

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación
Caracterización del fitoplancton y estado trófico del Lago de Yojoa

Estudiante

Marlene Raquel Abrego Gavidia

Asesores

Erika Tenorio Moncada, M.Sc.

Shisbeth Tabora, M.Sc.

Lourdes Espinal, Ing.

Honduras, agosto 2023

Autoridades

SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA MARGARITA MAIER

Vicepresidenta y Decana Académica

ERIKA TENORIO MONCADA

Directora Departamento Ambiente y Desarrollo

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Agradecimientos

Agradezco al equipo del Departamento de Ambiente y Desarrollo por todo el apoyo brindado a lo largo de la realización del estudio. De igual manera, a AMUPROLAGO, USAID y el Proyecto SOS YOJOA, por brindar apoyo logístico y económico para la investigación. Agradezco particularmente a Juan Carlos Sorto de AMUPROLAGO por la ayuda brindada en todo el período de muestreo.

Contenido

Índice de Cuadros.....	6
Índice de Figuras	7
Índice de Anexos.....	8
Resumen	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Materiales y Métodos.....	14
Sitio de Estudio	14
Toma de Muestras	15
Estado Trófico	15
Nitrógeno Total.....	17
Fósforo Total.....	18
Clorofila <i>a</i>	18
Profundidad “Secchi”	19
Identificación de Fitoplancton	19
Análisis Estadísticos	19
Resultados y discusión	21
Estado Trófico Índice de “Carlson”	21
Estado Trófico según Índice de “Smith”	22
Comparación del Estado Trófico en los Meses de Muestreo	25
Correlaciones entre Parámetros Medidos por la Sonda Horiba U 50®	27
Identificación de Fitoplancton	28
Conclusiones	31
Recomendaciones.....	32

Referencias.....33

Anexos.....37

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Rango de cada parámetro equivalente a cada estado trófico según “Smith”	17
Cuadro 2 Clasificación del estado trófico de los lagos según el índice de “Carlson”	17
Cuadro 3 Resumen de métodos de análisis utilizados para la determinación del estado trófico del Lago de Yojoa	18
Cuadro 4 Valores promedio del índice de estado trófico según “Carlson” de los diferentes parámetros (Noviembre 2022 - Abril 2023).	22
Cuadro 5 Análisis de varianza con medidas repetidas en el tiempo	25
Cuadro 6 Correlación de Pearson entre parámetros medidos por la sonda Horiba 50®	28
Cuadro 7 Géneros de fitoplancton encontrados durante los meses y zonas de muestreo en el Lago de Yojoa	30

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa del Lago de Yojoa con sus puntos de muestreo	14
Figura 2 Estado Tráfico del Lago de Yojoa según el Índice de “Carlson” entre noviembre 2022 y abril 2023	22
Figura 3 Valores promedio de los parámetros para establecer el estado tráfico del Lago de Yojoa según “Smith” en el período de noviembre 2022 a abril 2023	23
Figura 4 Valores promedio de los parámetros para establecer el estado tráfico según “Smith” en los tres puntos de muestreo en el Lago de Yojoa.	25
Figura 5 Separación de medias DUNCAN entre meses y estado tráfico del Lago de Yojoa	27

Índice de Anexos

Anexo A Cuadro de los géneros de fitoplancton encontrados en los meses de muestreo	37
--	----

Resumen

Los lagos son ecosistemas vitales para la biodiversidad y el desarrollo, sin embargo, poseen amenazas como la eutrofización en la cual ocurre un enriquecimiento con altos niveles de nutrientes, provocando un crecimiento de algas que puede conducir a disminuir el oxígeno y degradar el ecosistema acuático. El fitoplancton está conformado por organismos autótrofos de origen vegetal que viven en un medio acuático. Las microalgas son microorganismos que forman parte del fitoplancton y son indicadores de calidad de agua. Otro indicador de calidad de agua en un lago es el índice de estado trófico, el cual permite identificar los niveles de eutrofización. En este estudio, se realizó una caracterización de los géneros de fitoplancton del Lago de Yojoa y se determinó su estado trófico con base en el índice de "Carlson" y el índice de "Smith". Para esto, se analizaron parámetros fisicoquímicos y fitoplancton en 33 muestras de agua. Los muestreos se realizaron en tres sitios ubicados a lo largo del lago. Las muestras se tomaron a un metro de profundidad cada 16 días durante los meses de noviembre a abril del año 2022 al 2023. El promedio de los índices totales de "Carlson" obtenidos en los meses de muestreo fue 59 clasificando al Lago de Yojoa como mesotrófico. Bajo el índice de "Smith", el Lago se clasifica en valores entre eutróficos y mesotróficos. No se encontraron diferencias significativas entre puntos de muestreo. Se identificaron 27 géneros de microalgas a lo largo del mismo período, siendo el género *Microcystis* uno de los más dominantes.

Palabras clave: Calidad de agua, clorofila *a*, eutrofización, microalgas, nutrientes

Abstract

Lakes are vital ecosystems for biodiversity and economy; therefore, they require water quality assessments to preserve their biodiversity and ensure their positive impact on societies. However, they pose threats such as eutrophication in which water bodies become enriched with high levels of nutrients, causing algal growth that can lead to oxygen depletion and degradation of the aquatic ecosystem. Phytoplankton are autotrophic organisms of plant origin that live in an aquatic environment. Microalgae are microorganisms that are part of phytoplankton, which can be used to determine water quality. Another indicator of water quality in a lake is the trophic state index, which indicates the levels of eutrophication. In this study, a characterization of the phytoplankton species of Lake Yojoa was carried out and their trophic state index was determined with two established indices. Physicochemical and phytoplankton parameters were analyzed in 33 water samples. Sampling was carried out in 3 sites located longitudinally at a depth of one meter every 16 days. The average of the total "Carlson" indices obtained in the sampling months was 59, classifying Lake Yojoa as mesotrophic. No significant differences in trophic status were found between month and sampling point. 27 genera of microalgae were identified over the same period, with the genus *Microcystis* being one of the most dominant throughout the sampling period.

Key words: Chlorophyll a, eutrophication, microalgae, water quality.

Introducción

Los lagos son cuerpos de agua que se encuentran separados del mar y alimentados por ríos, aguas pluviales o aportes subterráneos. Su importancia recae en que son hábitats para el estudio de la dinámica de los ecosistemas, además de ser una base fundamental para el estudio de sistemas acuáticos. Las interacciones entre los procesos biológicos, químicos y físicos son cuantitativa y cualitativamente distintas a las de la tierra y el aire (Hairston, 2014). Asimismo, diversos organismos dependen del agua dulce para sobrevivir, y los seres humanos dependen de los lagos para obtener gran cantidad de bienes y servicios, como el agua potable, la eliminación de residuos, la pesca, el riego agrícola, la actividad industrial y el ocio (Schallenberg et al., 2013). En países en vías de desarrollo más de 60 millones de personas dependen de la pesca en lagos para poder sustentarse (Food and Agriculture Organization [FAO], 2015). A pesar del gran impacto ambiental y social que poseen los lagos, estos se enfrentan a diversas amenazas debido a la actividad antropogénica. Una de ellas es la contaminación causada por una variedad de compuestos orgánicos y minerales (Okello, 2011), la eutrofización, la presencia de especies invasivas, los cambios de uso de suelo y la sobreexplotación de los recursos (Beeton, 2002).

La eutrofización no es solo un problema de origen antrópico, porque cualquier cambio dentro de una cuenca, influirá en el estado biológico de sus lagos (Harper, 1992). El aporte de Fósforo y Nitrógeno favorecen a la eutrofización; lo que provoca la proliferación excesiva de algas y la obstrucción del proceso de fotosíntesis en el fondo del lago, por lo tanto, no existe una producción de oxígeno libre (Ropal, 2010). Asimismo, la eutrofización aumenta la actividad metabólica consumidora de oxígeno de los organismos en descomposición, y comienzan a ingerir el exceso de materia orgánica generada en la superficie (Ropal, 2010). El aumento de las temperaturas del agua y de las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) favorece al crecimiento de cianobacterias y de algas eucariotas (Reid et al., 2019). Las floraciones de cianobacterias nocivas en agua dulce producen

cianotoxinas, principalmente microcistinas, lo que representa una amenaza significativa para los ecosistemas acuáticos y la salud humana (Duan et al., 2022).

Otro aspecto a considerar en la evaluación de un lago es la densidad de fitoplancton. El fitoplancton está conformado por diferentes tipos de microalgas fotoautótrofas que se encuentran en un medio acuático. Estas realizan fotosíntesis y sirven de alimento para organismos heterótrofos y zooplancton. La presencia de fitoplancton ha sido utilizada como un indicador de calidad de agua (Pirzan y Pong-Masak, 2016), ya que influye fuertemente en diversos aspectos de calidad de agua (pH, color, olor, sabor y concentración de oxígeno) (Baird y Eaton, 2017).

La densidad de fitoplancton es un parámetro ecológico en la evaluación de sistemas acuáticos ya que cuantifica las algas y microalgas, responsables de la conversión de dióxido de carbono en carbono orgánico (Gaxiola-Castro et al., 2007). Algunas especies de microalgas se proliferan en cuerpos de agua con niveles de eutrofización y acidificación muy altos. Sin embargo, existen otras especies que son muy sensibles a desechos orgánicos y químicos (Smol y Caraballo, 2008). Otro de los principales aportes del fitoplancton es la producción de oxígeno ya que la clorofila *a* es un pigmento fotosintético. A través de la fotosíntesis, el fitoplancton utiliza la energía solar para convertir dióxido de carbono y agua en azúcares y oxígeno (Brönmark y Hansson, 2018). Asimismo, la disponibilidad de biomoléculas esenciales para el zooplancton depende del fitoplancton (Peltomaa et al., 2017). Entre los principales grupos en los que se divide el fitoplancton se encuentran las diatomeas, clorofitas, cianobacterias, dinoflagelados, euglenoideos y las rafidofitas (Sathyendranath et al., 2004).

Para valorar un lago en función de su productividad biológica, se debe conocer su índice de estado trófico. El índice de estado trófico es la evaluación de una serie de indicadores biológicos y fisicoquímicos. Los parámetros para determinar el estado trófico de un lago son: Nitrógeno, Fósforo, Clorofila *a* y Profundidad "Secchi". De acuerdo con los resultados obtenidos, los lagos se clasifican en diferentes niveles de estado trófico: oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipertrófico, los cuales se catalogan de menor a mayor grado de eutrofización (Chapra, 1997). Esta clasificación se da en un

marco específico de condiciones lacustres, y no hay un límite preciso entre estos. Un lago en cierta época del año puede estar en oligotrofia y en otra tender a la eutrofia, lo mismo ocurre en las diferentes zonas que conforman los lagos (López Martínez y Madroñero Palacios, 2015). Los macronutrientes (carbono, nitrógeno y fósforo) son necesarios para el crecimiento de las microalgas. Al aumentar el nitrógeno y fósforo en el agua se proporcionan los nutrientes necesarios para la realización eficiente de fotosíntesis de las microalgas (Wurtsbaugh et al., 2019).

El Lago de Yojoa posee una importancia ecológica y económica para el país ya que alrededor de su cuenca se realizan diversas actividades humanas como producción acuícola, establecimiento de locales gastronómicos, pesca y turismo. Actualmente, existen pocas investigaciones realizadas en el Lago de Yojoa que aborden la caracterización de fitoplancton junto con su estado trófico. Sin embargo, se realizó un estudio titulado Variación espacial y temporal de la diversidad y abundancia del fitoplancton del lago de Yojoa en un año hidrológico 2014-2015 (Hernández Oviedo et al., 2017). Lo que brinda una línea base para poder comparar los géneros encontrados en ese período de tiempo y los géneros encontrados en este estudio. De 1979 a 1983 se llevó a cabo la primera campaña de muestreo realizada por Goldman y Vaux en el Lago de Yojoa en tres localidades. Asimismo, la Universidad Estatal de Colorado ha realizado diversos estudios en el Lago de Yojoa desde el año 2018 hasta la actualidad, tomando cinco puntos de muestreo en estaciones establecidas. En un estudio realizado por Fadum y Hall, 2022 en el Lago de Yojoa se demostró una correlación entre el aumento de nutrientes (N, P) y el aumento de eutrofización del lago. Con el fin de ahondar en el conocimiento sobre los procesos actuales de eutrofización del Lago de Yojoa se establecieron los siguientes objetivos: a) Determinar el estado trófico del Lago de Yojoa desde noviembre 2022 hasta abril del 2023, b) Comparar el estado trófico de tres sitios de muestreo ubicados longitudinalmente en el lago y a lo largo del periodo de estudio, e c) Identificar los géneros del fitoplancton predominantes en los sitios seleccionados del lago de Yojoa durante el mismo periodo.

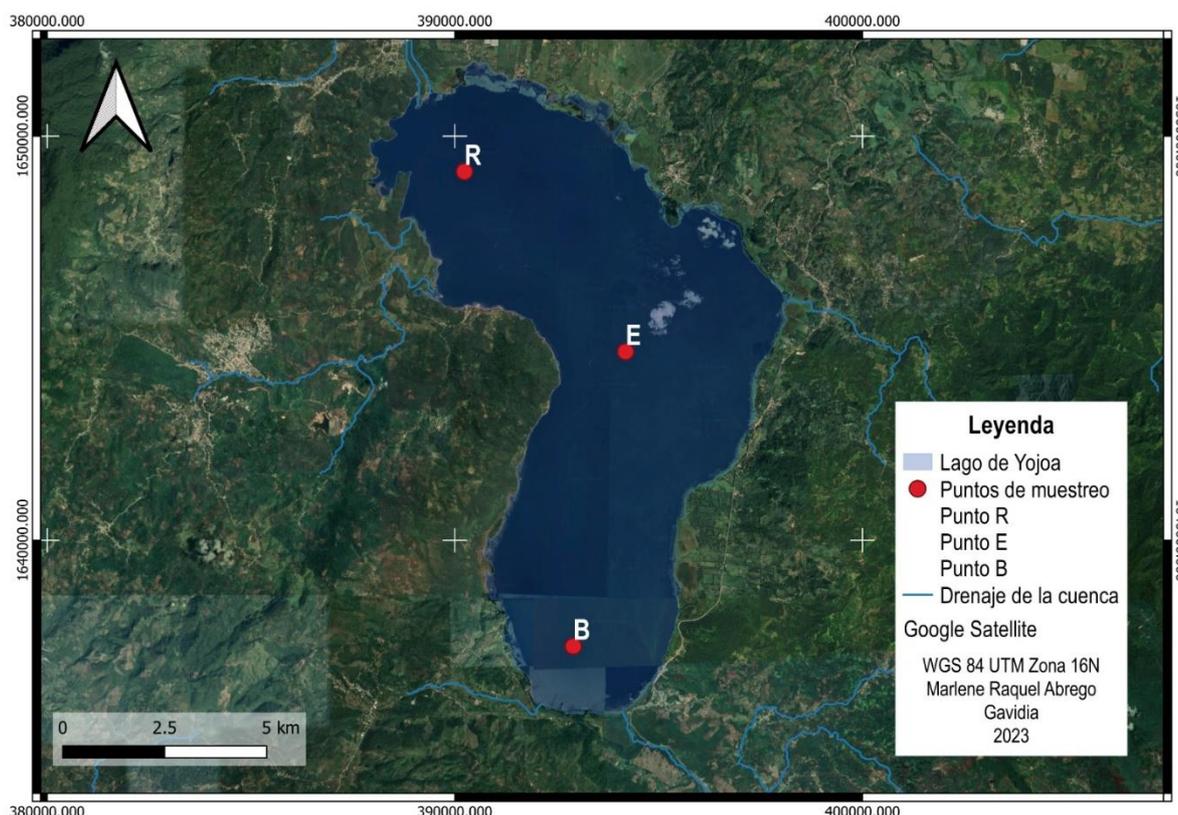
Materiales y Métodos

Sitio de Estudio

El estudio se realizó en el Lago de Yojoa (Figura 1), ubicado entre los departamentos de Cortés, Comayagua y Santa Bárbara de Honduras. El Lago se encuentra a 680 msnm, posee un clima tropical monzón, una temperatura promedio de 23 °C y una precipitación de 2,300 hasta los 3,000 mms/año. El Lago de Yojoa posee una longitud de 16 km, un ancho de 6 km y cuenta con un área de 79 km². Su profundidad promedio es de 16.57 m y su profundidad máxima es de 27.30 m.

Figura 1

Mapa del Lago de Yojoa con sus puntos de muestreo



Los estudios de referencia realizados en el Lago de Yojoa cuentan con cinco puntos de muestreo (Figura 1) distribuidos longitudinalmente (B,E,F,P,R), los cuales se utilizan para muestreos semi mensuales desde 2018 hasta la actualidad (Fadum y Hall, 2022). De estos puntos, se seleccionaron para el presente estudio los puntos R, B y E. Dichos puntos fueron elegidos por su

distribución en el espejo de agua. Asimismo, por ser localidades con cercanías a las principales actividades antropogénicas del lago (acuicultura y restaurantes).

Toma de Muestras

Se recolectaron un total de 66 muestras de agua entre el mes de noviembre del 2022 hasta el mes de abril del 2023; 33 muestras fueron utilizadas para el análisis de los parámetros fisicoquímicos y otras 33 muestras para la identificación del fitoplancton. Las muestras para el análisis de los parámetros fisicoquímicos se tomaron con el muestreador de agua "Van Dorn" marca "Wildco®" modelo 800-799-8301, y las muestras para la identificación de microalgas se tomaron con una red de "plankton" marca "Wildco®" modelo 3-40 A37. Todas las muestras fueron tomadas cada 16 días en los tres puntos de muestreo establecidos a una profundidad de 1 m. La toma de muestras se realizó en un horario de 7:00 - 10:30 a.m. ya que, en ese horario el viento no es un limitante para poder navegar y tomar las muestras. El muestreo coincidió con el paso del Satélite "Landsat" 8 sobre el Lago de Yojoa, debido a que se buscará posteriormente establecer la relación entre la coloración del Lago que se muestran en la imagen satelital y las especies identificadas de microalgas.

Las muestras para el análisis de parámetros fisicoquímicos se colocaron en botellas blancas de polietileno y las muestras de identificación de fitoplancton fueron colocadas en botellas oscuras de polietileno. Posteriormente, las muestras para los análisis de calidad de agua fueron preservadas con ácido sulfúrico (H_2SO_4), fueron congeladas y llevadas al Laboratorio de Calidad de Agua del departamento de Ambiente y Desarrollo de Zamorano, donde se realizaron sus respectivos análisis. Las muestras para identificación de fitoplancton fueron puestas en refrigeración y fueron preservadas con Lugol para su posterior identificación.

Estado Trófico

Para la determinación del estado trófico del lago, se utilizó el índice de "Smith" y el índice de "Carlson". El índice de "Smith" se basa en la estimación de la concentración de la clorofila a , profundidad "Secchi", Nitrógeno y Fósforo. La concentración de Nitrógeno y Fósforo son indicadores

directamente relacionadas con el estado trófico. Por otro lado, la concentración de clorofila a y la profundidad "Secchi" son parámetros que se utilizan para obtener una visión más integral del estado trófico determinado, debido a que se relacionan directamente con la presencia de los nutrientes inorgánicos esenciales (fósforo y nitrógeno) que son limitantes para el crecimiento de algas (Juri, 2018). La presencia de clorofila a indica la presencia de organismos fotosintéticos, como las microalgas, mientras que la profundidad "Secchi" puede dar indicios sobre la cantidad de material en suspensión en el agua, por lo que es un parámetro visual que puede estar relacionado con la presencia de algas. El índice de "Carlson" relaciona la profundidad "Secchi", concentración de clorofila y fósforo total. El índice de estado trófico (TSI) de "Carlson" se calculó mediante las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4:

$$TSI \text{ para la clorofila } - a \text{ (CA)} TSI = 9.81 \ln \text{ Clorofila } - a \left(\frac{\mu g}{L} \right) + 30.6 \quad [1]$$

$$TSI \text{ para la profundidad "Secchi" (SD)} TSI = 60 - 14.41 \quad [2]$$

$$TSI \text{ para el fósforo total (TP)} TSI = 14.42 \text{ en fósforo total } \left(\frac{\mu g}{l} \right) + 4.15 \quad [3]$$

Donde:

TSI = Índice de estado trófico de "Carlson"

ln = Logaritmo natural

$$(CTSI) = [TSI (TP) + TSI(CA) + TSI(SD)]/3 \quad [4]$$

Donde:

CTSI = Índice de estado trófico de Carlson

TP = Fósforo Total

CA = Clorofila a

SD = Transparencia en metros

Con base en los valores del CTSI, los lagos se clasifican como oligotróficos (poco productivos), mesotróficos (moderadamente productivo) y eutrófico (altamente productivo). En el Cuadro 1 se presenta el rango de valores de los cuatro parámetros correspondientes al estado trófico que

representa el índice de “Smith” al., 1999, ordenados desde el estado oligotrófico hasta el hipertrófico (de menor a mayor). De esta forma, la caracterización del lago se realizó con relación al valor obtenido del parámetro considerado y el rango de valores en el que se encuentra.

Cuadro 1

Rango de cada parámetro equivalente a cada estado trófico según “Smith”

Estado Trófico	Fósforo total (ug/l)	Nitrógeno total (ug/l)	Clorofila <i>a</i> (ug/l)	Profundidad “Secchi” (m)
Oligotrófico	< 10	< 350	< 3.5	> 4
Mesotrófico	10-30	350-650	3.5-9	2-4
Eutrófico	30-100	650-1,200	9-25	1-2
Hipereutrófico	> 100	> 1,200	> 25	< 1

En el Cuadro 2 se presenta la clasificación de los lagos según el rango de valores determinados del índice de estado trófico de “Carlson”. Donde los lagos se clasifican de menor estado trófico (< 30-40) a mayor estado trófico (> 90) según su productividad biológica.

Cuadro 2

Clasificación del estado trófico de los lagos según el índice de “Carlson”

Valores (TSI)	Estado Trófico
< 30-40	Oligotrófico
40-60	Mesotrófico
60-90	Eutrófico
> 90	Hipereutrófico

Nitrógeno Total

El método que se utilizó para el análisis de Nitrógeno Total fue la digestión por persulfato. Este método recupera casi todas las formas de nitrógeno orgánico e inorgánico reducido y oxidado, el nitrato de amoníaco, nitratos y nitritos. De igual manera, identifica componentes de nitrógeno de origen biológico como proteínas y aminoácidos. Los compuestos de nitrógeno son digeridos y oxidados en línea a nitrato mediante el uso de persulfato alcalino calentado y radiación ultravioleta. La oxidación alcalina entre 100 y 110 °C convierte el nitrógeno orgánico e inorgánico en nitrato. El nitrógeno total se determina analizando el nitrato en el digestato (Baird y Eaton, 2017).

Fósforo Total

El método químico utilizado para el análisis de Fósforo Total fue el de Azul de Fósforomolibdeno. El color azul producido es causa de la reacción del reactivo con los iones de ortofosfato. Los fosfatos orgánicamente ligados se transforman en ortofosfatos mediante el calentamiento con ácido y persulfato.

Clorofila *a*

La clorofila *a* se cuantificó utilizando la técnica de extracto de metanol al 90% descrita en Pearson et al., 1987 con acidificación a HCl (ácido clorídrico) 0,1 N (Fadum y Hall, 2022). Posteriormente, se utilizó un espectrofotómetro para observar las longitudes de onda (663 nm y 750 nm). Donde el cálculo de la concentración de clorofila *a* se realizó con la Ecuación 5:

$$Chl\ a\ \frac{\mu g}{l} = \frac{od_{663} - od_{750}}{77} \times \frac{(volumen\ del\ extracto\ del\ solvente)}{(volumen\ de\ muestra\ original)} \times 10^6 \quad [5]$$

Donde:

Chl *a* = Clorofila *a*

μg = Microgramo

od = Densidad óptica

En el Cuadro 3 se presentan los métodos de análisis empleados para evaluar el estado trófico del Lago de Yojoa. Los parámetros clave para esta evaluación son el Nitrógeno Total, el Fósforo Total y la Clorofila *a*, los cuales ofrecen una visión integral de la calidad del agua y el nivel de nutrientes presentes en el ecosistema acuático.

Cuadro 3

Resumen de métodos de análisis utilizados para la determinación del estado trófico del Lago de

Yojoa

Parámetro	Método	Unidad	Equipo
Nitrógeno Total	Digestión por persulfato	mg/L	Colorímetro
Fósforo Total	Azul de fósforo molibdeno	mg/L	SpectroDirect, XD 7000, XD 7500

Parámetro	Método	Unidad	Equipo
Clorofila <i>a</i>	Extracto en metanol	µg/L	Espectrofotómetro y centrífuga

Profundidad “Secchi”

La profundidad “Secchi” mide la transparencia o la turbidez del agua y es una medida indirecta de las partículas en suspensión que se encuentran en la columna de agua. La profundidad “Secchi” se mide mediante un disco blanco circular que un observador humano baja en una masa de agua natural hasta que desaparece de la vista, por lo tanto la profundidad de desaparición es una medida visual de la claridad del agua (Preisendorfer, 1986). En este estudio se utilizó un disco “Secchi” marca “Cole-Parmer™” 05492-00 que contaba con una escala graduada en la cuerda para medir la profundidad hasta donde penetraba la luz solar en los lugares de muestreo.

Identificación de Fitoplancton

Para la identificación de fitoplancton, la muestra en las botellas oscuras de polietileno se conservó con Lugol, donde por cada 100 ml muestra se adicionó 1 mL de Lugol (I₂ (yodo molecular) 1% +KI (yodo potásico) 2%). Posteriormente, en un portaobjeto se añadió una gota de muestra y fue cubierta con un cubreobjeto. Seguidamente, se observaron 30 campos por muestra en el microscopio marca “Amscope®” con una resolución de 40X, y las especies/género de las microalgas pasaron a ser debidamente identificadas según la morfología descrita en el Atlas “Common Source Water Taxa: Algae & Cyanobacteria A FlowCam Image Guide for Drinking Water Utilities” (Yokogawa Fluid Imaging Technologies, 2020) y en el libro “Freshwater Algae of North America” (John D. Wehr et al., 2014) primera edición 2003. Se agruparon en una tabla los géneros identificados conforme a su presencia en los sitios de muestreo a lo largo del periodo del estudio.

Análisis Estadísticos

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para diseños no balanceados con medidas repetidas en el tiempo, debido a que en el mes de abril solo se realizó un muestreo por disponibilidad logística. Posteriormente, se realizó una separación de medias por el método de DUNCAN, utilizando

el programa "Infostat®" 2021. Adicionalmente, se monitorearon los parámetros de pH, oxígeno disuelto, nitrato y clorofila a en diferentes profundidades y en cada sitio de muestreo (B, E, R) con una sonda multiparamétrica Horiba® U-50 y se realizó una correlación de Pearson entre parámetros para obtener una visión más integral del estado del Lago de Yojoa.

Resultados y discusión

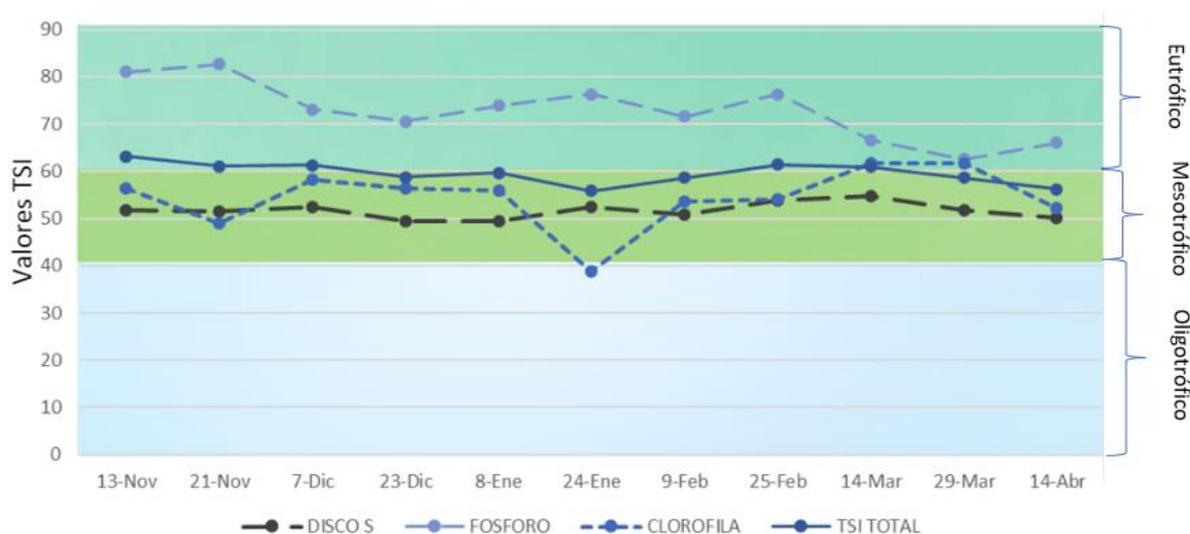
Estado Trófico Índice de “Carlson”

En la Figura 2 se observan los cambios en los valores de los índices de estado trófico según “Carlson” en el período de noviembre 2022 a abril 2023. En la gráfica se observa que el TSI del fósforo es el valor más alto con respecto a los índices de la clorofila y disco “Secchi”, esto puede deberse a las actividades antropogénicas que se realizan alrededor de la cuenca del lago (acuicultura industrial, ganadería y actividades agrícolas). En el estudio de Studer se determinó que el mayor aporte de fósforo llega al lago en estado sólido, lo que se le atribuye al alimento dado en los cultivos de producción de tilapias en el Lago en el cual el contenido de fósforo varía entre 1.30 y 2.52%, y por cada tonelada de tilapia se introducen de 23 - 29 kg de fósforo al ecosistema acuático (Beveridge, 1986).

Por otra parte, el TSI del disco “Secchi” presenta un comportamiento estable en los meses de muestreo, obteniendo el valor más alto en el mes de marzo, esto puede deberse a que en marzo se da la inversión térmica entre las capas de estratificación del lago por la temperatura, en la cual las heces de los peces que contienen los nutrientes que son alimento para las microalgas (Fósforo y Nitrógeno) pasan de estar en la zona del hipolimnion a la zona del epilimnion (Fadum y Hall, 2022), por el cambio de densidad de la zona fótica del lago. Estos eventos producen una proliferación de algas en la zona de epilimnion del lago. Consistentemente, el valor máximo del TSI de la clorofila también se encuentra en el mes de marzo. De acuerdo con el TSI Total, los valores se mantuvieron uniformes mostrando un comportamiento de eutrofia y mesotrofia en todos los meses.

Figura 2

Estado Trófico del Lago de Yojoa según el Índice de "Carlson" entre noviembre 2022 y abril 2023



En el Cuadro 4 se observan los promedios de cada parámetro por cada mes de muestreo. Se obtuvo un promedio de los dos muestreos mensuales para realizar la gráfica de la Figura 2. En el cuadro se observa que los valores de Fósforo Total fueron los más altos en todos los meses. Mientras que los valores más bajos se obtuvieron en el índice del disco "Secchi" en todos los meses muestreados.

Cuadro 4

Valores promedio del índice de estado trófico según "Carlson" de los diferentes parámetros

(Noviembre 2022 - Abril 2023)

Parámetro	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril
TSI DS	51.66	50.92	50.88	52.28	59.82	50.21
TSI PT	81.93	71.77	75.11	73.95	64.62	66.055
TSI Chla	52.70	57.40	47.32	53.86	61.67	52.246
TSI TOTAL	61.09	60.03	57.77	60.037	59.82	56.17

Estado Trófico según Índice de "Smith"

Se obtuvieron diferencias en el promedio de los valores de los parámetros indicadores del estado trófico en cada mes. Con respecto a la profundidad "Secchi" en el Figura 3, se observa que los

menores valores fueron obtenidos en los meses de marzo y febrero. Dichos valores clasifican al Lago de Yojoa en un estado mesotrófico según “Smith”. Esto puede deberse a que dichos meses forman parte de los meses donde ocurre la inversión térmica de capas en el lago y se incrementa la abundancia de microalgas en la capa epilimnion (Fadum y Hall, 2022), disminuyendo así la profundidad “Secchi”. De la misma manera, el valor más alto de clorofila se encontró en el mes de marzo, clasificando al lago con un comportamiento eutrófico. Esto se le puede atribuir a que la concentración de clorofila a está fuertemente relacionada a la abundancia de fitoplancton, al ser un pigmento presente en las células de las microalgas (Pearson et al., 1987). Con respecto a la concentración de Nitrógeno y Fósforo Total los valores más altos se encuentran en el mes de noviembre, clasificando el lago en un estado eutrófico para la concentración de Nitrógeno Total e Hipereutrófico según su concentración de Fósforo Total. Estos valores coinciden con en el estudio de Fadum y Hall, 2022 donde hubo un aumento del Fósforo Total en la zona de epilimnion en el mes de noviembre en comparación con los demás meses del año.

Figura 3

Valores promedio de los parámetros para establecer el estado trófico del Lago de Yojoa según “Smith” en el período de noviembre 2022 a abril 2023

Mes n:11	Nitrógeno Total mg/L	Fósforo Total mg/L	Clorofila a $\mu\text{g/l}$	Profundidad Secchi m
Noviembre	1.1	0.12	11.28	3.12
Diciembre	0.51	0.11	16.44	3.4
Enero	0.35	0.15	8.99	3.41
Febrero	1.08	0.13	13.385	2.89
Marzo	0.75	0.06	24.59	2.55
Abril	0.53	0.07	12.42	3.66

	Hiper eutrófico
	Eutrófico
	Mesotrófico
	Oligotrófico

Nota. n: número de muestras

En la Figura 4 se observan los promedios de los valores de los parámetros de estado trófico según “Smith”, por cada punto de muestreo. Las variaciones observadas en los tres puntos de muestreo se deben a los usos de la cuenca que están cerca de los alrededores de cada estación, así como a los nutrientes que se desembocan de los tributarios del Lago de Yojoa. En el punto R se obtuvo la mayor concentración de Nitrógeno Total, clasificando a dicho punto en estado de eutrofia por el valor obtenido de ese parámetro. Esto se puede atribuirse a las concentraciones de nutrientes de los tributarios que desembocan en la zona. De todos los tributarios al lago, el río Raíces y el río Helado son los afluentes que más nutrientes aportan al tener microcuencas con un uso de suelo agrícola (Studer, 2007b).

Los promedios de la concentración de Fósforo Total en los puntos presentaron un estado de hipereutrofia en los tres puntos. En el punto B se presenta el valor más alto de clorofila *a* y el menor de profundidad “Secchi”, presentando comportamiento eutrófico según la clorofila *a* y comportamiento mesotrófico según la profundidad “Secchi”. Se observa que existe una relación entre la concentración de clorofila *a* y la transparencia “Secchi”. Cabe destacar que el punto B se encuentra ubicado a 300 metros del sector de los restaurantes del Lago de Yojoa, y la desembocadura del río Varsovia, por lo cual en esa estación se reciben las descargas de los efluentes residuales de los restaurantes y de la planta de tratamientos. Las descargas de los efluentes de aguas grises pueden presentar nutrientes como Nitrógeno y Fósforo provenientes principalmente de los detergentes y jabones (Gomes de Quevedo y da Silva Paganini, 2016). En el punto E también se encuentran los sistemas productivos de cría de tilapia. Cabe recalcar que solamente la empresa Aquafinca deposita al lago 9,000 t/año de concentrado para el cultivo de tilapias, el cual posee un alto contenido de Nitrógeno y Fósforo (Acosta, 2018).

Figura 4

Valores promedio de los parámetros para establecer el estado trófico según "Smith" en los tres puntos de muestreo en el Lago de Yojoa

Punto	Nitrógeno Total mg/l	Fósforo Total mg/l	Clorofila <i>a</i> µg/l	Profundidad Secchi m
n = 11				
B	0.78	0.14	16.91	2.77
E	0.54	0.13	12.72	3.25
R	0.95	0.13	14.51	3.37
	Hiper eutrófico			
	Eutrófico			
	Mesotrófico			
	Oligotrófico			

Nota. n: número de muestras

Comparación del Estado Trófico en los Meses de Muestreo

Se realizó una ANDEVA para diseños no balanceados con medidas repetidas en el tiempo, debido a que en el mes de abril solo se realizó un día de muestreo por cuestiones de logística. En el Cuadro 5 se mostró que no existen diferencias estadísticamente significativas en el cambio de estado trófico según punto de muestreo ($p > 0.05$). Por el contrario, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los meses de muestreo. Sin embargo, para la interacción entre puntos de muestreo y meses no existe un efecto combinado ($p > 0.05$).

Cuadro 5

Análisis de varianza con medidas repetidas en el tiempo

Variables	Valor- F	Valor-p
Puntos de muestreo	1.93	0.1821
Meses de muestreo	4.57	0.0111
Puntos de muestreo/Meses de muestreo	1.58	0.2099

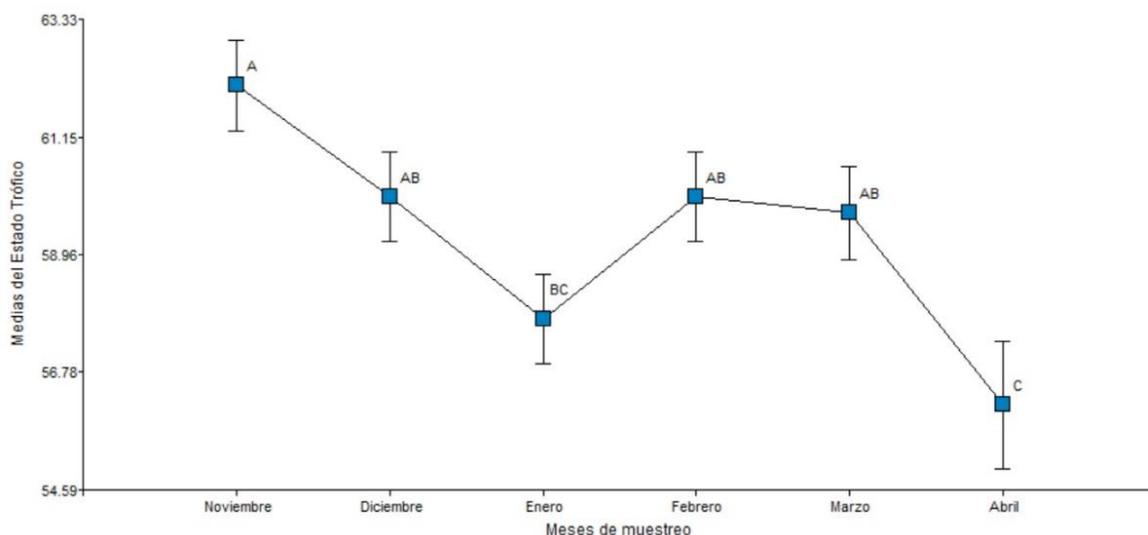
Adicionalmente, se realizó una separación de medias por el método de DUNCAN para determinar los meses con diferencias significativas. En la Figura 5 se encuentra la separación de medias de DUNCAN donde se observa que el mes con mayor diferencia significativa es abril, con

menor índice de estado trófico ($p < 0.05$) y noviembre con mayor estado trófico. Cabe recalcar que las muestras para medir los parámetros se tomaron en el epilimnion del lago. El mes de abril fue el mes con menor índice de estado trófico; esto puede atribuirse a la temporada seca. Por lo tanto, existe una reducción en la entrada de agua al lago por escorrentía, lluvia o afluentes y consecuentemente hay una disminución en la cantidad de nutrientes que ingresan al lago. Los meses de noviembre y febrero fueron los que presentaron un mayor índice de estado trófico esto se puede atribuir a que dichos meses coinciden con la inversión térmica anual de las capas de estratificación del lago (noviembre - marzo).

Durante la inversión térmica, los nutrientes que se encuentran en las capas más profundas del lago se invierten térmicamente y se distribuyen por todo el cuerpo de agua. Esto puede llevar a un aumento de la disponibilidad de nutrientes en las capas superiores, lo que favorece el crecimiento de algas y a la eutrofización. Los meses de diciembre, febrero y marzo no fueron significativamente diferentes ($p > 0.05$). En todos los meses de muestreo el lago obtuvo índices totales de estado trófico con un rango de valores de 65 TSI Total a 50 TSI Total, clasificando el lago entre mesotrófico y eutrófico en los seis meses de muestreo. Otra razón a la que se le puede atribuir el hecho de que el estado trófico se mantiene en las mismas condiciones a lo largo del tiempo es debido a que el lago es un sistema relativamente cerrado donde las aguas recirculan dentro del lago en lugar de presentar una corriente continua (Delgadillo y Góngora, 2009).

Figura 5

Separación de medias DUNCAN entre meses y estado trófico del Lago de Yojoa



Nota. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Correlaciones entre Parámetros Medidos por la Sonda Horiba U 50®

Se encontraron correlaciones entre los diferentes parámetros. Una correlación fuerte encontrada fue entre temperatura y clorofila (0.72). Lo cual puede atribuirse al hecho que las temperaturas más altas pueden estimular la actividad fotosintética de las plantas acuáticas y el fitoplancton. El contenido de clorofila disminuye bajo estrés por el frío, lo que podría deberse a que la baja temperatura suprime la biosíntesis de clorofila, probablemente inhibiendo las actividades de las enzimas biosintéticas de clorofila (Nagata et al., 2007).

Otra correlación fuerte encontrada fue la correlación inversa entre profundidad y oxígeno disuelto (-0.87). Esto indica que a medida la profundidad aumenta, el oxígeno disuelto disminuye, lo cual es atribuido a los restos de plantas, algas y otros materiales orgánicos que se encuentran al fondo del lago, ya que, comienzan a descomponerse y este proceso de descomposición consume oxígeno, lo que conlleva a una reducción en oxígeno disuelto (Valencia et al., 1987). Otra correlación negativa encontrada fue la de oxígeno disuelto y nitratos. (-0.78). Lo que indica que a medida aumenta la concentración de nitrato disminuye el oxígeno disuelto. Esto puede deberse a que cuando hay altas

concentraciones de nitrato en el agua, puede estimular el crecimiento excesivo de algas y otras plantas acuáticas (Kumar y Bera, 2020). A medida que las algas y las plantas acuáticas crecen y se reproducen en respuesta al exceso de nutrientes, como el nitrato, consumen grandes cantidades de oxígeno durante la respiración, lo cual puede llevar a una disminución del oxígeno disuelto en el agua (Perdomo et al., 2001).

Cuadro 6

Correlación de Pearson entre parámetros medidos por la sonda Horiba 50®

	Profundidad	Temperatura	pH	LDO	NO ₃	Chla (V)
Profundidad	1.00					
Temperatura	0.30	1.00				
pH	-0.51	-0.49	1.00			
LDO	-0.87	-0.09	0.51	1.00		
NO ₃	0.46	-0.27	-0.26	-0.78	1.00	
Chla (V)	-0.43	0.72	-0.10	0.59	-0.66	1.00

Nota. p > 0.05, LDO: Oxígeno Disuelto, NO₃: Nitrato, Chla (V): Clorofila

Identificación de Fitoplancton

Se encontraron un total de 27 géneros y 81 especies de fitoplancton en el espejo de agua. De los cuales 12 pertenecen al grupo de cianobacterias, ocho al grupo de algas verdes, cinco diatomeas y dos dinoflagelados. El grupo de cianobacterias es el más predominante en el Lago a lo largo del periodo de estudio. En los meses de muestreo, algunos géneros de fitoplancton fueron encontrados como *Aulacoseira*, *Aphanotece*, *Aphanocapsa*, *Staurastrum* y *Microcystis* (Anexo A). El género *Microcystis* pertenece al grupo de las cianobacterias y la presencia de esta microalga indica que hay una floración de algas. Las floraciones de algas de este género son perjudiciales para el ecosistema lacustre ya que estas producen una toxina llamada microcistina (Herrera et al., 2015), que puede afectar a los organismos acuáticos, incluidos los peces y otras formas de vida acuática. Adicionalmente, las floraciones de *Microcystis* pueden alterar el equilibrio ecológico del ecosistema, reducir los niveles de oxígeno en el agua y bloquear la luz solar, afectando a otras especies acuáticas (Watanabe, 1996).

En los ecosistemas acuáticos con niveles de eutrofización, las cianobacterias tienden a predominar durante la mayor parte del año (Hernández Oviedo et al., 2017). Por lo tanto, la presencia de cianobacterias en el Lago de Yojoa está relacionada con el estado trófico encontrado (mesotrófico y eutrófico). Las microalgas son capaces de tomar nitrógeno en forma de urea, amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-), nitrito, nitrógeno gas y óxidos de nitrógeno (NO_x), y el fósforo en forma de HPO_4^{2-} o H_2PO_4^- pero en menos cantidad que el nitrógeno (Hernández-Pérez y Labbé, 2014). El aporte de nutrientes en el Lago de Yojoa contribuye a la eutrofización e influye en la proliferación de cianobacterias.

Studer, 2007a reportó la presencia excesiva de cianobacterias en el Lago de Yojoa (*Microcystis* sp. y *Oscillatoria* sp.), lo cual coincide con dos de los géneros que se encontraron en todos los meses y estaciones de muestreo. Por otro lado, también se encontraron especies que no están asociadas a ser perjudiciales para un sistema acuático como en el caso de *Chlorella*. El género *Chlorella* tiene la capacidad de fijar eficazmente el dióxido de carbono y eliminar nitrógeno y fósforo, lo que la convierte en una buena candidata para la biomitigación de gases de efecto invernadero y la biorremediación de aguas residuales (Scheper et al., 2014). La presencia de las cianobacterias *Microcystis*, *Anabaena* y *Oscillatoria* puede relacionarse con temperaturas cálidas (Studer, 2007a), como es el caso del Lago de Yojoa. Similarmente, el género *Staurastrum* suelen poseer dominancia en lagos tropicales y son usuales en ambientes de mesotrofia. Sin embargo, hay algunas especies de este género que son indicadoras para ecosistemas eutróficos, como la especie *Staurastrum manfeldtii* (Barbosa et al., 2013) que estuvo presente espacial y temporalmente en este estudio. Por otra parte, se encontraron ciertos géneros solamente en un punto de muestreo y en un mes, como es el caso de *Ulnaria*, *Mougeotia*, *Anabaena*, *Gyrosigma* y *Epithenia*.

La toma de muestras en diferentes épocas y meses del año pudo influir en la diversidad de especies encontradas en cada sitio ya que existen especies que necesitan de condiciones óptimas y específicas para poder desarrollarse. En general se pueden encontrar géneros específicos en cierta época del año debido a la estacionalidad de las microalgas. Algunas especies pueden florecer en

condiciones frías en el invierno, mientras que otras pueden ser más abundantes en aguas cálidas durante el verano. (Underwood, 1984).

Cuadro 7

Géneros de fitoplancton encontrados durante los meses y zonas de muestreo en el Lago de Yojoa

Género	Meses																		Frecuencia de muestreos (%)
	Nov			Dic			Ene			Feb			Mar			Abr			
	Puntos de muestreo																		
	B	E	R	B	E	R	B	E	R	B	E	R	B	E	R	B	E	R	
Aulacoseira	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	100
Phormidium	X	X		X	X	X				X			X	X	X			X	100
Staurastrum		X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	100
Lyngbya	X			X	X	X	X	X	X		X	X				X	X		83
Pediastrum	X	X					X	X	X	X	X	X				X	X	X	83
Coelastrum		X	X				X	X	X		X					X			66
Microcystis	X		X	X	X		X			X		X	X	X	X		X	X	100
Oscillatoria		X		X			X		X	X		X	X	X	X			X	100
Volvox			X				X		X	X			X	X	X	X			83
Chlorella	X				X	X										X	X		66
Gloeocapsa			X				X	X			X								50
Woronichinia		X					X				X					X	X		66
Aphanotece	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		100
Aphanocapsa	X		X	X	X	X				X	X	X	X	X	X				83
Polykrikos										X						X		X	33
Peridinium													X						16
Limnothrix					X										X				33
Actinastrum											X					X			33
Navicula		X			X						X	X							66
Anabaena									X										16
Synedra							x												16
Eudorina				X							X					X	X		50
Gyrosigma													X						16
Mougeotia													X						16
Plankthotrix														X		X			33
Epithemia														X					16
Ulnaria									X										16

Conclusiones

De acuerdo con el índice de “Carlson”, el lago de Yojoa se encontró en un estado eutrófico en los meses de noviembre, diciembre y febrero (TSI Total > 60) y en un estado mesotrófico en los meses de enero, marzo y abril (TSI Total < 60). De acuerdo con el índice de “Smith”, el Lago de Yojoa se encontró en condiciones entre hiper eutróficas y mesotróficas en los tres puntos de muestreo y a lo largo de la época seca. Bajo ambos índices, el lago de Yojoa se encuentra en condiciones de salud pobres y con riesgo de afectación a la biodiversidad.

En el Lago de Yojoa no existen variaciones consistentes o significativas del estado trófico entre los puntos de muestreo seleccionados a lo largo del espejo de agua debido a la continua presencia de nutrientes. Sin embargo, sí existen variaciones significativas a lo largo de los meses de estudio debido a la inversión térmica y estratificación anual que se da en el Lago de Yojoa. La clasificación del estado trófico no varió a lo largo de los meses de estudio.

El Lago de Yojoa cuenta con una gran diversidad de fitoplancton, siendo los géneros que pertenecen al grupo de cianobacterias los más predominantes en este estudio. Este grupo debido a su toxicidad representa una amenaza a la calidad de agua y a la vida acuática del Lago.

Recomendaciones

Realizar el estudio a una escala de tiempo más amplia para comparar de manera más precisa los cambios en el estado trófico del Lago de Yojoa entre la época lluviosa y la época seca. Al ampliar la duración del estudio, se tendrán en cuenta múltiples ciclos estacionales, lo que permitirá evaluar las variaciones a largo plazo en el estado trófico del Lago.

Realizar una cuantificación de la abundancia de microalgas para poder obtener una visión más completa de la comunidad de microalgas en el Lago y su interacción con el entorno, lo que permitirá una comprensión más profunda de la ecología acuática del Lago de Yojoa.

Vincular y relacionar las imágenes satelitales del Lago de Yojoa con la carga de algas y sus respectivos géneros y especies en un estudio posterior.

Controlar y monitorear las descargas indirectas y directas de aguas residuales que se realizan al Lago de Yojoa.

Diseñar un programa de manejo para monitorear y controlar el florecimiento de algas tóxicas.

Referencias

- Acosta, K. (2018). *Caracterización limnológica y calidad de agua del lago de Yojoa (2013 – 2014): Estimación carga de nutrientes por cultivo de peces en jaulas* [Tesis de maestría], Managua. <https://repositorio.unan.edu.ni/16490/1/16490.pdf>
- Baird, R. B. y Eaton, A. D. (Eds.). (2017). *Standard methods for examination of water and wastewater* (Twenty third edition). American Public Health Association.
- Barbosa, L. G., Barbosa, F. A. R., Araujo, G. J. M. y Bicudo, C. E. d. M. (2013). Dominance desmids tropical monomictic lakes Brazil // The dominance of desmids in tropical monomictic lakes (SE Brazil). *Limnetica*, 32(1), 71–86. <https://doi.org/10.23818/limn.32.08>
- Beeton, A. M. (2002). Large freshwater lakes: Present state, trends, and future. *Environmental Conservation*, 29(1), 21–38. <https://doi.org/10.1017/s0376892902000036>
- Beveridge, M. (1986). *Piscicultura en jaulas y corrales: Modelos para calcular la capacidad de carga y las repercusiones en el ambiente. FAO Documento técnico de pesca: Vol. 255*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Brönmark, C. y Hansson, L.-A. (2018). *The biology of lakes and ponds* (Third edition). *The biology of habitats series*. Oxford University Press.
- Chapra, S. (1997). *Surface Water-Quality Modeling* (Vol. 1). McGraw-Hill Education. https://www.researchgate.net/publication/48447645_Surface_Water-Quality_Modeling
- Delgadillo, I. y Góngora, F. (2009). Colecciones Biológicas: Estrategias didácticas en la enseñanza-aprendizaje de la Biología. (pág. 131-140). *Revista Bio-Grafía Escritos Sobre La Biología Y Su Enseñanza*, 2(3), 131. <https://doi.org/10.17227/20271034.vol.2num.3bio-grafia131.140>
- Duan, X., Zhang, C., Struewing, I., Li, X., Allen, J. y Lu, J. (2022). Cyanotoxin-encoding genes as powerful predictors of cyanotoxin production during harmful cyanobacterial blooms in an inland freshwater lake: Evaluating a novel early-warning system. *The Science of the Total Environment*, 830, Artículo 154568. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154568>
- Fadum, J. M. y Hall, E. K. (2022). The interaction of physical structure and nutrient loading drives ecosystem change in a large tropical lake over 40 years. *The Science of the Total Environment*, 830, 154454. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154454>
- Food and Agriculture Organization. (2015). *Los lagos y ríos son esenciales para el sustento de millones de personas*. <https://www.fao.org/news/story/es/item/276124/icode/>
- Gaxiola-Castro, G., Cepeda-Morales, J., Nájera-Martínez, S., Espinosa-Carreón, T. L., Cruz-Orozco, M. de la, Sosa-Avalos, R., Aguirre-Hernández, E. y Cantú-Ontiveros, J. P. (2007). *Biomasa y producción del fitoplancton*. Universidad de Colima. https://www.researchgate.net/profile/t-leticia-espinosa-carreon/publication/281570706_biomass_and_production_of_phytoplankton_in_spanish
- Gomes de Quevedo, C. M. y da Silva Paganini, W. (2016). Detergents as a Source of Phosphorus in Sewage: the Current Situation in Brazil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(1). <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2700-3>

- Hairston, N. G. (2014). *Encyclopedia of life sciences: Lake Ecosystems*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470015902>
- Harper, D. (1992). What is eutrophication? Definition and origin of the term eutrophication. En D. Harper (Ed.), *Eutrophication of Freshwaters* (pp. 1–28). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3082-0_1
- Hernández Oviedo, A. I., Marin, M., Henríquez, L. y Garay, M. (2017). Variación espacial y temporal de la diversidad y abundancia del fitoplancton del lago de Yojoa en un año hidrológico 2014-2015. *Revista Ciencia Y Tecnología*(19), 40–77. <https://doi.org/10.5377/rct.v0i19.4274>
- Hernández-Pérez, A. y Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista De Biología Marina Y Oceanografía*, 49(2), 157–173. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Herrera, A., María, F. y Echeverri, L. (2015). Evaluación preliminar de la reducción de microcistina-LR en muestras de florecimiento a través de sistemas sedimentarios. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 31. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s0188-49992015000400008&script=sci_arttext
- John D. Wehr, Robert G. Sheath and J y Patrick Kociolek. (2014). *Freshwater Algae of North America*. <https://www.sciencedirect.com/book/9780123858764/freshwater-algae-of-north-america>
- Juri, G. (2018). *Análisis de la relación entre la concentración de clorofila “a” y la transparencia de los lagos monitoreados por la red de calidad de la DGA, y elaboración de un ranking de lagos basado en el estado trófico otorgado por estos parámetros* [, Chile]. CrossRef. <https://snia.mop.gob.cl/sad/LGO5750.pdf>
- Kumar, A. y Bera, S. (2020). Revisiting nitrogen utilization in algae: A review on the process of regulation and assimilation. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100584. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100584>
- López Martínez, M. y Madroñero Palacios, S. (2015). Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: Caso Laguna de la Cocha. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 21. <https://doi.org/10.18359/rcin.1430>
- Nagata, N., Tanaka, R. y Tanaka, A. (2007). The major route for chlorophyll synthesis includes 3,8-divinyl-chlorophyllide a reduction in *Arabidopsis thaliana*. *Plant & Cell Physiology*, 48(12), 1803–1808. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcm153>
- Okello, J. J. (2011). *International Food Safety Standards and The Use of Pesticides in Fresh Export Vegetable Production in Developing Countries: Implications For Farmer Health and The Environment*. IntechOpen.
- Pearson, H. W., Mara, D. D. y Bartone, C. R. (1987). Guidelines for the minimum evaluation of the performance of full-scale waste stabilization pond systems. *Water Research*, 21(9), 1067–1075. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(87\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0043-1354(87)90028-5)
- Peltomaa, E. T., Aalto, S. L., Vuorio, K. M. y Taipale, S. J. (2017). The Importance of Phytoplankton Biomolecule Availability for Secondary Production. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, Artículo 128, 128. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00128>
- Perdomo, C. H., Casanova, O. N. y Ciganda, V. S. (2001). Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay. *Agrociencia - Sitio en Reparación*, 5(1), 10–22. <https://doi.org/10.2477/vol5iss1pp10-22>

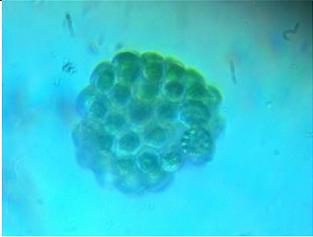
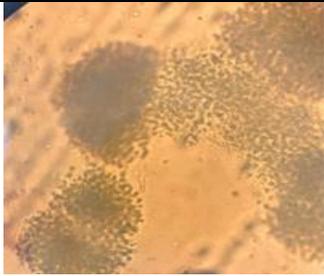
- Pirzan, A. M. y Pong-Masak, P. R. (2016). Relationship between phytoplankton diversity and water quality of Bauluang Island in Takalar Regency, South Sulawesi. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 9(3). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d090314>
- Preisendorfer, R. W. (1986). "Secchi" disk science: Visual optics of natural waters1. *Limnology and Oceanography*, 31(5), 909–926. <https://doi.org/10.4319/lo.1986.31.5.0909>
- Rapal, U. (2010). *Contaminación y eutrofización del agua: Impactos del modelo de agricultura industrial*. RAPAL Uruguay.
- Reid, A. J., "Carlson", A. K., Creed, I. F., Eliason, E. J., Gell, P. A., Johnson, P. T. J., Kidd, K. A., MacCormack, T. J., Olden, J. D., Ormerod, S. J., Smol, J. P., Taylor, W. W., Tockner, K., Vermaire, J. C., Dudgeon, D. y Cooke, S. J. (2019). Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews*, 94(3), 849–873. <https://doi.org/10.1111/brv.12480>
- Sathyendranath, S., Watts, L., Devred, E., Platt, T., Caverhill, C. y Maass, H. (2004). Discrimination of diatoms from other phytoplankton using ocean-colour data. *Marine Ecology Progress Series*, 272, 59–68. <https://doi.org/10.3354/meps272059>
- Schallenberg, M., Winton, M. D. de, Verburg, P., Kelly, D. J., Hamill, K. D. y Hamilton, D. P. (2013). *Ecosystem services of lakes: Ecosystem services in New Zealand: conditions and trends*. Manaaki Whenua Press, Lincoln. https://www.researchgate.net/profile/arvind-singh-21/post/i_need_some_information_about_ecosystem_services_in_salt_lakes_like_urmia_lake_it_will_be_my_pleasure_if_an_expert_is_able_to_help/attachment/59d6538d79197b80779ab6bd/as%3a517838374354944%401500473697377/download/1_15_schallenberg.pdf
- Scheper, T., Liu, J. y Chen, F. (Eds.). (2014). *Microalgae Biotechnology // Biology and Industrial Applications of Chlorella: Advances and Prospects: Biology and Industrial Applications of Chlorella: Advances and Prospects* (Vol. 153). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/10_2014_286
- Smol, J. y Caraballo, P. (2008). *Pollution of lakes and rivers: a Paleoenvironmental perspective*. Wiley, Blackwell.
www.researchgate.net/publication/291808564_Pollution_of_lakes_and_rivers_a_Paleoenvironmental_perspective_2nd_edition_by_John_P_Smol_Blackwell_Publications_Oxford_2008
- Studer, E. (2007a). *La contaminación ambiental del Lago de Yojoa: Un estudio bibliográfico respecto a un sistema de indicadores ambientales* [Postgrado]. Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, Suiza.
https://repositorio.credia.hn/bitstream/handle/123456789/137/2007_contaminacion_ambiental_del_lago_de_yojoa.pdf?sequence=1&isallowed=y
- Studer, E. (2007b). *Evaluación de parámetros físicos, químicos y biológicos. Indicadores del estado trófico del Lago de Yojoa, Honduras* [Postgrado, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, Suiza]. RIS.
- Underwood, A. J. (1984). The vertical distribution and seasonal abundance of intertidal microalgae on a rocky shore in New South Wales. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 78(3), 199–220. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(84\)90159-X](https://doi.org/10.1016/0022-0981(84)90159-X)

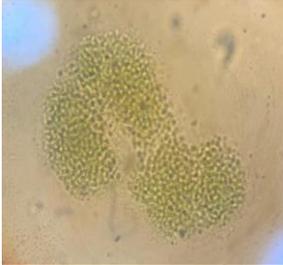
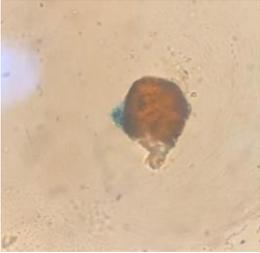
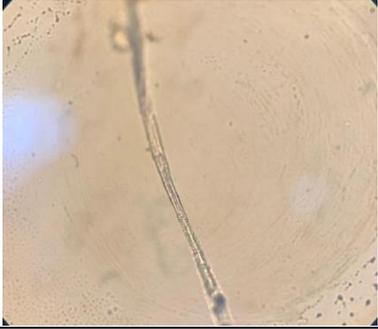
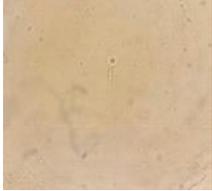
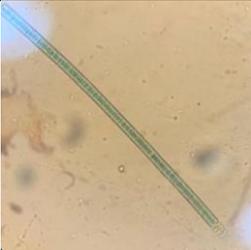
- Valencia, M., Burgos, L. y Espinoza, M. de (1987). Estudio de la calidad de las aguas del Estero del Muerto en base a la concentración de oxígeno disuelto.- Estación fija. *1390-0226*, 4. <https://aquadocs.org/handle/1834/2155>
- Watanabe, M. F. (1996). *Toxic Microcystis: Toxic Microcystis and the Environment*. CRC Press.
- Wurtsbaugh, W. A., Paerl, H. W. y Dodds, W. K. (2019). Nutrients, eutrophication and harmful algal blooms along the freshwater to marine continuum. *WIREs Water*, 6(5). <https://doi.org/10.1002/wat2.1373>
- Yokogawa Fluid Imaging Technologies (2020). FlowCam® Common Source Water Taxa Technical Note. <https://www.kenelec.com.au/wp-content/uploads/2016/01/FlowCam-Common-Source-Water-Taxa-TechNote.pdf>

Anexos

Anexo A

Cuadro de los géneros de fitoplancton encontrados en los meses de muestreo

		
Aulacoseira	Phormidium	Staurastrum
		
Lyngbya	Pediastrum	Coelastrum
		
<i>Microcystis</i>	Oscillatoria	Volvox
		
Chlorella	Gloeocapsa	Woronichia

		
Aphanotece	Aphanocapsa	Polykrikos
		
Peridinium	Limnothrix	Actinastrum
		
Navicula	Anabaena	Synedra
		
Eudorina	Gyrosigma	Mougeotia
		
Plankthorix	Epithemia	Ulnaria