en los diferentes muestreos.

A partir de los datos de abundancia de los diferentes taxones, se realizó una estimación de su diversidad por época climática y por época - estación, con la utilización de los "Números de Hill", los cuales permiten estimar de una forma precisa a tres atributos de la diversidad alfa del fitoplancton, representados por la riqueza ($q=0$: número de especies), la diversidad por entropía ($q=1$: euler elevado al Índice de Shannon) y el recíproco de la dominancia de Simpson ($q=2$: $1/\text{Gini-Simpson}$), atributos que son de uso común en los análisis de diversidad, pero con la ventaja de generar valores insesgados y que facilitan su comparación de la diversidad en localidades, debido al cumplimiento del principio de replicación, según las propuestas de Jost (2006; 2010), Chao *et al.*, (2020) y Chao & Chiu (2016). Basado en lo anterior, los números de Hill se encuentran definidos por (qD), donde q representa a los tres órdenes o atributos de diversidad definidos anteriormente.

(1) *Riqueza de especies* (S), estimada cuando $q = 0$, entonces:

${}^0D = S$ Donde S = número de especies, representando la riqueza.

(2) *Diversidad por entropía de Shannon (H')*, se calcula con $q = 1$, de la siguiente manera:

${}^1D = e^{H'}$ $H' = -\sum_{i=1}^S [p_i \ln(p_i)]$ Donde, p_i = número de individuos de la especie i , sobre el número de individuos total del ensamble.

(3) *Inverso de la dominancia*, definido por el índice de Simpson (λ), se estima con $q = 2$, de la siguiente manera:

$${}^2D = \frac{1}{\lambda} \quad \lambda = \sum_{i=1}^S p_i^2$$

El orden 2D representa a las especies muy abundantes o dominantes en cada localidad evaluada.

Las diversidades de orden $q=0$, $q=1$ y $q=2$, para el fitoplancton son tomados de los tres números efectivos de Hill, que corresponden a la riqueza, e^{Shannon} y el inverso de Simpson, respectivamente. Para facilidad del análisis $q=0$, $q=1$ y $q=2$, serán relacionados a la riqueza (s), diversidad de Shannon (H) y diversidad de Simpson (λ), respectivamente, de acuerdo con lo propuesto por Chao *et al.* (2020).

Los índices clásicos de diversidad alfa (α) se calcularon de manera complementaria: índice de Margalef (DMg), índice Shannon-Wiener (H'), índice de dominancia de Simpson (λ) y el índice de uniformidad (E), se calcularon de acuerdo con las ecuaciones descritas por Villareal *et al.* (2004).

Diversidad beta fitoplanctónica

Este análisis permite valorar la diversidad de recambio o nivel de similitud o diferencia que se presente en la composición de las especies por estación, descrita por sus ensambles ecológicos. Para realizar esta comparación se realizó un dendograma de similitud, basado en la distancia Bray Curtis y con el método de agrupación unión promedio no ponderado (UPGMA) debido a que presentó el mayor ajuste definido con la correlación cofenética. El análisis de diversidad beta, fue desarrollado con el programa R (R Core Team, 2020).



Se realizaron tres análisis de varianza multivariados, basados en 1000 permutaciones (“nonparametric manova” - npMANOVA), utilizando la matriz de distancia Euclideana, de acuerdo a la propuesta de Oksanen *et al.* (2017), con el objetivo de probar las diferencias en la abundancia y composición de los taxones del fitoplancton, entre épocas climáticas (factor 1: LLuvia - L y Sequía - S), entre muestreos (Factor 2: Muestreos - M1 a M6) y entre estaciones (Estación - E1 a E6). Este análisis complementa a los escalamientos multidimensionales, permitiendo valorar las diferencias entre los grupos que son proyectados (por épocas, muestreos o estaciones).

Complementario a los resultados del dendograma, en cuanto al componente espacial y biológico se utilizó un Escalamiento Multidimensional no Métrico (nMDS), el cual permitió caracterizar las épocas climáticas, basado en los 81 taxones de fitoplancton evaluados. La distancia empleada para este análisis fue la Euclideana, que, para este caso, presentó un mejor ajuste que la distancia Bray Curtis. El ajuste de la ordenación se determinó con el valor de estrés del nMDS, el cual fue de 0.18 (18%), que corresponde a una buena configuración del análisis (por debajo de 0.2).

Grupos funcionales basados en morfología (GFBM)

La determinación de los grupos morfológicos del fitoplancton se basó en la clasificación propuesta por Reynolds (1984; 2007) y Kruk *et al.* (2010) la cual simplifica la identificación de los organismos fitoplanctónicos ya que los evalúa por nueve rasgos morfológicos de fácil identificación bajo el microscopio óptico incluyendo rasgos continuos como la dimensión linear máxima (MLD) y rasgos categóricos como la presencia de mucilago (Nogueira, 2011).

La caracterización de las épocas climáticas y de las estaciones, basado en los grupos funcionales del fitoplancton, fue complementada con un mapa de calor, utilizando el método de agrupación UPGA y la distancia Euclideana (Borcard *et al.*, 2018).



Relación entre Grupos Funcionales Basados en Morfología (GFBM) y Variables ambientales

Inicialmente se realizó un BIOENV el cual permitió escoger el mejor subgrupo de variables ambientales que a una distancia Bray Curtis presentan la máxima correlación con el patrón de abundancia de los taxones de fitoplancton (Legendre, 1998). El estadístico que se utiliza para la asociación propuesta es el coeficiente de correlación de Spearman ponderado (ρ_w).

Se realizó un Análisis de Redundancias simples (RDA), para encontrar las variables que mejor se relacionaron con la distribución de los GFBM, previamente se realizó una linealización de los taxones, utilizando a la distancia de Hellinger y se estandarizaron a las variables ambientales mediante transformaciones logarítmicas en base 10, siguiendo los procedimientos recomendados por Borcard et al. (2018).



Resultados

VARIABLES AMBIENTALES

Los valores promedios de las variables físicas y químicas analizadas en las dos épocas climáticas se presentan en el anexo 1. En términos generales las variables fisicoquímicas presentaron diferencias en los valores registrados en las dos épocas climáticas evaluadas, algunos parámetros fluctuaron más que otros con relación a la época climática, es decir, que para el análisis algunas variables fisicoquímicas fueron más determinantes que otras.

La conductividad y los TDS presentaron un patrón similar con mayores valores durante la época de lluvias, la conductividad eléctrica pasó de $44,2 \mu\text{S cm}^{-1}$ durante la época seca a $175,7 \mu\text{S cm}^{-1}$ para la época de lluvias. Un patrón inverso se observa en las variables Salinidad, Amonio, Solidos totales (ST), Solidos suspendidos totales (SST) y fosfato (PO_4), en donde los mayores promedios se registraron durante la época seca, los Solidos totales pasaron de 11292 mgL^{-1} a $422,5 \text{ mgL}^{-1}$ durante las lluvias, los valores de fosfato se redujeron de $3,34 \text{ mgL}^{-1}$ en la época seca a $0,68 \text{ mgL}^{-1}$ en la época de lluvias. La salinidad presentó valores mínimos de 23,7% y máximos de 27% para época lluvia y seca respectivamente, el oxígeno fluctuó entre 6,6 y $7,66 \text{ mgL}^{-1}$ para la época lluvia y seca respectivamente.

DIVERSIDAD ALFA - ABUNDANCIA DE ESPECIES

Se registró un total de 4799 organismos, distribuidos en 81 especies, pertenecientes 63 géneros y 9 clases taxonómicas. Las clases Bacillariophyceae y Cyanophyceae presentaron la mayor riqueza con 37 y 21 especies, respectivamente; seguidos por la clase Chlorophyceae con 8 especies y Euglenophyceae con 4 taxones (Figura 4). El mayor número de especies se obtuvo en la época seca con 74, en la época lluviosa se registró menor riqueza con 59 (Tabla 3).

La especie con mayor abundancia fue *Chroococcus dispersus* (304 organismos, 6,39%), seguida de *Coscinodiscus* sp1 (252 organismos, 5,25%), *Caloneis* sp1 (209 organismos, 4,36%) y *Dunaliella salina* (185 organismos, 3,85%).

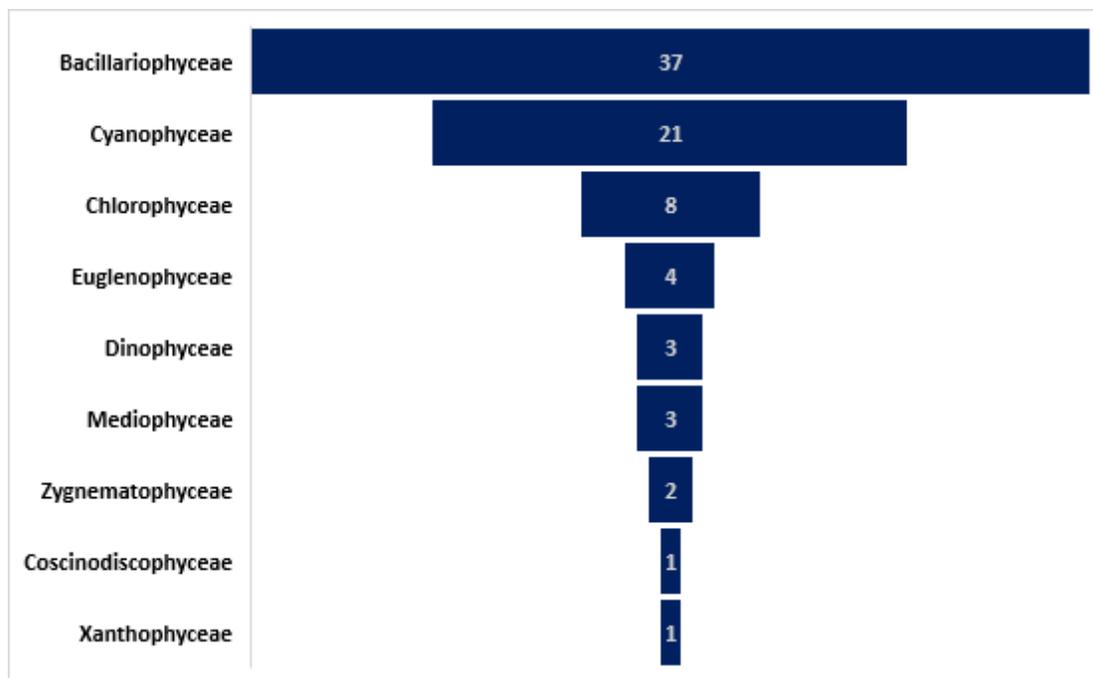


Figura 4. Riqueza de especies fitoplanctónicas por clase taxonómica.

La abundancia fitoplanctónica fluctuó entre 2320 y 2479 individuos para las épocas Lluviosa y seca, respectivamente (Tabla 3). Los estimadores de diversidad de Simpson y de Shannon, no presentaron diferencias entre épocas. Los valores del índice de Simpson en ambas épocas fueron muy altos (cerca de 1). La uniformidad fue intermedia y la dominancia muy baja. El número de especies con un solo individuo (representadas por f_1) fueron tres en la época seca, mientras que en la época lluviosa solo se presentó una. Finalmente, Chao 1 para la época seca estima una riqueza que solo supera en un taxón a la riqueza observada, mientras que para la época lluviosa la riqueza estimada es igual a la observada (Tabla 3).

En cuanto a la especificidad, se encontró que 52 especies se presentan en los dos períodos, 22 especies son exclusivas del periodo seco y 6 del periodo lluvioso (Tabla 4).

Tabla 3. Valoración de la diversidad alfa a partir de estimadores clásicos relacionados a la abundancia de taxones, en las dos épocas evaluadas (Seca y Lluviosa).

Estimador	SECA	LLUVIA
Riqueza (S)	74	59
Abundancia (n)	2479	2320
Dominancia (D)	0,04	0,04
Simpson (λ)	0,96	0,96
Shannon (H)	3,68	3,65
Uniformidad ($e^{H/s}$)	0,54	0,65
f1	3	1
Chao-1	75	59

Tabla 4. Listado de las especies de fitoplancton registradas en la Ciénaga Sevillano, Magdalena.

CLASE	Especie	CÓDIGO	SECA	LLUVIA
Bacillariophyceae	<i>Achnanthes sp1</i>	Acsp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Amphora marina</i>	Amphm	X	X
Bacillariophyceae	<i>Amphora ovalis</i>	Ampho	X	X
Bacillariophyceae	<i>Asteromphalus sp1</i>	Assp1	X	
Bacillariophyceae	<i>Aulacoseira sp1</i>	Ausp1	X	
Bacillariophyceae	<i>Caloneis sp1</i>	Calsp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Campylodiscus sp1</i>	Camsp1		X
Bacillariophyceae	<i>Cocconeis sp1</i>	Ccsp1	X	
Bacillariophyceae	<i>Coscinodiscus bicostatus</i>	Cscnb	X	X
Bacillariophyceae	<i>Coscinodiscus sp1</i>	Cssp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Craticula cuspidata</i>	Crtcc	X	X
Bacillariophyceae	<i>Cyclotella sp1</i>	Cysp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Cylindrotheca closterium</i>	Cylnc	X	X
Bacillariophyceae	<i>Cymbella sp1</i>	Cymsp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Cymbella sp2</i>	Cymsp2	X	X
Bacillariophyceae	<i>Encyonema sp1</i>	Ensp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Entomoneis alata</i>	Entma	X	X
Bacillariophyceae	<i>Eunotia sp1</i>	Ensp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Fragilaria sp1</i>	Frsp1	X	
Bacillariophyceae	<i>Gomphonema sp1</i>	Gmsp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Gomphonema sp2</i>	Gmsp2	X	X
Bacillariophyceae	<i>Gyrosigma sp1</i>	Gysp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Hantzschia sp1</i>	Hnsp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Melosira sp1</i>	Mlsp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Navicula longa</i>	Nvcll	X	X
Bacillariophyceae	<i>Navicula sp1</i>	Nvsp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Navicula sp2</i>	Nvsp2	X	X
Bacillariophyceae	<i>Nitzschia sp1</i>	Ntsp1		X
Bacillariophyceae	<i>Pinnularia sp1</i>	Pnsp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Pinnularia sp2</i>	Pnsp2	X	X
Bacillariophyceae	<i>Plagiotropis lepidoptera</i>	Plgtl	X	X

CLASE	Especie	CÓDIGO	SECA	LLUVIA
Bacillariophyceae	<i>Pleurosigma sp1</i>	Plsp1	X	X
Bacillariophyceae	<i>Pseudonitzschia pungens</i>	Psdnp	X	X
Bacillariophyceae	<i>Stauroneis sp1</i>	Stsp1	X	
Bacillariophyceae	<i>Surirella sp1</i>	Srsp1	14	X
Bacillariophyceae	<i>Synedra sp1</i>	Sysp1	X	
Bacillariophyceae	<i>Thalassionema sp1</i>	Thsp1	X	X
Chlorophyceae	<i>Ankistrodesmus sp1</i>	Anksp1		X
Chlorophyceae	<i>Coelastrum sp1</i>	Coelsp1	X	
Chlorophyceae	<i>Crucigenia sp1</i>	Crsp1	X	X
Chlorophyceae	<i>Desmodesmus brasiliensis</i>	Dsmdb	X	X
Chlorophyceae	<i>Dunaliella salina</i>	Dnlls	X	X
Chlorophyceae	<i>Dunaliella viridis</i>	Dnllv	X	
Chlorophyceae	<i>Pediastrum sp1</i>	Pdsp1	X	X
Chlorophyceae	<i>Scenedesmus sp1</i>	Scsp1		X
Coccinodiscophyceae	<i>Pseudosolenia sp1</i>	Pssp1	X	
Cyanophyceae	<i>Anabaena sp1</i>	Ansp1	X	X
Cyanophyceae	<i>Anabaena sp2</i>	Ansp2	X	
Cyanophyceae	<i>Anabaenopsis sp1</i>	Ansp1	X	
Cyanophyceae	<i>Arthrospira sp1</i>	Arsp1		X
Cyanophyceae	<i>Chroococcus dispersus</i>	Chrsp1	X	X
Cyanophyceae	<i>Chroococcus sp1</i>	Chrsp2	X	X
Cyanophyceae	<i>Eudorina sp1</i>	Edsp1		X
Cyanophyceae	<i>Johannesbaptistia sp1</i>	Jhsp1	X	
Cyanophyceae	<i>Komvophoron sp1</i>	Kmsp1	X	X
Cyanophyceae	<i>Limnothrix sp1</i>	Lmsp1	X	X
Cyanophyceae	<i>Limnothrix sp2</i>	Lmsp2	X	X
Cyanophyceae	<i>Lyngbya sp1</i>	Lysp1	X	X
Cyanophyceae	<i>Merismopedia sp1</i>	Mrsp1	X	X
Cyanophyceae	<i>Microcystis aeruginosa</i>	Mcrca	X	X
Cyanophyceae	<i>Oscillatoria sp1</i>	Ossp1	X	X
Cyanophyceae	<i>Oscillatoria sp2</i>	Ossp2	X	X
Cyanophyceae	<i>Oscillatoria sp3</i>	Ossp3	X	X
Cyanophyceae	<i>Phormidium mucicola</i>	Phrmm	X	
Cyanophyceae	<i>Spirogyra sp1</i>	Spsp1	X	X
Cyanophyceae	<i>Spirulina sp1</i>	Spsp1	X	X
Cyanophyceae	<i>Spirulina subsalsa</i>	Sprls	X	
Dinophyceae	<i>Alexandrium sp1</i>	Alsp1	X	
Dinophyceae	<i>Gonyaulax sp1</i>	Gnsp1	X	
Dinophyceae	<i>Peridinium sp1</i>	Prsp1	X	
Euglenophyceae	<i>Euglena acus</i>	Eglna	X	
Euglenophyceae	<i>Euglena sp1</i>	Egsp1	X	X
Euglenophyceae	<i>Phacus sp1</i>	Phsp1	X	X
Euglenophyceae	<i>Phacus sp2</i>	Phsp2	X	X
Mediophyceae	<i>Chaetocerus sp1</i>	Chasp1	X	X
Mediophyceae	<i>Chaetocerus sp2</i>	Chasp2	X	X
Mediophyceae	<i>Chaetocerus sp3</i>	Chasp3	X	
Mediophyceae	<i>Hemiaulus sp1</i>	Hmsp1	X	
Xanthophyceae	<i>Centrtractus sp1</i>	Censp1	X	
Zygnematophyceae	<i>Closterium sp1</i>	Clsp1		X
Zygnematophyceae	<i>Cosmarium sp1</i>	Cosmsp1	X	

Diversidad fitoplanctónica entre épocas climáticas

a. Perfil de completitud de las muestras

En la época seca se observó un aumento del perfil entre los diferentes órdenes de diversidad, esto indica que hay especies que faltan por ser detectadas lo cual se evidencia con la mayor pendiente de la curva (Figura 5).

Para el orden $q=1$ se representa la cobertura de la muestra, que en todos los casos está por encima de 94%. Los valores estimados de $q=1$ y $q=2$, son iguales a 1, lo cual indica que el número de taxones observados en estas épocas, cubren el 100% de los taxones esperados (Figura 5).

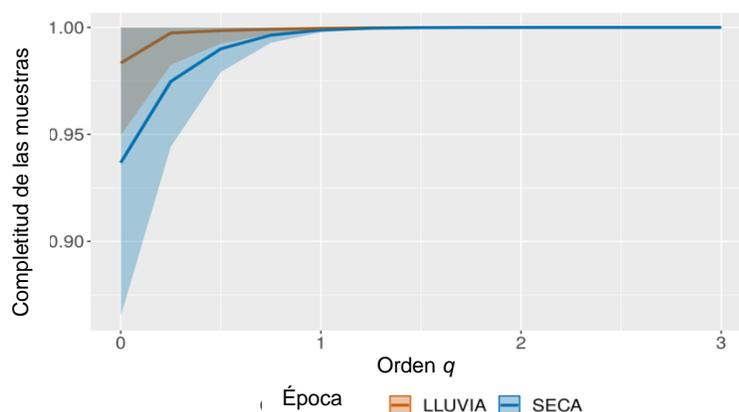


Figura 5. Perfil de completitud de las muestras, para las dos épocas evaluadas (Seca y Lluviosa). Las líneas representan los perfiles estimados de completitud y las bandas a los lados son los límites de confianza por encima y por debajo de las líneas.

b. Perfiles de diversidad.

La riqueza de especies ($q=0$) no detectada para la época seca y época lluviosa son al menos 5 ($\geq 6\%$) y 1 ($\geq 0,42\%$) respectivamente. La diversidad de Shannon ($q=1$) no detectada en la época seca y lluviosa fue 0,64 y 0,49 respectivamente. Es decir, solo una especie abundante no se detectó dentro de cada época. La diversidad de Simpson ($q=2$) no detectada en las épocas seca y lluviosa fue 0,25 y 0,34 respectivamente (Tabla 5), lo que implica que se detectaron casi todas las especies altamente abundantes (Figura 6).

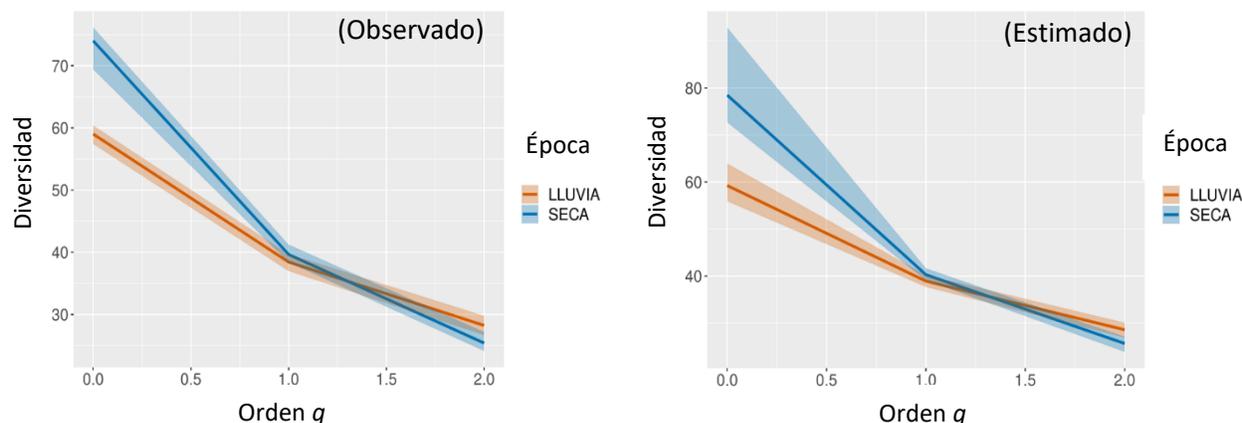


Figura 6. Perfiles de diversidad asintótica, para las dos épocas evaluadas (Lluvia y Seca). Órdenes $q= 0, 1$ y 2 , corresponden a la riqueza, Shannon y Simpson, respectivamente. (a) Perfil observado/empírico, (b) perfil estimado. Las líneas relacionan los perfiles de diversidad estimada para los diferentes órdenes q y las bandas relacionan a los límites de confianza inferior y superior de cada época, proyectados por permutaciones de Monte Carlo.

c. Curvas de interpolación y extrapolación por rarefacción.

El porcentaje de diversidad evaluada relacionada a la diversidad observada y a la estimada por rarefacción, estuvo entre el 94% y el 100% para época seca y época lluviosa respectivamente, lo cual indica que, para los tres órdenes de diversidad el esfuerzo de muestreo fue satisfactorio (Tabla 5).

La diversidad valorada con el orden $q=0$ no logró estabilizarse en el doble del tamaño extrapolado en sequía, lo que implica que es necesario un mayor esfuerzo de muestreo en esa época, para tener una estimación más precisa de la riqueza total de taxones. La diversidad de órdenes $q=1$ y $q=2$ se estabilizaron en su extrapolación en las dos épocas, lo cual implica que las estimaciones de diversidad asintótica para estas dos medidas funcionan satisfactoriamente para inferir verdaderas Diversidades (Figura 7).

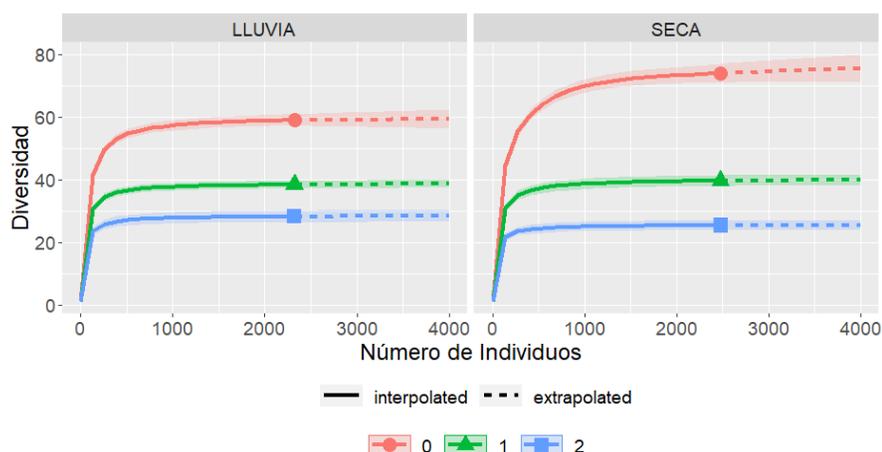


Figura 7. Curvas de diversidad interpolada (líneas sólidas) y extrapoladas (líneas punteadas), para valorar la relación entre la abundancia requerida (eje x), para estimar una diversidad óptima (asíntota o estabilidad de las curvas extrapoladas), en las épocas evaluadas (Seca y Lluviosa). Las bandas alrededor de las curvas representan a los límites de confianza por encima y por debajo de las curvas de cada época. (a) Curvas de rarefacción para la riqueza de taxones ($q=0$), para Shannon ($q=1$) y para Simpson ($q=2$).

d. Curvas de interpolación y extrapolación por rarefacción.

El análisis asintótico anterior implica que, para diversidades de $q=1$ la diversidad verdadera del fitoplancton registrada durante la época seca es significativamente mayor que la de la época lluviosa. Las coberturas de las muestras son suficientemente altas y corresponden a 1 (100%), para ambas épocas (Figura 8).

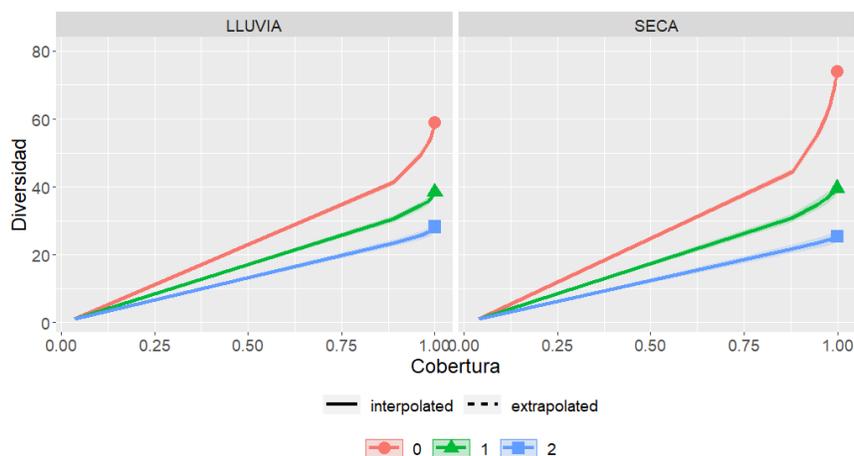


Figura 8. Cobertura de las muestras tomadas en dos épocas (Seca y Lluviosa), para la riqueza de taxones (a) y para la diversidad de Shannon (b). Las bandas alrededor de las curvas de cobertura representan a los límites de confianza por encima y por debajo de estas.

Tabla 5. Estimación de la diversidad alfa, con números de Hill $q=0$, $q=1$, $q=2$, para el análisis realizado por épocas climáticas.

Datos entre Épocas climáticas			
a. Perfiles de completitud			
Época	$q=0$	$q=1$	$q=2$
Seca	94%	100%	100%
Lluvia	98%	100%	100%
b. Perfiles de diversidad			
Época	$q=0$	$q=1$	$q=2$
Seca			
Asintótico	78,5	40,28	25,64
Empírico	74	39,64	25,39
No detectado	4,5	0,64	0,25
No detectado	6%	2%	1%
Lluvia			
Asintótico	59,2	38,9	28,5
Empírico	59	38,42	28,22
No detectado	0,25	0,49	0,34
No detectado	0,42%	1,26%	1,19%
c. Curvas de interpolación y extrapolación por rarefacción			
Época	$q=0$	$q=1$	$q=2$
Seca			
Cobertura	100%	100%	100%
Observada	74	40	25
Estimada	78	40	26
Esfuerzo	94%	98%	99%
Lluvia			
Cobertura	100%	100%	100%
Observada	59,0	38,4	28,2
Estimada	59,3	38,9	28,6
Esfuerzo	100%	99%	99%

Diversidad del Fitoplancton entre estaciones y épocas climáticas

Diversidad Alfa – Abundancia de especies.

El periodo seco se caracterizó por una riqueza que fluctuó entre 40 y 44 especies para las primeras estaciones E1 a E4 y disminuyó considerablemente en las dos últimas, especialmente en la estación E5, con 24 especies. La abundancia presentó un patrón similar oscilando entre 278 y 633 organismos en las primeras cuatro estaciones y con una elevada disminución en la estación E5. La dominancia de taxones fue muy baja en todas las estaciones (menor al 13%). La uniformidad presentó valores que fluctuaron entre 38% y 74%, el menor valor correspondió a la estación E5 y el mayor a la E6. Los valores de diversidad definidos por Simpson fueron muy altos (mayores al 87%), similar a lo que ocurrió con Shannon (mayores a 2,7 bits). El número de especies con un solo individuo, representadas por f1 (singletons), indicaron que en la estación E1 presentaron cinco f1, seguido de la estación E2 con cuatro f1 y la estación E5 con dos f1, demostrando que requieren un mayor esfuerzo de muestreo, que permita aumentar los individuos por cada una de esas especies. Finalmente, Chao 1 define una riqueza estimada muy similar a la observada, lo cual garantiza la buena calidad de las muestras obtenidas (Tabla 6).

Durante la época lluvia se presentó una riqueza con valores entre 29 y 40 especies (menor a la época seca), el menor valor en la estación E3 y el mayor valor en E4. La abundancia presentó valores entre 245 y 576 organismos, el menor valor se registró en la estación E6 y el mayor en E4. Los estimadores de dominancia fueron bajos (menores al 10%), siendo inversos a la uniformidad en todas las estaciones. La diversidad definida por los estadísticos de Shannon (mayores a 2,8 bits), Simpson (mayores al 89%) y Chao 1 (riqueza estimada similar a la observada), fueron similares a los registrados en sequía. El número de especies con un solo individuo, representadas por f1 (singletons), indicó la presencia de tres f1 en la estación E5 y un f1 en las estaciones E2, E4 y E6 (Tabla 6).

Tabla 6. Valoración de la diversidad alfa a partir de estimadores clásicos relacionados a la abundancia de taxones, en las dos épocas evaluadas (Seca y

Lluviosa). S: época seca, L: época de lluvia. E1 a E6: seis localidades evaluadas por cada época.

Índice	SECA						LLUVIA					
	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	LE1	LE2	LE3	LE4	LE5	LE6
Riqueza (S)	42	44	42	40	24	38	34	38	29	40	34	31
Dominancia (D)	0,04	0,04	0,10	0,12	0,07	0,08	0,10	0,04	0,10	0,08	0,06	0,05
Simpson (1-D)	0,96	0,96	0,90	0,88	0,93	0,92	0,90	0,96	0,90	0,92	0,94	0,95
Shannon (H)	3,38	3,51	2,83	2,73	2,87	3,13	2,95	3,44	2,82	3,05	3,14	3,20
Uniformidad ($e^{H/S}$)	0,70	0,76	0,40	0,38	0,74	0,60	0,56	0,82	0,58	0,53	0,68	0,79
f1	6	4	1	1	2	0	0	1	0	1	3	1
Chao-1	43	45	42	40	24	38	34	38	29	40	35	31

En cuanto a la especificidad del fitoplancton en las estaciones y épocas evaluadas, se encontró que las especies *Coscinodiscus* sp1, *Cymbella* sp1, *Euglena* sp1, *Navicula* sp1 y *Pinnularia* sp1 se registraron en las seis estaciones durante las dos épocas. Sin embargo, algunas especies estuvieron presentes solo en una de las estaciones como lo fueron *Asteromphalus* sp1, *Peridinium* sp1 y *Phormidium mucicola* halladas en la estación SE1; *Hemiaulus* sp1, *Pseudosolenia* sp1 y *Synedra* sp1 en la estación SE2; las especies *Anabaenopsis* sp1, *Coelastrum* sp1 y *Dunaliella viridis* en la estación SE4; *Gonyaulax* sp1 en la estación SE3; y *Johannesbaptistia* sp1 para la estación SE6. Las especies *Ankistrodesmus* sp1, *Arthrospira* sp1, *Campylodiscus* sp1, *Closterium* sp1, *Eudorina* sp1 y *Scenedesmus* sp1 fueron exclusivas de la época lluviosa, no obstante, presentaron diferencias en cuanto a las estaciones donde fueron halladas (Tabla 7).

Tabla 7. Listado de las especies de fitoplancton registradas en la Ciénaga Sevillano, Magdalena. S: época seca, L: época de lluvia. E1 a E6: seis localidades evaluadas por cada época.

Clase	Especie	LE1	LE2	LE3	LE4	LE5	LE6	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6
Bacillariophyceae	<i>Achnanthes</i> sp1					x				x		x	X
Dinophyceae	<i>Alexandrium</i> sp1									x			



Bacillariophyceae	<i>Amphora marina</i>		x					x	x	x	X	x	x
Bacillariophyceae	<i>Amphora ovalis</i>	x	x	x	x	x	x		x	x	X		
Cyanophyceae	<i>Anabaena sp1</i>					x	x	x		x	X		
Cyanophyceae	<i>Anabaena sp2</i>								x		X		
Cyanophyceae	<i>Anabaenopsis sp1</i>										X		
Chlorophyceae	<i>Ankistrodesmus sp1</i>	x		x									
Cyanophyceae	<i>Arthrospira sp1</i>			x	x		x						
Bacillariophyceae	<i>Asteromphalus sp1</i>							x					
Bacillariophyceae	<i>Aulacoseira sp1</i>							x	x	x			X
Bacillariophyceae	<i>Caloneis sp1</i>	x		x	x			x	x	x	X	x	X
Bacillariophyceae	<i>Campylodiscus sp1</i>	x		x	x		x						
Xanthophyceae	<i>Centritractus sp1</i>							x	x	x			
Mediophyceae	<i>Chaetoceros sp1</i>		x			x		x	x				X
Mediophyceae	<i>Chaetoceros sp2</i>		x						x				X
Mediophyceae	<i>Chaetoceros sp3</i>								x				X
Cyanophyceae	<i>Chroococcus sp1</i>		x	x	x	x			x	x	x		X
Cyanophyceae	<i>Chroococcus sp2</i>						x			x	x		X
Zygnematophyceae	<i>Closterium sp1</i>	x		x	x	x	x						
Bacillariophyceae	<i>Cocconeis sp1</i>							x	x	x			X
Chlorophyceae	<i>Coelastrum sp1</i>										x		
Bacillariophyceae	<i>Coscinodiscus bicostatus</i>					x		x	x	x		x	X
Bacillariophyceae	<i>Coscinodiscus sp1</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
Zygnematophyceae	<i>Cosmarium sp1</i>							x		x	x	x	
Bacillariophyceae	<i>Craticula cuspidata</i>	x	x	x	x	x	x		x			x	
Chlorophyceae	<i>Crucigenia sp1</i>		x	x	x	x				x	x		X
Bacillariophyceae	<i>Cyclotella sp1</i>					x	x			x			
Bacillariophyceae	<i>Cylindrotheca closterium</i>	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	
Bacillariophyceae	<i>Cymbella sp1</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
Bacillariophyceae	<i>Cymbella sp2</i>	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	X
Chlorophyceae	<i>Desmodesmus brasiliensis</i>	x		x		x					x		
Chlorophyceae	<i>Dunaliella salina</i>						x	x		x		x	X
Chlorophyceae	<i>Dunaliella viridis</i>										x		
Bacillariophyceae	<i>Encyonema sp1</i>	x	x	x	x	x			x	x	x		
Bacillariophyceae	<i>Entomoneis alata</i>	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	X
Cyanophyceae	<i>Eudorina sp1</i>		x		x								
Euglenophyceae	<i>Euglena acus</i>								x		x		
Euglenophyceae	<i>Euglena sp1</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
Bacillariophyceae	<i>Eunotia sp1</i>					x	x	x	x	x			
Bacillariophyceae	<i>Fragilaria sp1</i>							x			x	x	X
Bacillariophyceae	<i>Gomphonema sp1</i>	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	X
Bacillariophyceae	<i>Gomphonema sp2</i>	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	
Dinophyceae	<i>Gonyaulax sp1</i>									x			
Bacillariophyceae	<i>Gyrosigma sp1</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x			X
Bacillariophyceae	<i>Hantzschia sp1</i>	x	x		x		x		x		x		X

Diversidad fitoplanctónica entre estaciones y épocas climáticas

Los valores numéricos para los tres órdenes $q=0$, 1 y 2 de los perfiles de completitud de muestra estimados, los perfiles de diversidad empírica y asintótica, las curvas de rarefacción y extrapolación basadas en la abundancia de taxones de las estaciones evaluadas se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Estimación de la diversidad alfa, con números de Hill $q=0$, $q=1$, $q=2$, para el análisis realizado por (1) abundancias de individuos en época seca y (2) abundancias de individuos en época lluviosa.

1. Datos de sequía				2. Datos de lluvia			
a. Perfil de completitud				a. Perfil de completitud			
Localidad	$q=0$	$q=1$	$q=2$	Localidad	$q=0$	$q=1$	$q=2$
SE1	0,93	0,98	1	LE1	1	1	1
SE2	0,96	0,99	1	LE2	0,97	1	1
SE3	0,98	1	1	LE3	1	1	1
SE4	0,98	1	1	LE4	0,98	1	1
SE5	0,96	0,99	1	LE5	0,92	0,99	1
SE6	1	1	1	LE6	0,97	1	1

b. Perfil de diversidad				b. Perfil de diversidad			
Periodo	$q=0$	$q=1$	$q=2$	Periodo	$q=0$	$q=1$	$q=2$
SE1				LE1			
Asintótico	44,6	32,1	24,7	Asintótico	34,0	20,1	10,0
Empírico	42	29	23	Empírico	34	19	10
No detectado	3	3	2	No detectado	0	1	0
No detectado	6%	8%	8%	No detectado	0%	5%	2%
SE2				LE2			
Asintótico	45,3	35,9	30,4	Asintótico	38,3	32,7	29,2
Empírico	44	33	28	Empírico	38	31	27
No detectado	1	2	2	No detectado	0	2	2
No detectado	3%	7%	8%	No detectado	1%	5%	7%
SE3				LE3			
Asintótico	42,1	17,6	9,7	Asintótico	29,0	17,2	10,3
Empírico	42	17	10	Empírico	29	17	10
No detectado	0	1	0	No detectado	0	1	0
No detectado	0%	4%	1%	No detectado	0%	3%	2%
SE4				LE4			
Asintótico	40,1	15,8	8,7	Asintótico	40,2	21,9	12,5
Empírico	40	15	9	Empírico	40	21	12
No detectado	0	1	0	No detectado	0	1	0
No detectado	0%	3%	1%	No detectado	0%	3%	2%
SE5				LE5			
Asintótico	25,0	18,8	14,9	Asintótico	36,2	24,4	16,9
Empírico	24	18	14	Empírico	34	23	16

No detectado	1	1	1	No detectado	2	1	1
No detectado	4%	6%	6%	No detectado	6%	6%	5%
SE6				LE6			
Asintótico	38,0	23,9	13,2	Asintótico	31,2	26,2	22,1
Empírico	38	23	13	Empírico	31	25	20
No detectado	0	1	0	No detectado	0	2	2
No detectado	0%	4%	3%	No detectado	1%	6%	8%

c. Interpolación y extrapolación por rarefacción

Periodo	q= 0	q= 1	q= 2
SE1			
Cobertura	96%	96%	96%
Div. Observada	42	29,4	22,8
Div. Estimada	44,6	32,1	24,7
Esfuerzo	94%	92%	92%
SE2			
Cobertura	97%	97%	97%
Div. Observada	44	33,5	28,0
Div. Estimada	45,3	35,9	30,4
Esfuerzo	97%	93%	92%
SE3			
Cobertura	95%	95%	95%
Div. Observada	42	17,0	9,6
Div. Estimada	42,1	17,6	9,7
Esfuerzo	100%	96%	99%
SE4			
Cobertura	95%	95%	95%
Div. Observada	40,0	15,3	8,6
Div. Estimada	40,1	15,8	8,7
Esfuerzo	100%	97%	99%
SE5			
Cobertura	99%	99%	99%
Div. Observada	24	17,7	14,0
Div. Estimada	25,0	18,8	14,9
Esfuerzo	96%	94%	94%
SE6			
Cobertura	97%	97%	97%
Div. Observada	38	22,9	12,8
Div. Estimada	38	23,9	13,2
Esfuerzo	100%	96%	97%

c. Interpolación y extrapolación por rarefacción

Periodo	q= 0	q= 1	q= 2
LE1			
Cobertura	98%	98%	98%
Div. Observada	34	19,1	9,8
Div. Estimada	34	20,1	10,0
Esfuerzo	100%	95%	98%
LE2			
Cobertura	98%	98%	98%
Div. Observada	38,0	31,1	27,2
Div. Estimada	38,249	32,7	29,2
Esfuerzo	99%	95%	93%
LE3			
Cobertura	98%	98%	98%
Div. Observada	29	16,7	10,1
Div. Estimada	29	17,2	10,3
Esfuerzo	100%	97%	98%
LE4			
Cobertura	96%	96%	96%
Div. Observada	40	21,1	12,2
Div. Estimada	40,2	21,9	12,5
Esfuerzo	100%	97%	98%
LE5			
Cobertura	98%	98%	98%
Div. Observada	34	23,0	16,0
Div. Estimada	36,2	24,4	16,9
Esfuerzo	94%	94%	95%
LE6			
Cobertura	99%	99%	99%
Div. Observada	31	24,6	20,4
Div. Estimada	31,2	26,2	22,1
Esfuerzo	99%	94%	92%

a. Perfil de completitud entre estaciones y épocas climáticas

En el periodo seco y lluvioso, las curvas que relacionan a las diferentes estaciones presentan poca pendiente entre los tres órdenes de diversidad asociados al eje x, lo cual indica que el esfuerzo de muestreo realizado fue suficiente (Figura 9).

Para orden $q = 0$ (Riqueza – s), en las dos épocas y estaciones, está por encima de 0,92 (92%). Los valores estimados de $q = 1$ y $q = 2$, son iguales a 1, excepto en la estación 1 del periodo seco (SE1), en donde fue de 0,98 (98%). Lo cual indica que el número de taxones observados, cubren como mínimo el 98% de taxones esperados (Tabla 8)

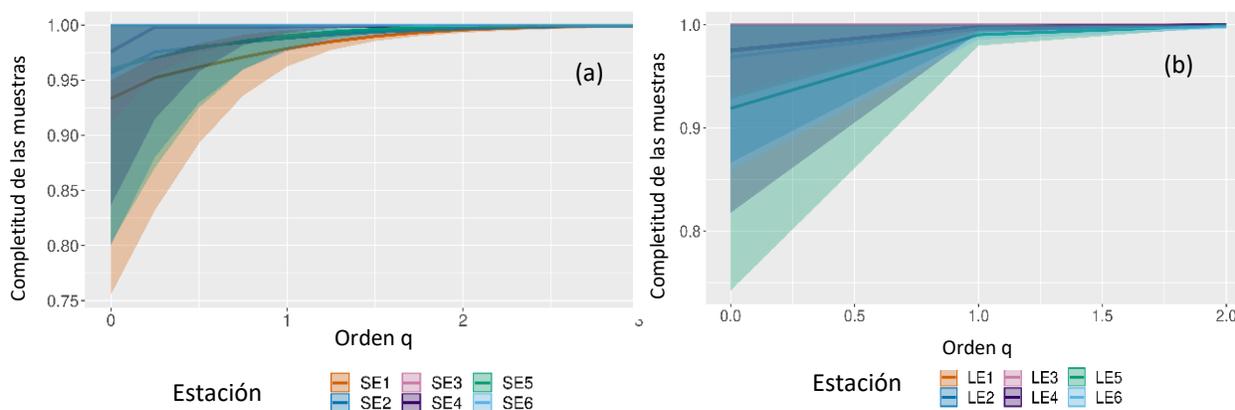


Figura 9. Perfil de completitud de las muestras, para las dos épocas evaluadas (S: Seca (a) y L: Lluviosa (b)) y las localidades evaluadas (E1 a E6). Las líneas representan los perfiles estimados de completitud y las bandas a los lados son los límites de confianza por encima y por debajo de las líneas.

b. Perfiles de diversidad.

Se presentaron similitudes entre los perfiles generados, salvo en la estación 1 del periodo seco (SE1) y en la estación 2 del periodo lluvioso (LE2), en donde las bandas que relacionan a los límites de confianza son muy elevadas (

Figura 10).

Para la época seca los mayores porcentajes de riqueza de especies no detectadas fueron 6%, 4% y 3%, los cuales se presentaron en las estaciones SE1, SE5 y SE2 respectivamente. La diversidad de Shannon no detectada en esta misma época oscilo entre 1 especie (SE3, SE4, SE5 y SE6) y 3 especies (SE1), es decir, solo alrededor de una especie abundante no se detectó en las estaciones SE3, SE4, SE5 y SE6; mientras que, tres especies abundantes no se detectaron en la estación SE1. La diversidad de Simpson no detectada fue de 0 (SE3, SE4 y SE6), 1 (SE5) y

2 (SE1 y SE2), lo que implica que se detectaron casi todas las especies altamente abundantes en las estaciones evaluadas (Tabla 8).

Para la época lluviosa la riqueza de especies no detectadas es de 2 especies, correspondientes solo a la estación LE5, el resto de las estaciones no presentaron taxones no detectados para este estimador. La diversidad de Shannon no detectada fue de 1 (LE1, LE3, LE4 y LE5) y 2 (LE2 y LE6), es decir, solo alrededor de una especie abundante no se detectó en las estaciones LE1, LE3, LE4 y LE5; mientras que, dos especies abundantes no se detectaron en las estaciones LE2 y LE6. La diversidad de Simpson no detectada fue de 0 (LE1, LE3 y LE4), 1 (LE5) y 2 (LE2 y LE6), lo que implica que casi todas las especies altamente abundantes se detectaron en las estaciones evaluadas (Tabla 8).

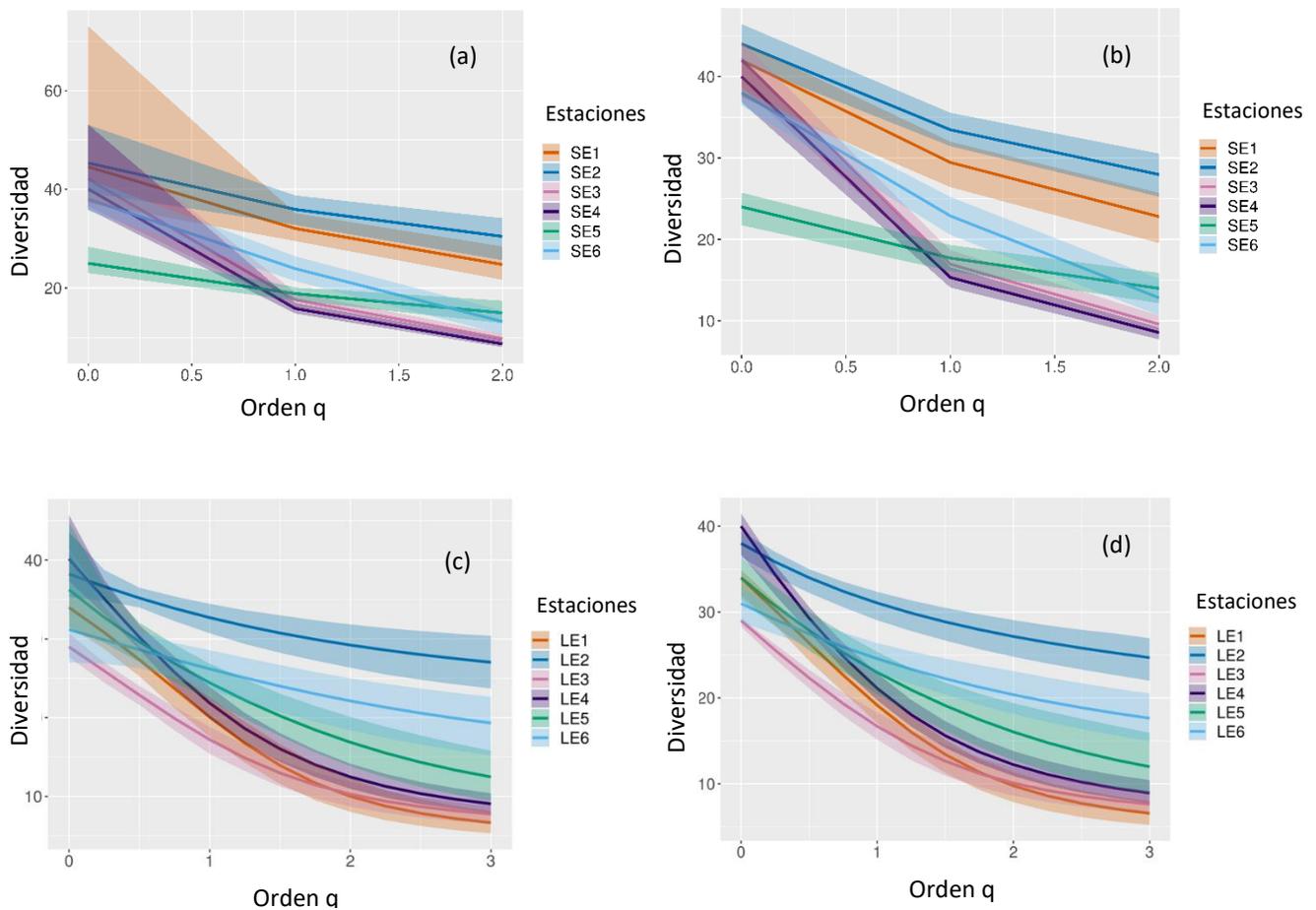


Figura 10. Perfiles de diversidad asintótica, para las dos épocas evaluadas (S: Seca (a y b) y L: Lluviosa (c y d)) y las localidades evaluadas (E1 a E6). Órdenes $q=0, 1, 2$, corresponden a la riqueza, Shannon y Simpson, respectivamente. (a y c) Perfiles de las muestras/estimados, (b y d) perfiles observados/empíricos. Las líneas relacionan los perfiles de diversidad estimada para los diferentes órdenes q y las bandas relacionan a los límites de confianza inferior y superior de cada época, proyectados por permutaciones de Monte Carlo.

c. Curvas de interpolación y extrapolación por rarefacción.

Para el método de abundancia la diversidad valorada con el orden $q=0$ (riqueza de especies), logra estabilizarse en el doble del tamaño extrapolado en todas las estaciones evaluadas durante época seca y lluvia, lo que implica que la estimación de diversidad asintótica para esta medida funciona satisfactoriamente para inferir Diversidades verdaderas que incluyen a la abundancia (Figura 11 a, b). El porcentaje de diversidad obtenida en los tres órdenes de diversidad está por encima del 92%, lo cual demuestra la buena representación de las especies encontradas, en las diferentes estaciones (Tabla 8).

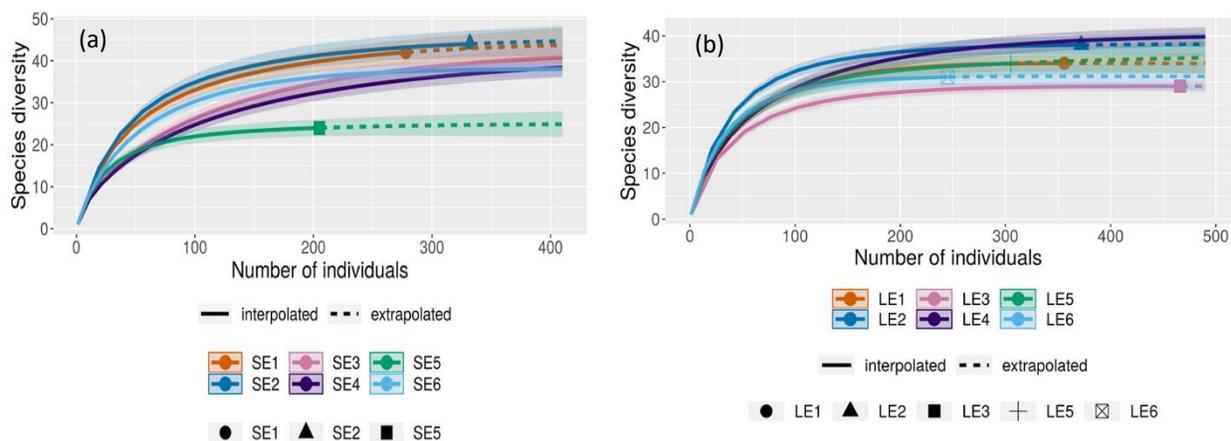


Figura 11. Curvas de diversidad interpolada (líneas sólidas) y extrapoladas (líneas punteadas), para valorar la relación entre la abundancia requerida (eje x), para estimar una diversidad óptima (asíntota o estabilidad de las curvas extrapoladas), en las épocas evaluadas (a) Seca y (b) Lluviosa. Las bandas alrededor de las curvas

representan a los límites de confianza por encima y por debajo de las curvas de cada época.

d. Curvas de interpolación y extrapolación basadas en la cobertura de las muestras.

Las coberturas de las muestras de cada época y estaciones evaluadas, son suficientemente altas (Figura 12) y están entre el 94 y el 100% (Tabla 8). Lo anterior indica que se pueden realizar pruebas de inferencia y significancia hasta un valor de cobertura estandarizado de $C_{max} = 94\%$ (la cobertura mínima de dos muestras extrapoladas para duplicar el tamaño de la muestra de referencia).

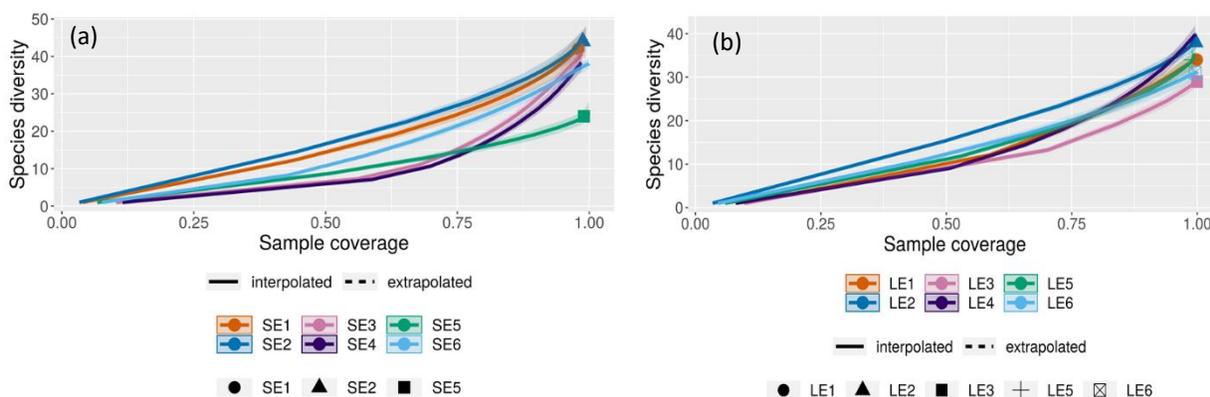


Figura 12. Cobertura de las muestras tomadas en dos épocas (S: Seca y L: Lluviosa) y en las diferentes estaciones de la ciénaga Sevillano (E1 a E6). Las bandas alrededor de las curvas de coberturas representan a los límites de confianza por encima y por debajo de estas. (a) época seca, (b) época lluviosa.

Diversidad Beta entre épocas climáticas

Escalamiento Multidimensional No Métrico (nMDS)

Para caracterizar la composición fitoplanctónica con relación a las épocas climáticas se realizó un Escalamiento Multidimensional No Métrico (nMDS) basado en los 81 taxones de fitoplancton evaluados. La distancia empleada para este análisis es la Euclídeana, que, para este caso presentó un mejor ajuste que la recomendada Bray Curtis. El ajuste de la ordenación se determinó con el valor de estrés del nMDS, el cual fue de 0.18 (18%), que corresponde a una buena configuración del análisis (por debajo de 0.2).

El nMDS muestra solapamiento entre los grupos representados por la época lluviosa (L) y seca (S), que probablemente afecte las diferencias evaluadas en la composición y abundancia de los taxones de cada evento climático (Figura 13).

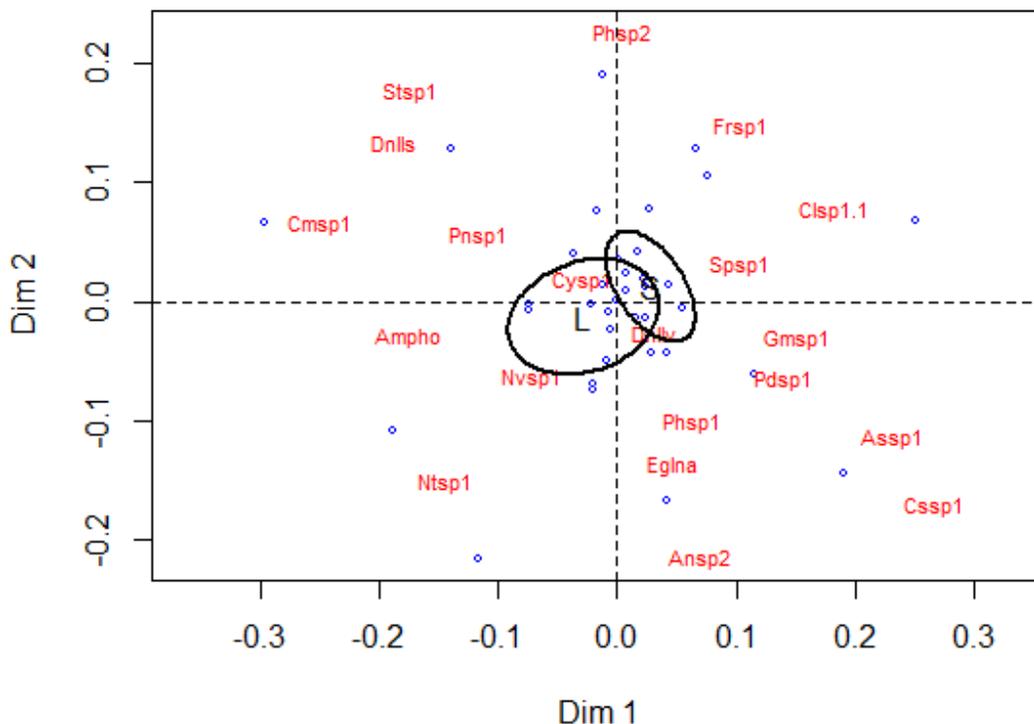


Figura 13. Ordenación de las estaciones (puntos azules), con relación a la composición y abundancia de los 81 taxones de fitoplancton. Dim 1 y Dim 2, corresponden a los ejes sintéticos del escalamiento. Las elipses corresponden al



comparativo de grupos representados por los errores estándar de los periodos seco (S) y Lluvioso (L), con límites de confianza del 95%.

Prueba de hipótesis

Se realizó un análisis de varianza multivariado, basado en permutaciones (npMANOVA), utilizando la matriz de distancia euclideana, con el objetivo de probar las siguientes hipótesis nulas:

H₀₁. No hay diferencias en los periodos seco y lluvioso, basado en la abundancia y composición de los 81 taxones de fitoplancton.

H₀₂. No hay diferencias entre las localidades, basado en la abundancia y composición de los 81 taxones de fitoplancton.

H₀₃. No hay diferencias entre los muestreos, basado en la abundancia y composición de los 81 taxones de fitoplancton.

La prueba de hipótesis dio como resultado que no se presentan diferencias en la composición y abundancia del fitoplancton entre estaciones, pero si entre periodos climáticos (Seudo $F= 2.87$; g.l.= 2.086; valor $p= 0.0009$) y entre muestreos (Seudo $F= 2.87$; g.l.= 1, 652; valor $p= 0.006$).

Dendrogramas de similitud entre estaciones y épocas climáticas

Permitió caracterizar a las estaciones y los periodos climáticos, basado en la composición y abundancia de los 81 taxones de fitoplancton.

La distancia utilizada es la Bray Curtis, apropiada para datos de abundancia y el método de agrupamiento empleado es el UPGMA, con una correlación cofenética de 0.81 (81%), que garantiza un buen ajuste o buena configuración de la ordenación. Con el método de amplitud de silueta, propuesto por Legendre y Legendre (1998), se generaron 3 grupos: el primer grupo caracterizado por las estaciones evaluadas en época lluviosa, el segundo grupo, por las estaciones de época seca, excepto la SE4, que representa el tercer grupo clasificado (Figura 14).

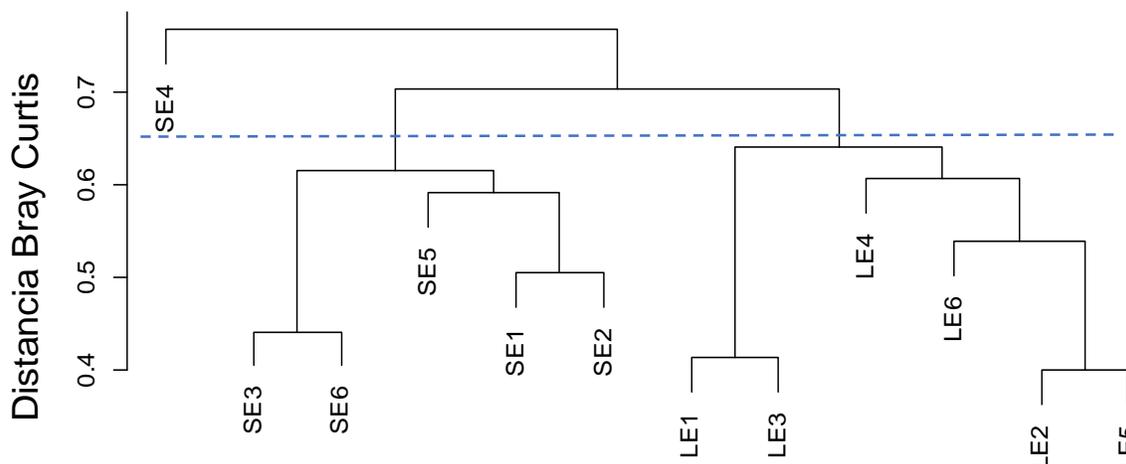


Figura 14. Clasificación de las estaciones (E1 a E6), por cada periodo climático (S: Seco, L: Lluvioso), con relación a la abundancia de los 81 taxones de fitoplancton. La línea punteada representa a los tres grupos generados.

Grupos Funcionales Basados en Morfología (GFBM)

Rasgos funcionales definitorios y distribución ambiental de los GFBM

La figura 15 (mapa de calor) permite seleccionar a los grupos funcionales que mejor clasifican a las estaciones por cada periodo climático. La distancia utilizada es la Euclídeana, que, para este caso particular, fue apropiada para datos de abundancia. Se realizó el dendrograma mediante el método de agrupamiento UPGMA. Los grupos funcionales (GFBM) que mejor clasifican a las estaciones y periodos climáticos fueron VI, VII y III.

En relación con la clasificación morfofuncional, se encontraron cinco de los siete grupos (GFBM III-VII) descritos por Kruk *et al.* (2010), los grupos I y II no se reportaron para ninguna de las estaciones evaluadas. Las principales variaciones se observaron a nivel temporal, sin embargo, para todas las estaciones se presenta con la marcada dominancia del grupo VI (Figura 15).

El grupo III (grandes filamentos con aerótopos) incluyó grandes filamentos de cyanobacterias con aerótopos y heterocitos, fue uno de los grupos más



representativos en la mayoría de las estaciones, dominó la estación cuatro tanto en época seca como lluviosa (SE4 y LE4), sin embargo, no se registró en las estaciones SE5, SE6, LE5 y LE6 (Figura 15).

Los organismos del grupo IV (tamaño medio y ausencia de rasgos especializados) se caracterizaron por su pequeño tamaño, su elevada relación superficie-volumen y su reducida dimensión lineal máxima. Este grupo, junto con el grupo V presentó las menores abundancias, estuvo presente en LE1, SE1 y LE3 (Figura 15).

El grupo V (flagelados unicelulares de tamaño medio a grande) incluyó organismos de tamaño mediano con baja relación superficie-volumen, estuvo presente con abundancias muy bajas en las dos épocas, los valores más altos de abundancia se registraron en SE4 (Figura 15).

Los integrantes del grupo VI (organismos no flagelados y con exoesqueletos de sílice: diatomeas) presentaron grandes tamaños con valores relativamente bajos de la relación superficie volumen, este grupo fue el más representativo y recurrente, se observó frecuente en todos los muestreos (sequía y lluvia) y estaciones, adicionalmente, dominó la estación LE3 durante la época de lluvias en donde registra los mayores valores de abundancia del estudio (Figura 15).

Finalmente, el grupo VII (colonias mucilaginosas con los lípidos y aerótopos) incluyó organismos que se caracterizaron por poseer órganos para regular la flotación, presencia de mucílago y gran volumen. Fue de los grupos más representativos y recurrente, especialmente durante la época seca en donde presentaron las mayores abundancias en las estaciones SE3 y SE6; mientras que durante la época de lluvias los valores de abundancia fueron muy bajos (Figura 15).

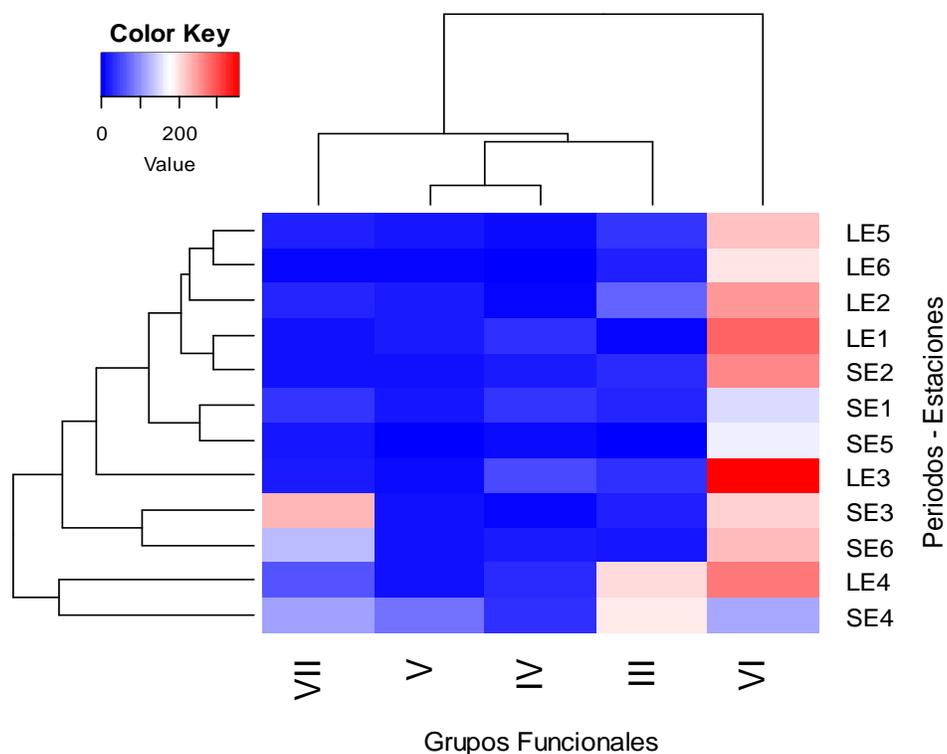


Figura 15. Mapa de calor con la caracterización de las estaciones (E1 a E6), por cada periodo climático (S: Seco, L: Lluvioso), con relación a los Grupos Funcionales de fitoplancton (III a VII). La intensidad del color rojo representa el peso o la importancia de cada grupo funcional para la caracterización de las estaciones.

De forma complementaria la caracterización de las estaciones por periodo climático y grupos funcionales se realizó mediante un análisis de redundancias (RDA) que evidenció un gradiente unimodal (línea punteada de la figura 16), en donde las estaciones SE3 y SE6, fueron caracterizadas el grupo VII. Las estaciones SE4 y LE4 estuvieron caracterizadas por el grupo III, las estaciones SE1, LE1 y LE5 se relacionaron con los grupos V y IV y la estación LE1, con el grupo VI. El resto de las estaciones no presentaron tendencias espaciotemporales importantes (Figura 16).

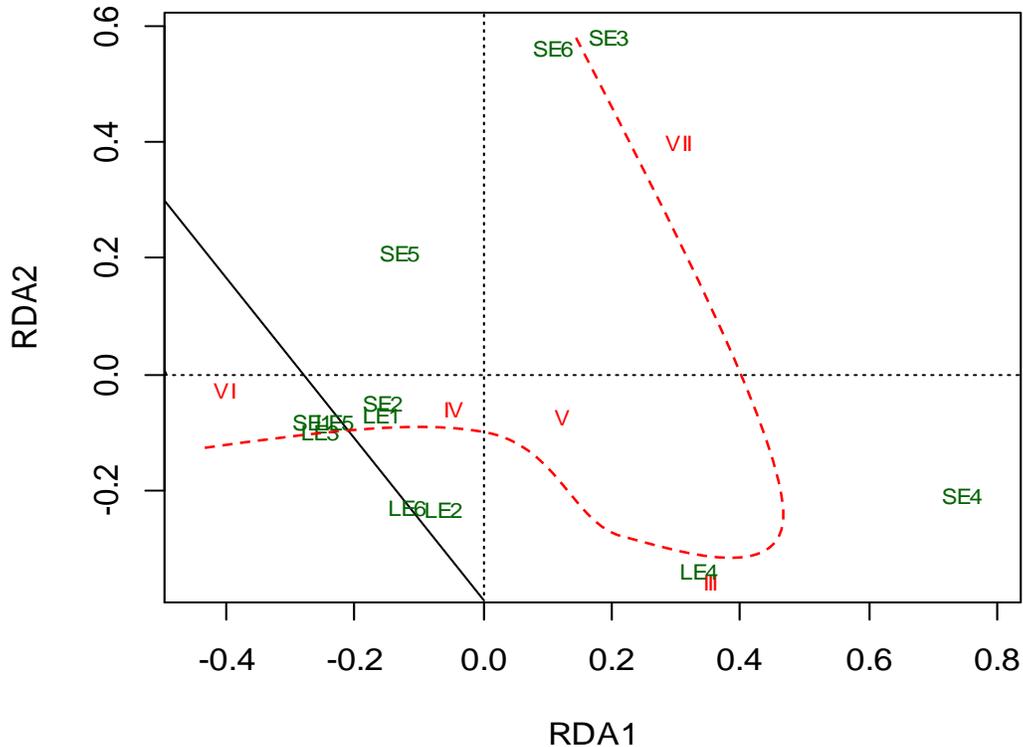


Figura 16. Caracterización de las estaciones (E1 a E6), por cada periodo climático (S: Seco, L: Lluvioso), con relación a los grupos funcionales de fitoplancton. La línea punteada corresponde a un gradiente unimodal que se presenta en la relación presentada.

Relación entre los GFBM y las variables ambientales

De acuerdo con el resultado del BIOENV las variables fisicoquímicas que mejor se correlacionan con los grupos funcionales, son la Salinidad y el fósforo total (PO_3), con una correlación de 0.70 (70%).

Adicionalmente, se realizó un Análisis de Redundancia (RDA, técnica de ordenación canónica) que permitió relacionar de manera lineal a las variables ambientales con la distribución espacial y temporal de los grupos funcionales de fitoplancton (GFBM). Los grupos fueron linealizados con la transformación de Hellinger, de acuerdo con la propuesta de Legendre y Gallagher (2001). El ajuste de la relación medido (1) con la inercia no restringida, fue de 0.91 (91%) y (2) con la varianza acumulada en

los dos primeros ejes canónicos (RDA1 y RDA2) fue de 0.87 (87%). Lo cual garantiza un excelente rendimiento del análisis.

El RDA mostró un gradiente unimodal (línea punteada de la Figura 17), en donde las estaciones SE3 y SE6, estuvieron caracterizadas por el grupo VII y por altos niveles de SST. La estación 4 tanto en lluvia como en sequía (LE4 y SE4) fue caracterizada por el grupo III. La estación SE4 presentó una relación positiva con PO_3 y PO_4 e inversa con el pH, LE4 se relacionó con altos niveles de TDS y de Conductividad. Las estaciones SE1, SE2, LE1 y LE5 se relacionaron con los grupos IV y VI sin presentar tendencias fisicoquímicas importantes, la estación SE5 se caracterizó por altos niveles de pH (

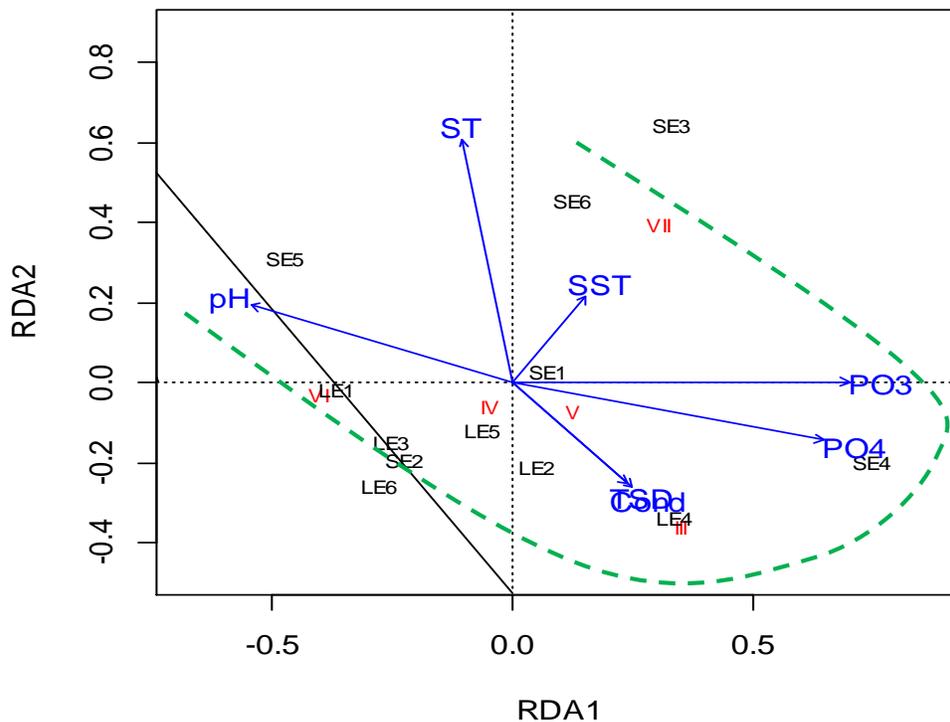


Figura 17).

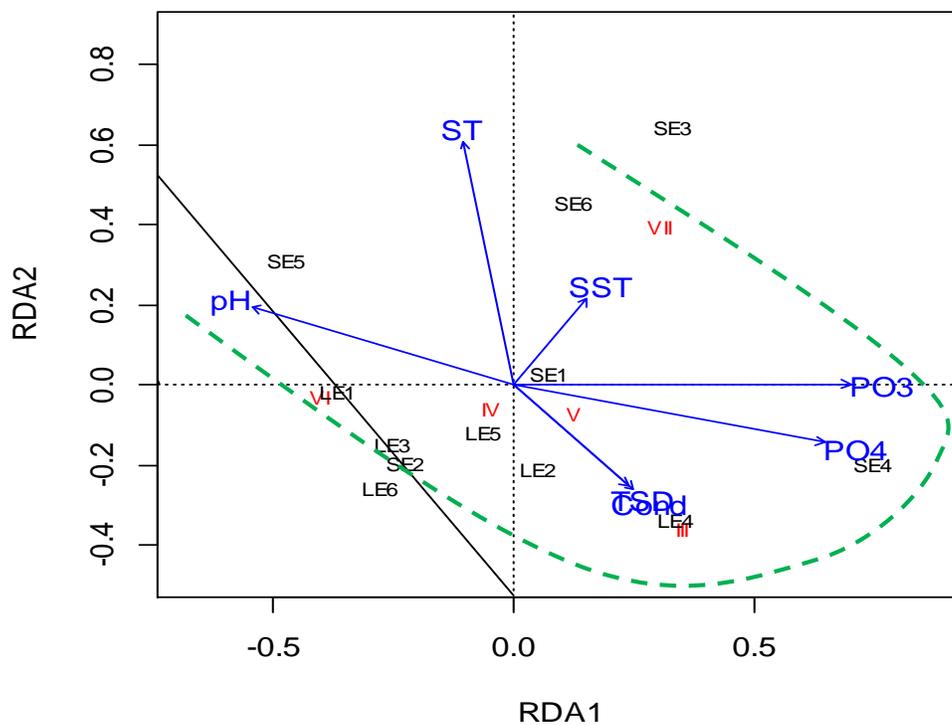


Figura 17. Caracterización de las estaciones (E1 a E6), por cada periodo climático (S: Seco, L: Lluvioso), con relación a las variables fisicoquímicas evaluadas (vectores) y a los grupos funcionales de fitoplancton (números romanos). La línea punteada corresponde a un gradiente unimodal que se presenta en la relación presentada.



Discusión

Diversidad Alfa

La presencia de 81 morfoespecies fitoplanctónicas en la ciénaga Sevillano representa un número elevado si se considera que el último informe de monitoreo del Invemar (2019) para la CGSM registra solo 48 morfoespecies, especialmente si se tiene en cuenta el área que abarca dicho monitoreo, el cual es mucho mayor que la que se refiere a este trabajo.

El perfil de completitud de la muestra estimado demuestra que se detectaron casi todas las especies tanto abundantes como altamente abundantes, adicionalmente los datos cubren como mínimo el 93% de la riqueza esperada en la comunidad, por lo cual el inventario obtenido es completo, indicando que el protocolo de muestreo fue bastante eficiente tanto para los datos por épocas climáticas como por estaciones (Chao & Jost, 2015; Chao *et al.*, 2020).

Las diatomeas fueron el grupo de mayor riqueza concordando con los resultados registrados por Invemar (2019) para la CGSM, en el cual las diatomeas fueron dominantes especialmente durante la época seca ya que algunas cianofíceas, algas conjugadas (Zagnematophyceaea) y clorofíceas se ven perjudicadas por la disminución en la entrada de agua dulce (Hernández, 2017; Invemar, 2019), adicionalmente, las diatomeas presentan adaptaciones fisiológicas y morfológicas las cuales van desde la formación de mucilago hasta el desarrollo de ganchos que les facilitan la adherencia, de esta manera obtienen mayor resistencia que otros grupos (Reynolds, 2006; Kruk *et al.*, 2010) lo cual les permitió prosperar dadas las condiciones presentes en la ciénaga Sevillano.

Del grupo de las diatomeas los géneros *Caloneis*, *Coscinodiscus*, *Melosira* y *Navicula* fueron los más representativos, estos géneros han sido reportados como indicadores de contaminación por materia orgánica y tolerantes a contaminación por metales pesados, su dominancia podría indicar condiciones mesotróficas a Eutróficas en el cuerpo de agua, ya que comúnmente se les asocia este tipo de ambientes (Bicudo & Menezes, 2006; Bellinger & Sigee, 2010; Guiry & Guiry, 2021).



Dunaliella salina fue la especie de mayor representatividad de las clorofíceas, esta especie es indicadora de salinidad ya que puede crecer en medios hipersalinos, además, se considera de importancia comercial ya que se utiliza en la producción de biodiesel (Sugumar *et al.*, 2020) y su uso como fuente de proteína para humanos y fuente de nutrición animal está ampliamente documentado (Yixing Sui *et al.*, 2020).

Durante el periodo seco se registró la mayor abundancia y riqueza de especies; así mismo, se evidenció la especificidad en la distribución temporal de los organismos con 22 especies exclusivas del período seco y 6 del período lluvioso. Al respecto, Mihaljević *et al.* (2015) menciona que las condiciones bióticas y ambientales de los humedales están estrechamente ligadas a los períodos hidroclimáticos. Sin embargo, a pesar de las diferencias en la riqueza y abundancia de organismos en las épocas muestreadas, los valores de los estimadores de diversidad de Simpson y de Shannon fueron muy similares en ambas épocas climáticas (casi idénticos); estos estimadores se consideran sesgados de acuerdo con lo propuesto por Jost (2006), ya que no cumplen con el principio de replicación al comparar pares de comunidades, es decir, se pueden dar casos en los que pese a que la riqueza aumenta los estimadores se mantienen en un valor determinado, por lo cual, no son útiles en estudios de impactos a comunidades.

Las especies *Coscinodiscus* sp1, *Cymbella* sp1, *Navicula* sp1, *Pinnularia* sp1 y *Euglena* sp1 se registraron en las seis estaciones durante las dos épocas, de este grupo las Euglenas fueron especialmente abundantes en aguas de la zona norte (estaciones SE4, LE4 y LE5), relacionándose claramente con el vertimiento permanente de aguas residuales domésticas que se hace desde de la cabecera del municipio de Ciénaga a través de las lagunas de oxidación ubicadas en la zona.

En los ecosistemas acuáticos costeros tropicales, el ingreso permanente de aguas residuales genera altas concentraciones de nutrientes y alteraciones que determinan la composición de la flora acuática (Aranda-Cirerol, 2004; Anderson *et al.*, 2002), ya que existen organismos que se adaptan a distintas proporciones de nutrientes (Cloern, 2001; Smayda, 2005). Las Euglenophytas son muy abundantes en aguas cargadas de materia orgánica, algunas de estas especies se encuentran



adaptadas a alimentarse en el sedimento en ausencia de luz, además son buenos indicadores de contaminación por materia orgánica, siendo este grupo muy abundante en aguas residuales domésticas (Redondo *et al.*, 2005; Valente & Gomes, 2007; Romero, 2010).

Diversidad Beta

El dendrograma de similitud (Figura 14) muestra tres grupos, el primero caracterizado por las estaciones evaluadas en época lluviosa, el segundo grupo, por las estaciones de época seca, excepto la SE4, la cual representa el tercer grupo. Esto demuestra que el patrón de distribución espacio temporal del fitoplancton es distinto dependiendo de la época en la que se encuentre, evidenciando la importancia del régimen de precipitaciones en los ecosistemas acuáticos tropicales (Bouvy *et al.*, 2006).

Grupos funcionales basados en morfología

La riqueza de grupos funcionales registrada en la ciénaga Sevillano fue menor que la observada por otros autores como Santos *et al.*, (2014) y Mihaljevi *et al.*, (2015) quienes reportaron siete grupos o Hernández *et al.*, (2020) los cuales reportaron seis. En este trabajo se reportan cinco grupos (Figura 15), lo cual puede estar relacionado con el tipo de ecosistema ya que los estudios mencionados anteriormente se realizaron en lagos en climas templados en la región andina y otros en ecosistemas lenticos en climas tropicales en la región amazónica y en el caribe sin influencia directa o indirecta de agua marina. En este estudio las condiciones son propias de un humedal tropical costero con influencia tanto de aguas con elevada salinidad como aguas dulces, por lo tanto, implicó una diferencia sustancial entre las características físicas y químicas en comparación con los cuerpos de agua de los estudios mencionados.



En general, los grupos morfológicos encontrados en la ciénaga Sevillano indican que este ecosistema es relativamente estable, con tendencia a la eutrofia y con exceso de nutrientes en algunas zonas, que pueden modificar la composición de la comunidad algal. Se registraron cinco de los siete grupos (III, IV, V, VI y VII) descritos por Kruk *et al.* (2010).

La nula presencia de los grupos I y II, y las bajas abundancias de los grupos IV y V evidencian el efecto que tiene la turbiedad del agua y el exceso de materia orgánica del humedal sobre las adecuaciones morfológicas del fitoplancton, pues estos grupos necesitan altas transparencias para su desarrollo y se ven favorecidos por condiciones oligotróficas a mesotróficas (Kruk & Segura 2012; Izaguirre *et al.*, 2012; Zabala *et al.*, 2019), las cuales no fueron notorias en el área de estudio.

El grupo III dominó la estación 4 en ambas épocas, los aportes más importantes a este grupo los realizaron los géneros *Oscillatoria*, *Anabaena* y *Limnothrix*. Los organismos filamentosos de este grupo constituyen formas de adaptación interesantes en los humedales costeros tropicales, ya que presentan una alta relación superficie-volumen la cual les confiere una mayor tolerancia a condiciones limitantes de luz especialmente en ambientes someros y con elevados niveles de turbiedad como el de la ciénaga Sevillano (Naselli-Flores *et al.*, 2007). A su vez, la presencia de aerótopos les permite mantener una baja tasa de sedimentación, facilitando el acceso a los recursos dependiendo de su disponibilidad en la columna de agua (Ferber *et al.*, 2004). Este grupo se ha reportado dominante en ecosistemas eutróficos y someros de regiones tropicales (Bortolini *et al.*, 2016; Amorim *et al.*, 2019), debido a que responde rápidamente al estrés generado por variaciones ambientales (Hernández *et al.*, 2008; Zabala *et al.*, 2019), las cuales para el caso de la ciénaga Sevillano corresponden a las perturbaciones antrópicas permanentes por el ingreso de aguas residuales que son vertidas en la E4.

Adicionalmente, se ha registrado que estos organismos son potencialmente tóxicos debido a la producción de metabolitos secundarios (Dow & Swoboda, 2000; Kruk, 2010), los géneros *Anabaena*, *Limnothrix* y *Oscillatoria* reportados en este trabajo han sido comúnmente registrados en eventos de envenenamiento en diferentes



partes del mundo, en el ámbito rural ha sido comprobada la intoxicación de animales domésticos, ganado, aves y otros animales silvestres, coincidiendo con floraciones algales tóxicas de estos géneros (Pizzolon, 1996; Pérez *et al.*, 2016).

El grupo VI (solo diatomeas) incluyó organismos sin teca, con una relación superficie/volumen baja, estuvo constituido en su mayoría por diatomeas unicelulares, los principales aportes a este grupo lo hicieron los géneros *Coscinodiscus*, *Navicula* y *Pinnularia*. Este grupo fue el más representativo y recurrente, se observó frecuente en todos los muestreos tanto en lluvia como sequía y estuvo presente en todas las estaciones, la presencia de un esqueleto de sílice y la falta de motilidad hace que este grupo presente alta tasa de sedimentación (Kruk *et al.*, 2010), por esta razón se ven favorecidos en ambientes someros y turbulentos donde se pueden resuspender y permanecer en la zona eufótica por periodos más prolongados de tiempo. Las diatomeas son comunes en aguas costeras con baja profundidad (Reynolds, 2006), estos organismos pueden alcanzar grandes biomásas, sin embargo, no representan una amenaza para los diferentes usos del agua en los ecosistemas acuáticos (Reynolds, 2006; Kruk *et al.*, 2010).

El grupo VII, conformado por colonias mucilaginosas, que facilitan la flotabilidad, previenen la sedimentación y pastoreo (Reynolds, 2007), fue el de mayor representatividad en el estudio, dominó la mayoría de las estaciones especialmente durante la época seca, estuvo representado por grandes colonias algunas con aerótopos (*Microcystis* y *Chroococcus*), al respecto Hernández *et al.* (2020) también reportaron la presencia de este grupo en ecosistemas del caribe representado fundamentalmente por grandes colonias con aerótopos de *Microcystis*. La dominancia de este grupo probablemente se deba a la presencia de rasgos especializados como el mucilago y los aerótopos que le permiten tener una ventaja con relación a otros organismos planctónicos, a su vez el ambiente en esta ciénaga proporciona una fuente de nutrientes considerable, y muchos de los organismos pertenecientes a este grupo indican condiciones de eutrofia (Kruk *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2020).



Relación de las variables ambientales con los GFBM

El RDA mostró que en las estaciones SE3 y SE6 las variables SST y NH_4 tuvieron mayor peso y el grupo más representativo fue el VII. Hernández *et al.* (2020) y Muñoz *et al.* (2017) reportan la dominancia de este grupo en ambientes con moderada concentración de nutrientes; Nogueira (2011) reporta para el río de la Plata un comportamiento diferente en donde el NH_4 se relaciona negativamente con todos los grupos morfológicos, sin embargo, nuestros resultados confirman la capacidad que tienen los organismos del grupo VII para dominar ambientes con altos niveles de nutrientes (Kruk *et al.*, 2010).

En la estación 4 el PO_3 , el PO_4 y la conductividad se relacionaron positivamente con el grupo III, mientras que el pH y la salinidad se relacionaron negativamente con este mismo grupo. La salinidad es fundamental en ambientes estuarinos debido a que determina gradientes ambientales opuestos de luz y nutrientes facilitando la sedimentación de las partículas suspendidas lo que permite mayor disponibilidad de luz a la vez que disminuye los niveles de nutrientes (Calliari *et al.*, 2005), sin embargo, algunos miembros de este grupo pueden fijar nitrógeno con lo cual pueden mejorar su resistencia a niveles bajos de nutrientes (Naselli & Barone, 2007; Kruk, 2010). La relación negativa con la salinidad simplemente obedece a las condiciones puntuales de las estaciones muestreadas, puesto que en la estación 4 nutrientes como el NO_2 y variables como la conductividad permitieron organismos de este grupo se vieran favorecidos con altas abundancias de un pequeño número de especies. El resto de GFBM no presentó tendencias con las variables ambientales estudiadas.

Los resultados de las relaciones entre las variables ambientales y los GFBM indican que los grupos propuestos por la clasificación de Kruk *et al.* (2010) presentan ventajas como instrumento para el estudio del fitoplancton, debido a que permiten explicar las diferencias morfológicas de los organismos como una respuesta al ambiente en el que se encuentran.



Conclusiones

En este estudio se observaron cambios notables en la composición del fitoplancton de un humedal de la época seca a la época de lluvias, sin embargo, no fueron tan notorias las diferencias en torno a la composición fitoplanctónica de las estaciones evaluadas, a excepción de la estación 4 la cual presentó diferencias tanto en abundancias como en composición, esto como consecuencia a la permanente entrada de aguas servidas que modifican las características fisicoquímicas y por consiguiente la biota de esta zona.

Las clases dominantes fueron Bacillariophyceae, Chlorophyceae y Cyanophyceae con la presencia de especies que indican condiciones de eutrofia en la ciénaga Sevillano, estas especies corresponden a taxones específicos de aguas con elevada concentración de nutrientes. Por lo tanto, este humedal requiere un manejo que permita que sus características fisicoquímicas y biológicas mejoren las condiciones que actualmente presenta.

La presencia de los diferentes GFBM del fitoplancton muestra aspectos relevantes que reflejan el cambio de las condiciones de la ciénaga Sevillano durante las épocas climáticas y las estaciones evaluadas. El principal aspecto está asociado a la variación de las estrategias morfológicas relacionadas específicamente con el cambio de la predominancia del GFBM VI al III, que evidencia una adecuación de organismos no flagelados y con exoesqueletos de sílice a formas filamentosas.

Finalmente, se hace necesario el establecimiento de monitoreos que ayuden a predecir la respuesta de los grupos fitoplanctónicos en ambientes con diferentes tensores ambientales, así como las diferentes problemáticas de riesgo que asociadas a estos organismos, ya que debido a la presencia de diferentes especies potencialmente tóxicas del fitoplancton registradas en este humedal, es importante desarrollar un programa que permita el seguimiento de estas especies y las variables en las que se presentan.



Referencias

Aguilera-Díaz, M. M. 2011. Habitantes del agua: El complejo lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana; No. 144.

American Water Works Association (AWWA). 2012. WEF 2012. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 22.

Amorim, C. A., Valença, C. R., de Moura-Falcão, R. H. & do Nascimento Moura, A. (2019). Seasonal variations of morphofunctional phytoplankton groups influence the top-down control of a cladoceran in a tropical hypereutrophic lake. *Aquatic Ecology*, 8, 1-12.

Andersen, J. H., L. Schlüter & G. Ærtebjerg. 2006. Coastal eutrophication: Recent developments in definitions and implications for monitoring strategies. *Journal of Plankton Research*, 28: 621-628.

Anderson, D. M., P. M. Glibert y J. M. Burkholder. 2002. Harmful Algal Blooms and Eutrophication: Nutrient Sources, Composition, and Consequences. *Estuaries*, 25(4b): 704-726.

Apha, A. W. W. A. (2012). WEF. 2012. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 22.

Aranda-Cirerol, N. 2004. Eutrofización y calidad el agua de una zona costera tropical. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona, España. 230 p.

Arrigo, K. 2005. Marine microorganisms and global nutrient cycles. *Nature*, 437, pp. 349-355.

Ayala Rodríguez, G. A. 2008. *Grupos funcionales del fitoplancton y estado trófico del Sistema Laguna Topolobampo-Ohuira-Santa María* (Doctoral dissertation, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas).

Bellinger, E. y D. Sigeo. 2010. *Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators*. 1st ed. Editorial John Wiley y Sons. 244 p.



Bernal, G. 1996. Caracterización geomorfológica de la llanura deltaica del río Magdalena con énfasis en el sistema lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia Bol. Investig. Mar. Cost. vol.25 no.1 Santa Marta.

Bicudo M. C. y M. Menezes. 2006. Gêneros de Algas de Águas Continentais do Brasil. Chave para identificação e descrições. Rima. Segunda edición. São Carlos. 502 p.

Biggs B. J. F, Stevenson R. J., Lowe R. L. 1998. A hábitat matrix conceptual model for stream periphyton. Archiv fur Hydrobiologie 143:21–56.

Bonilla, S., Villeneuve, V., Vincent W.F. (2005). Benthic and planktonic algal communities in a high Arctic lake: Pigment structure and contrasting responses to nutrient enrichment. Journal of Phycology. 41: 1120-1130.

Borcard D., Filleul F. & Legendre P. 2011. Numerical Ecology with R. Springer. 306 p.

Borcard, Daniel, François Gillet y Pierre Legendre. Ecología numérica con R. Springer, 2018.

Borics, G., Várbíró, G., Grigorszky, I., Krasznai, E., Szabó, S., Kiss, K. (2007). A new evaluation technique of potamo-plankton for the assessment of the ecological status of rivers. Archiv für Hydrobiologie (Supplement). 161: 465-486.

Bortolini, J. C., Moresco, G. A., De Paula, A. C. M., Jati, S. & Rodrigues, L. C. (2016). Functional approach based on morphology as a model of phytoplankton variability in a subtropical floodplain lake: a long-term study. Hydrobiologia, 767(1), 151 - 163.

Bouvy, M., N. Ba, S. Ka, S. Sane, M. Pagano y R. Arfi. 2006. Phytoplankton community structure and species assemblage succession in a shallow tropical lake (Lake Guiers, Senegal). Aquatic Microbial Ecology 45 (2): 147-161.

Briggs, M. R. P. y S. J. Funge-Smith. 1994. A nutrient budget of some intensive marine shrimp ponds in Thailand. Aquaculture and fisheries management, 25:789-811.



Calliari, D., Gómez, M. y Gómez, N. (2005). Biomasa y composición del fitoplancton en el Río de la Plata: distribución a gran escala y relación con variables ambientales durante un crucero primaveral. *Investigación de la plataforma continental*, 25 (2), 197-210.

Chao, A. and Jost, L. 2015. Estimating diversity and entropy profiles via discovery rates of new species. *Methods in Ecology and Evolution*, 6, 873-882.

Chao, A., Kubota, Y., Zelený, D., Chiu, C. H., Li, C. F., Kusumoto, B., ... & Colwell, R. K. 2020. Quantifying sample completeness and comparing diversities among assemblages. *Ecological Research*, 35(2), 292-314.

Cloern, J. E. 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210: 223-253.

CORPAMAG. 2009. "Ecosistema Ciénaga Grande de Santa Marta", Corporación Autónoma Regional del Magdalena-Corpomag, www.corpamag.gov.co.

Costa, J. L., H. Massone, D. Martínez, E. Suero, C. M. Vidal & F. Bedmar. 2002. Nitrate contamination of a rural aquifer and accumulation in the unsaturated zone. *Agric. Water Management*, 57:33-47.

Cronberg, G., y H. Annodotter. 2006. Manual on aquatic cyanobacteria: A photo guide and synopsis of their toxicology. Denmark International Society for the Study of Harmful Algae and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 105p.

De la Fuente M. J. (Ed). 2004. Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la Directiva Marco del Agua en la Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de Medio Ambiente de España. 234 p.

De la Lanza Espino, G., y Aguirre, S. G. 1999. Físicoquímica del agua y cosecha de fitoplancton en una laguna costera tropical. *CIENCIA ergo-sum*, 6(2), 147-153.

Dow C, Swoboda U. 2000. Cyanotoxins. Pages 613-632 in Whitton BA, Potts M, eds. *Ecology of cyanobacteria. Their diversity in time and space*. The Netherlands.



Edler, L., y Elbrächter, M. 2010. The Utermöhl method for quantitative phytoplankton analysis. *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis*, 110.

Escobedo Urias, D. C. 2010. *Diagnóstico y descripción del proceso de eutrofización en lagunas costeras del norte de Sinaloa* (Doctoral dissertation, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas).

Falkowski P, Katz M, Knoll A, Quigg A, Raven J, Schofield O, Taylor F. 2004. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. *Science* 305: 354-360.

Ferber L, Levine S, Lini A, Livingston G. 2004. Do cyanobacteria dominate in eutrophic lakes because they fix atmospheric nitrogen? *Freshwater Biology* 49: 690-708.

Field C, Behrenfeld M, Randerson J, Falkowski P. 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science* 281: 237-240.

Finkel Z. 2001. Light absorption and size scaling of light-limited metabolism in marine diatoms. *Limnology & Oceanography* 46: 86-94.

Garay, J., J. Restrepo, O. Casas, O. Solano y F. Newmark. (Eds.). 2004. Los manglares de la ecorregión Ciénaga Grande de Santa Marta: pasado, presente y futuro. INVEMAR. Serie de publicaciones especiales. No. 11. Santa Marta. 236 p.

Golicher, D. Cómo cuantificar la diversidad de especies. {en línea}. 2010. {22 de abril de 2016}. Disponible en: (http://www.dfpd.edu.uy/ceerp/ceerp_norte/cn/Biologia/BIODIV/Como%20cuantificar%20la%20diversidad,%20algunos%20ejercicios.pdf).

Guiry, MD & Guiry, GM 2021. AlgaeBase. Publicación electrónica mundial, Universidad Nacional de Irlanda, Galway. <https://www.algaebase.org>; buscado el 25 de enero de 2021.

Hernández, E., Aguirre, N. J., Palacio, J. A. & Ramírez, J. J. 2008. Variación espacio temporal de la asociación fitoplanctónica en diferentes momentos del pulso



hidrológico en la ciénaga de Ayapel (Córdoba), Colombia. *Actualidades Biológicas*, 30(88), 67–81.

Hernández, E., Aguirre, N., Palacio, K., Palacio, J., Ramírez, J. J., Duque, S. R., & Kruk, C. 2020. Clasificación de grupos morfofuncionales del fitoplancton en seis sistemas lénticos de las regiones Caribe, Andina y Amazónica de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 392-406.

Hernández-Jiménez C.A. 2017. Efectos de la entrada de agua del río Magdalena en la producción primaria del fitoplancton en la ciénaga pajaral, Caribe colombiano. *Intropica* 12(2): 117-130. DOI: <http://dx.doi.org/10.21676/23897864.2315>.

Herrera-Silveira, J. A., Martín, M., & Díaz-Arce, V. 1999. Variaciones del fitoplancton en cuatro lagunas costeras del Estado de Yucatán, México. *Revista de Biología Tropical*, 47(1), 47-56.

Hsieh, T.C., Ma, K.H. & Chao, A. 2016 iNEXT: An R package for interpolation and extrapolation of species diversity (Hill numbers). To appear in *Methods in Ecology and Evolution*.

IGAC. Instituto Colombiano Agustín Codazzi. (2009). Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento del Magdalena. Escala 1:100000. Bogotá.

INVEMAR. 2016. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe Técnico Final 2015, Volumen 14. Santa Marta 181p. anexos.

INVEMAR. 2019. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe Técnico Final 2019, Volumen 18. Santa Marta 214 p + anexos.



Izaguirre, I., Allende, L., Escaray, R., Bustingorry, J., Pérez, G. & Tell, G. (2012). Comparison of morpho-functional phytoplankton classifications in human-impacted shallow lakes with different stable states. *Hydrobiologia*, 698(1), 203-216.

Jost, L. 2006. Entropy and diversity. *Oikos*, 113(2), 363-375.

Kjerfve, B. (Ed.). 1994. Coastal lagoon processes (Vol. 60). Elsevier.

Knoppers, B. & Kjerfve, B. (1999). Coastal lagoons of southeastern Brazil: physical and biogeochemical characteristics. In *Estuaries of South America* (pp. 35-66). Springer, Berlin, Heidelberg.

Kruk, C & Segura, A. M. 2012. The habitat template of phytoplankton morphology-based functional groups. *Hydrobiologia*. 698: 191-202.

Kruk, C., V. L. M. Huszar, E. T. Peeters, S. Bonilla, L. S. Costa, M. Lüring, C. Reynolds y M. Scheffer. 2010. A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton. *Freshw. Biol.* 55: 614–627.

Kruk, C.; Peeter, E. T. H. M.; Van Nes, E. H.; Huszar, V. L. M.; Costa, L. S.; & Scheffer, M. 2011. Phytoplankton community composition can be predicted best in terms of morphological groups. *Limnology and Oceanography*, 56, p. 1.

Legendre, P. (1998). Guía del usuario de regresión del Modelo II, edición R. R Vignette , 14 .

Litchman, E.; y Klausmaier, C. A. 2008. Trait-Based Community Ecology of Phytoplankton. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 39, pp. 615-39.

Loza A. 1994. El nanofitoplancton de las bahías de Vita y Jururú, Cuba. *Ciencias Biológicas*. (27): 90-106.

Mancera, P., Ernesto, J., Vidal, V., & Alfonso, L. 1994. Florecimiento de microalgas relacionado con mortandad masiva de peces en el complejo lagunar Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 23(1), 103-117.



Mihaljevic, M., Stevic, F., Spoljaric, D. & Zuna pfeiffer, T. (2015). Spatial pattern of phytoplankton based on the MorphologyBased Functional approach along a river floodplain gradient. *River Research and Applications*, 31(2), 228 - 238.

Mosquera, S. Nieto, O. & Tapia, C. 2015. Humedales para la gente: visiones desde lo local. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D.C., Colombia. 98 pp.

Muñoz-López, C. L., Aranguren-Riaño, N. J., Duque, S. R. (2017). Functional morphology of phytoplankton in a tropical high mountain lake: Tota Lake (Boyaca, Colombia). *Revista de Biología Tropical*. 65 (2): 669-683.

Naranjo, L. G. (1997). Humedales de Colombia. Ecosistemas amenazados. En: *Sabanas, Vegas y Palmares*. Universidad Javeriana - CIPAV.

Narvaez, S., Gomez, M., & Acosta, J. (2008). Coliformes termotolerantes en aguas de las poblaciones costeras y palafíticas de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 13(3).

Naselli-Flores L. & Barone R. (2007) Pluriannual morphological variability of phytoplankton in a highly productive Mediterranean reservoir (Lake Arancio, Southwestern Sicily). *Hydrobiologia*, 578, 87–95.

Naselli-Flores, L., Padisák, J. & Albay, M. (2007). Shape and size in phytoplankton ecology: Do they matter?. *Hydrobiologia*, 578(1), 157 - 161.

Nixon, S. W. 1995. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41:199–219.

Noble, P.A., R. G. Tymowski, M. Fletcher, J.T. Morris y A.J. Lewitus. 2003. Contrasting patterns of phytoplankton community pigment composition in two salt marsh estuaries in southeastern United States. *Applied and Environmental Microbiology* 69: 4129-4143.

Nogueira Traverso, L. (2011). Determinación de grupos morfofuncionales fitoplanctónicos en el Río de la Plata.



Oksanen, Jari y col. "Paquete R versión 2.4-2". Vegano: Paquete de Ecología Comunitaria <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (2017).

Pacheco, J. P., Iglesias, C., Meerhoff, M., Fosalba, C., Goyenola, G., Teixeira-de Mello, F., García, S., Gelós, M. & García Rodríguez, F. (2010). Phytoplankton community structure in five subtropical shallow lakes with different trophic status (Uruguay): a morphology-based approach. *Hydrobiologia*, 646(1), 187–197.

Pérez-Morales, A., Olivos-Ortiz, A., Quijano-Scheggia, S. I., Espinosa-Rodríguez, C. A. y Jiménez-Santos, M. A. 2016. Estado actual del estudio de cianobacterias dulceacuícolas formadoras de florecimientos en el centro de México. p. 408-421. En: García-Mendoza, E., Quijano-Scheggia, S. I., Olivos-Ortiz, A. y Núñez-Vázquez, E. J. (eds.). *Florecimientos Algales Nocivos en México*. Ensenada, México. CICESE. 438 pp.

Pielou, E. C. 1975. Shannon's formula as a measure of specific diversity—its use and disuse. *American Naturalist* 100: 463–465.

Pinilla, G. A., Duarte Coy, J., y Vega Mora, L. 2010. Índice de Estado Limnológico (IEL) para evaluar las condiciones ecológicas de las ciénagas del Canal del Dique, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 15(2).

Pizzolón, L. 1996. Importancia de las cianobacterias como factor de toxicidad en las aguas continentales. *Interciencia* 21(6): 239-245.

Pulido-López, P. C., & Pinilla-Agudelo, G. A. 2017. Evaluación del estado trófico de El Salitre, último humedal urbano de referencia en Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158), 41-50.

Qu, Y., Wu, N., Guse, B., Makarevičiūtė, K., Sun, X., Fohrer, N. (2019). Riverine phytoplankton functional groups response to multiple stressors variously depending on hydrological periods. *Ecological Indicators*. 101: 41-49.

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.



Ramírez J. 2000. Fitoplancton de agua dulce: aspectos ecológicos, taxonómicos y sanitarios. (Tesis de Maestría) Medellín: Universidad de Antioquia. p. 25.38.

Ramsar, C. (2013). Manual de la Convención Ramsar.

Rangel-Ch, J. O., & Arellano, H. 2010. Diversidad Biótica IX: Ciénagas de Córdoba. Biodiversidad, Ecología y Manejo ambiental. Rangel-Ch., JO (ed). Clima. Bogotá DC: Instituto de Ciencias Naturales.

Redondo, M. S., Conforti, V., Lionard, M., & Rojo, C. 2005. Las Euglenófitas en las Tablas de Daimiel como ejemplo de las limitaciones de los indicadores biológicos de la degradación ambiental. In *Anales del jardín botánico de Madrid* (Vol. 62, No. 2, pp. 163-179). Real Jardín Botánico.

Reynolds C. 2006. Ecology of phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press.

Reynolds C. 2007. Variability in the provision and function of mucilage in phytoplankton: facultative responses to the environment. *Hydrobiologia* 578: 37-45.

Reynolds, C.S. (1984). *The Ecology of Freshwater Phytoplankton*, Cambridge University Press, Cambridge. p. 46-71.

Romero, M. D. B. 2010. *Atlas de organismos planctónicos en los humedales de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.

Round F.E., R.M. Crawford y D.G. Mann. 1990. *The Diatoms. Biology and Morphology of the Genera*. Cambridge University Press. Cambridge. 747 p.

Santos AMC, Carneiro FM, Cianciaruso MV. Predicting productivity in tropical reservoirs: The roles of phytoplankton taxonomic and functional diversity. *Ecol Indic.* 2015;48:428-435. Doi:10.1016/j. ecolind.2014.08.033.

Secretaría de la Convención de Ramsar. 2016. Manual de la Convención de Ramsar: Introducción a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 5a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza.



Shannon, C. E. & W. Wiener. 1949. *The mathematical theory of communication*. Univ. Illinois Press, Urbana, USA. 117 p.

Simpson, E. H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* 163: 689–698.

Smayda, T. J. 2005. Eutrophication and phytoplankton, 89-96. En: Wassmann, P. y K. Olli (eds.). Drainage basin nutrient inputs and eutrophication: an integrated approach. College of Fishery Sciences, University of Tromsø, Tromsø, Norway Tartu University, Department of Botany and Ecology, Lai st. 40, 51005, Tartu, Estonia.

Sommer, U. (Ed.). (2012). *Plankton ecology: Succession in plankton communities*. Springer Science & Business Media. Berlin, New York. p. 104.

Sugumar, S., Rajesh, R., Kannan, P. y Venkatesan, P. (2020). Producción de biodiesel a partir de la biomasa de microalgas verdes *Dunaliella salina* utilizando disolvente orgánico. *Materiales de hoy: Actas*.

Tomas, C. R. 1997. *Identifying marine phytoplankton*. Academic Press. San Diego. 858 p.

Troccoli, L.G., J.A. Herrera-Silveira & F. Comín. 2004. Structural variations of phytoplankton in the coastal seas of Yucatán, Mexico. *Hydrobiologia* 519: 85-102.

Valente, T. M., & Gomes, C. L. (2007). El papel de dos algas acidofilas como indicadores ecologicos de zonas de drenajes acidos de minas. *Journal of Iberian Geology*, 283-295.

Varona-Cordero, F., y Gutiérrez Mendieta, F. J. (2006). Composición estacional del fitoplancton de dos lagunas costeras del Pacífico tropical. *Hidrobiológica*, 16(2), 159-174.

Vidal, L. A. 1995. Estudio del fitoplancton en el sistema lagunar estuarino tropical Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia, durante el año 1987. Tesis (M.Sc.) Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 207 p.



Vidal, L.A. 2010. Manual del fitoplancton hallado en la Ciénaga Grande de Santa Marta y cuerpos aledaños. Bogotá: Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano. 384 p.

Vilardy, S., Jaramillo, Ú., Flórez, C., Cortés-Duque, J., Estupiñán, L., Rodríguez, J. Aponte, C. 2014. Principios y criterios para la delimitación de humedales continentales: una herramienta para fortalecer la resiliencia y la adaptación al cambio climático en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, 100 pág.

Webb C.O., Ackerly D.D., McPeck M.A. & Donoghue M.J. (2002) Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 475–505.

Wetzel, RG y Likens, GE (2000). Composición y biomasa del fitoplancton. En análisis limnológico (págs. 147-174). Springer, Nueva York, NY.

Yixing Sui, Siegfried E. Vlaeminck, Dunaliella Microalgae for Nutritional Protein: An Undervalued Asset, *Trends in Biotechnology*, Volume 38, Issue 1, 2020, Pages 10-12.

Zabala, A., Hernández, E., Agudelo, A., Aguirre, N., Vélez, F. 2019. Variación temporal de la morfología funcional del fitoplancton en una planicie inundable del Caribe Colombiano. *Biota Colombiana*. 20 (2): 2-19.

ANEXOS

ANEXO 1. Variables físicas y químicas de interés para el periodo seco (S) y el periodo lluvioso (L), en seis estaciones E1, E2... E6, evaluadas en la de la ciénaga Sevillano.

	T °C	Conduc. µs/cm	pH	O2 mg/l	TSD mg/l	Salinidad %	NH4 µM	ST mg/l	SST gm/l	PO4 mg/l	P total mg PO 3—/L
SE1	30,0	52,8	8,2	7,0	52,9	31,8	0,0336	11601,9	128,0	0,5622	0,5112
SE2	30,5	51,7	8,1	7,1	51,2	32,0	0,0148	13369,0	162,4	1,2947	0,5550
SE3	31,2	50,0	8,3	9,2	50,2	31,4	0,0461	12357,1	118,1	1,4381	1,7649
SE4	32,2	2,6	7,3	5,6	2,8	1,9	0,1532	740,6	135,4	14,9493	4,5208
SE5	33,0	54,3	8,3	9,2	54,4	33,7	0,2078	14418,9	156,8	0,7708	0,9243
SE6	32,2	53,7	8,4	8,0	53,6	33,6	0,1528	15267,2	105,4	1,0180	1,3102
LE1	28,7	38,5	8,7	6,1	38,3	25,2	0,0135	352,4	69,6	0,3475	0,4504
LE2	29,2	35,9	8,2	5,5	35,8	23,4	0,0025	475,2	67,2	0,2037	0,3760
LE3	30,5	42,4	8,7	7,6	42,3	28,9	0,0045	487,1	90,6	0,6694	0,8040
LE4	32,1	847,3	8,3	8,7	641,9	3,1	0,0357	328,9	109,7	1,1281	1,2418
LE5	32,0	43,5	8,6	6,4	43,4	29,6	0,0040	492,6	108,5	0,7435	0,9725
LE6	31,4	46,9	7,9	5,2	46,5	31,9	0,0253	399,0	52,7	0,9788	1,2604

ANEXO 2. Estadísticos generados por interpolación, extrapolación para análisis de cobertura de muestreo para las estaciones evaluadas en época seca y época lluviosa en la Ciénaga Sevillano. SE1, SE2... SE6; corresponden a la época seca y LE1, LE2... LE6; corresponden a época de lluvias.

site	m	method	order	SC	qD	qD.LCL	qD.UCL
SE1	205	interpolated	0	0,96	40	37,1	42,7
	205	interpolated	1	0,96	29	25,8	31,2
	205	interpolated	2	0,96	22	19,0	25,3
SE2	205	interpolated	0	0,97	41	38,5	44,1
	205	interpolated	1	0,97	32	29,6	34,2
	205	interpolated	2	0,97	27	24,0	29,2
SE3	205	interpolated	0	0,95	35	32,8	36,8
	205	interpolated	1	0,95	16	14,2	17,2
	205	interpolated	2	0,95	9	8,2	10,4
SE4	205	interpolated	0	0,95	32	30,6	34,4
	205	interpolated	1	0,95	14	12,8	15,6

Convenciones	
Site	Sitio o muestra
m	Tamaño de la muestra (UM)
Order	0 = Riqueza de taxones 1 = Shannon ajustado 2 = Simpson ajustado
SC	Estimador de cobertura muestral
qD	Diversidad de orden q estimada
LCL	Límite de confianza inferior
UCL	Límite de confianza superior



	205	interpolated	2	0,95	8	7,4	9,3
SE5	205	observed	0	0,99	24	22,0	26,0
	205	observed	1	0,99	18	15,8	19,6
	205	observed	2	0,99	14	11,8	16,2
SE6	205	interpolated	0	0,97	36	34,6	37,7
	205	interpolated	1	0,97	22	19,5	23,8
	205	interpolated	2	0,97	12	10,2	14,7
LE1	205	interpolated	0	0,98	33	31,2	34,6
	205	interpolated	1	0,98	18	16,3	20,5
	205	interpolated	2	0,98	10	7,6	11,6
LE2	205	interpolated	0	0,98	37	34,8	38,4
	205	interpolated	1	0,98	30	27,9	31,5
	205	interpolated	2	0,98	26	23,6	27,8
LE3	205	interpolated	0	0,98	28	26,7	28,9
	205	interpolated	1	0,98	16	14,5	17,5
	205	interpolated	2	0,98	10	8,4	11,3
LE4	205	interpolated	0	0,96	35	33,5	37,3
	205	interpolated	1	0,96	20	18,1	21,3
	205	interpolated	2	0,96	12	10,0	13,6
LE5	205	interpolated	0	0,98	33	30,4	34,8
	205	interpolated	1	0,98	22	20,3	24,3
	205	interpolated	2	0,98	16	12,9	18,5
LE6	205	interpolated	0	0,99	31	28,9	32,6
	205	interpolated	1	0,99	24	22,0	26,5
	205	interpolated	2	0,99	20	17,6	22,6



Anexo 3. Siglas de los taxones

Taxón	fito.sigla
Phormidium mucicola	Phrmm
Anabaena sp1	Ansp1
Anabaena sp2	Ansp2
Anabaenopsis sp1	Ansp1
Arthrospira sp1	Arsp1
Komvophoron sp1	Kmsp1
Limnothrix sp1	Lmsp1
Limnothrix sp2	Lmsp2
Lyngbya sp1	Lysp1
Oscillatoria sp1	Ossp1
Oscillatoria sp2	Ossp2
Oscillatoria sp3	Ossp3
Ankistrodesmus sp1	Ansp1
Coelastrum sp1	Clsp1
Crucigenia sp1	Crsp1
Desmodesmus brasiliensis	Dsmdb
Pediastrum sp1	Pdsp1
Scenedesmus sp1	Scsp1
Johannesbaptistia sp1	Jhsp1
Spirogyra sp1	Spsp1
Spirulina sp1	Spsp1
Spirulina subsalsa	Sprls
Centritractus sp1	Cnsp1
Closterium sp1	Clsp1
Cosmarium sp1	Cssp1
Dunaliella salina	Dnlls
Dunaliella viridis	Dnllv
Alexandrium sp1	Alsp1
Gonyaulax sp1	Gnsp1
Peridinium sp1	Prsp1
Euglena acus	Eglna
Euglena sp1	Egsp1
Phacus sp1	Phsp1
Phacus sp2	Phsp2



Achnanthes sp1	Acsp1
Amphora marina	Amphm
Amphora ovalis	Ampho
Asteromphalus sp1	Assp1
Aulacoseira sp1	Alsp1
Caloneis sp1	Clsp1
Campylodiscus sp1	Cmsp1
Cocconeis sp1	Ccsp1
Coscinodiscus bicostatus	Cscnb
Coscinodiscus sp1	Cssp1
Craticula cuspidata	Crtcc
Cyclotella sp1	Cysp1
Cylindrotheca closterium	Cylnc
Cymbella sp1	Cysp1
Cymbella sp2	Cysp2
Encyonema sp1	Ensp1
Entomoneis alata	Entma
Eunotia sp1	Ensp1
Fragilaria sp1	Frsp1
Gomphonema sp1	Gmsp1
Gomphonema sp2	Gmsp2
Gyrosigma sp1	Gysp1
Hantzschia sp1	Hnsp1
Melosira sp1	MIsp1
Navicula longa	Nvcll
Navicula sp1	Nvsp1
Navicula sp2	Nvsp2
Nitzschia sp1	Ntsp1
Pinnularia sp1	Pnsp1
Pinnularia sp2	Pnsp2
Plagiotropis lepidoptera	Plgtl
Pleurosigma sp1	Plsp1
Pseudonitzschia pungens	Psdnp
Stauroneis sp1	Stsp1
Surirella sp1	Srsp1
Synedra sp1	Sysp1
Thalassionema sp1	Thsp1



Pseudosolenia sp1	Pssp1
Chaetoceros sp1	Chsp1
Chaetoceros sp2	Chsp2
Chaetoceros sp3	Chsp3
Hemiaulus sp1	Hmsp1
Chroococcus sp2	Chsp2
Chroococcus sp1	Chsp1
Eudorina sp1	Edsp1
Merismopedia sp1	Mrsp1
Microcystis aeruginosa	Mcrca

Anexo 4. Fotografías de algunas de las especies registradas en la ciénaga Sevillano.

