

Floración de *Planktothrix agardhii* en Yahuarcocha, una laguna altoandina hipereutrófica

Planktothrix agardhii bloom in Yahuarcocha, a high-Andean hypereutrophic lake

Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas
Volumen 44. No. 1, Mayo 2023

María de Lourdes Guerra C.*¹, Miriam Steinitz-Kannan², Teresa Vegas Vilarrúbia¹,

¹Universitat de Barcelona, Facultat de Biologia, Departament de Biologia Evolutiva, Ecologia y Ciències Ambientals. Av. Diagonal 643, 08028, Barcelona, España. mlguerrac@yahoo.com ORCID: 0009-0007-7166-3345, tvegas@ub.edu ORCID: 0000-0001-9136-136X

²Northern Kentucky University, Departament de Ciències Biològiques, USA. ORCID:0000-0002-6361-0186

*Autor de correspondència: mlguerrac@yahoo.com

DOI: 10.26807/remcb.v44i1.958

Recibido: 14-04-2023
Aceptado: 25-05-2023
Publicado: 27-05-2023

Como citar este artículo:
Guerra ML, Steinitz-Kannan M, Vegas T. 2023. Floración de *Planktothrix agardhii* en Yahuarcocha, una laguna altoandina hipereutrófica. Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas 44 (1): 35-45. doi: 10.26807/remcb.v44i1.958

Resumen.- La laguna de Yahuarcocha y su cuenca han sufrido una serie de transformaciones a lo largo del tiempo. Gran parte del área en torno a la laguna ha sido y es usada para agricultura. En el año 1972, se construyó una pista automovilística alrededor de laguna, lo que generó una zona urbana destinada básicamente a turismo y hoteles. Aparte de la influencia antrópica, la zona, históricamente, ha sufrido épocas de lluvia y sequías anómalas que han impactado en la dinámica de la laguna. En los años 1977-78, se realizaron los primeros estudios limnológicos, que encontraron clorofíceas, euglenofíceas y diatomeas, y escasa cantidad de cianobacterias. En aquellos estudios se evidenciaron floraciones de *Euglena sanguinea*, que tornaron el agua roja en épocas de sequía. A partir del 2014, los estudios realizados en la laguna han reportado floraciones de la cianobacteria *Raphydiosis raciborskii*. En esta contribución presentamos resultados de los muestreos realizados en los años 2020 y 2021, en época seca y de lluvia, en la laguna de Yahuarcocha. Encontramos una fuerte floración de *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis y Komárek (1988), entre el 75% y el 90% del fitoplancton. Es una cianobacteria, potencialmente tóxica, que no ha sido reportada antes en la laguna, cuya presencia confirmamos a través de análisis de metagenómica en el 2021. Esta cianobacteria podría afectar a la población circundante y turística.

Palabras clave: Lagos poco profundos, lagunas Altoandinas, cianobacterias, algas verdes, eutrofización, hipereutrofización

Abstract.- Yahuarcocha, and its watershed have undergone a series of transformations over time. Much of the surrounding area has been and is used for agriculture. In 1972, an automobile racetrack was built around the lake, which generated an urban zone destined basically for tourism and hotels. In addition to the anthropogenic influence, the area has historically suffered from periods of rain and drought, which have had an impact on the lake's dynamics. In 1977-78, the first limnological studies were carried out; the plankton consisted mainly of Chlorophyceae, Euglenophyceae and diatoms, with a small amount of cyanobacteria. In those studies, blooms of *Euglena sanguinea* were evidenced in times of drought; events that turned the water red. Since 2014, lake studies have found mainly blooms of the cyanobacteria *Raphydiosis raciborskii*. Our studies of plankton collected in the years 2020 and 2021, in the dry and rainy seasons, show strong blooms of the cyanobacteria *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis y Komárek (1988), between 75% and 90% of phytoplankton. This is a potentially toxic cyanobacteria not previously reported from this site. Its presence was confirmed by metagenome analysis in 2021. These cyanobacteria can potentially impact the surrounding population including tourism.

Keywords: Shallow lakes, high Andes lakes, cyanobacteria, blue-green algae, eutrophication, hypereutrophication

Introducción

La laguna de Yahuarcocha ocupa parte del fondo irregular de lo que pudo haber sido un gran cráter o un valle entre colinas volcánicas piroclásticas. Estudios paleolimnológicos, evidencian que se formó en tiempos glaciares tardíos y posglaciares, hace aproximadamente 12500 años (Anton 1987; Colinvaux et al. 1988; Echeverría y Jaramillo 2008).

Yahuarcocha es una laguna poco profunda, cuya profundidad ha variado entre los 3 y 9 metros en tiempos recientes. Está ubicada en la provincia de Imbabura, en un área de acentuada sequía, a 0°23'N, 78°05'E; 5 kilómetros al noreste de la ciudad de Ibarra, a una altitud de 2201 msnm (Terán 1975; Colinvaux et al. 1988). Mantiene su nivel de agua por lluvias; por el agua que llega de las Quebradas de Manzana Huaycu-Santo Domingo y Polo-Golo, cuyo régimen hídrico es intermitente, secándose durante la época seca y por el canal de trasvase del río Tahuando, que abastece a la laguna en época seca, con 16 l/s (Saelens 2015).

La laguna y su cuenca han sufrido una serie de transformaciones a lo largo del tiempo. De acuerdo con estudios paleolimnológicos, la actividad humana en la zona comienza hace 2500 años (Anton 1987). Hay evidencias de la presencia de la cultura Caranqui aproximadamente 1500 años antes del presente, ejemplo de ello son las tolas en la zona y un templo semi-acuático, los Caranquis realizaban cultivos sobre todo maíz y fréjol para ello seguramente aprovecharon las orillas de la laguna (Tobar 1985; Revelo 2017). Los registros del siglo 20 evidencian la presión antrópica en la cuenca; la información obtenida en el año 1987, indicaba que cerca del 25 % del área fue usada para agricultura y únicamente el 1,6 % correspondió a vegetación de páramo (Anton 1987; Colinvaux et al. 1988). Para la ampliación de la zona agrícola se ha desforestado una buena parte de la cuenca, incrementando con ello, el aporte de sedimentos en la laguna. En el año 2008, la empresa Darwinest, que buscaba vestigios arqueológicos, corroboró las publicaciones realizadas sobre la tasa de acumulación anual de sedimentos en la laguna, en las cuales se estimaba un aproximado de 0,33 cm cada año (Terán 1975; Steinitz-Kannan 1979); y calculó que esto habría generado 2,8 m de lodo suelto y una profundidad máxima de la capa sedimentada de 6,90 m (Echeverría y Athens 2016) disminuyendo el volumen de agua.

Por otro lado, la agricultura conlleva el uso de pesticidas sobre todo de glifosato, para erradicar la mala hierba. En el año 2003, el informe del Fonsalci (Fondo de Salvamento del Patrimonio Cultural de Ibarra), reveló que en la cuenca del río Tahuando se encontraron pesticidas organoclorados como el Dieldrin, Endrin (La Hora 2003). Por otro lado la introducción de especies invasoras como el cangrejo rojo de pantano *Procambarus clarkii*, el guppy *Poecilia reticulata* y la carpa *Cyprinus carpio*, han desplazado a las especies nativas por competición, depredación o modificación del ecosistema (Riascos et al. 2018).

Otro impacto antrópico a considerar fue la construcción de la pista automovilística alrededor de Yahuarcocha en 1972 (Anton 1987), convirtiendo el área en turística e incrementando la zona urbana, la misma que en el año 1987 fue de 6,1 %, y actualmente está alrededor del 8% (Asociación de Municipalidades del Ecuador 2010; Saelens 2015). Al convertirse en un área turística, alrededor se instalaron muchos locales de expendio de comida, sobre todo pescado. Esto ha traído un problema de contaminación por el faenamiento de peces, y descarga de aceites y detergentes hacia la laguna (Anton 1987; Saelens 2015; La Hora 2016).

El calentamiento global en curso, ha alterado casi todos los ecosistemas incluidos los ecosistemas acuáticos (Paul 2008; Carey et al. 2012; Paerl 2014). La manifestación de estos cambios, en los ambientes acuáticos suele ser muy rápida ya que el aumento de la temperatura del aire trae como consecuencia, incrementos en la temperatura del agua (Carey et al. 2012; Woolway et al. 2020). Esto da como resultado cambios abióticos y bióticos, convirtiéndolos en ecosistemas vulnerables. Esta vulnerabilidad se presenta con mayor fuerza por la sensibilidad de las especies a las variaciones del medio, lo cual puede producir cambios en la estructura poblacional, en los patrones de asociación a nivel de comunidad, hasta el reemplazo y desaparición de especies locales (Dawson et al. 2011; Terneus et al. 2019). Sólo los organismos caracterizados por una alta tolerancia ecológica pueden hacer frente a tales cambios (Davis et al. 2009). Las cianobacterias, filogenéticamente las algas fotosintéticas más antiguas, son un ejemplo de tales organismos.

Estos procariotas pueden acumular solutos compatibles, que les ayudan a sobrevivir y aclimatarse a condiciones ambientales adversas (Lenard y Poniewozik 2022). Actualmente se ha evidenciado floraciones descontroladas de cianobacterias a nivel mundial, causando el deterioro de los cuerpos de agua (Paul 2008; Bonilla et al. 2009). Este aumento de la frecuencia y la intensidad de las floraciones se ha atribuido a cambios antropogénicos, principalmente al enriquecimiento excesivo de nutrientes y contaminantes, producto del desarrollo urbano, así como del aumento de las actividades agrícolas e industriales (Paul 2008) e introducción de especies invasoras (Riascos et al. 2018).

En general, la región andina del Ecuador tiene un régimen pluviométrico con dos estaciones lluviosas, de febrero a mayo y de octubre a noviembre, con una primera estación seca muy marcada de junio a septiembre, siendo menos acentuada la segunda de diciembre a enero (Pourrut 1983; Varela y Ron 2022). En la cuenca del río Mira, donde se encuentra la laguna, se han registrados largos períodos de sequía y lluvia. Los datos obtenidos del pre-Holoceno y Holoceno evidencian el comienzo de las lluvias y fue el período cuando se llenó la cubeta de Yahuarcocha. Entre los 11500 y 6500 años se alternan periodos de lluvia y sequía, se registra 3 épocas prolongadas de sequía (Anton 1987). En documentos de los años 1917, 1929, 1936 y 1948, hay registros de la disminución de la cota de agua a causa de prolongadas épocas de sequía en la zona (Terán 1975; Tobar 1985; Echeverría y Jaramillo 2008). Toda esta alternancia entre épocas de lluvia y sequía ha dado lugar a cambios en la dinámica de la laguna. En los estudios limnológicos realizados, en Yahuarcocha, en los años 1977-78 y en la década de los 80 y 90 (Steinitz-Kannan 1979; Miller et al. 1984; Anton 1987), se encontró tanto en el fitoplancton como en el fitobentos gran cantidad de diatomeas, clorofíceas, euglenofíceas y pocas cianobacterias. Así también, se reportó que el agua en ocasiones se volvió roja, aspecto causado por floraciones de *Euglena sanguínea* presente; evidenciando en todos estos estudios que la laguna presentó un estado eutrófico (Steinitz-Kannan 1979; Miller et al. 1984; Anton 1987). En el 2003 se reportó la muerte masiva de peces, el Instituto Nacional de Pesca (INP) identificó como causa a bacterias del género *Aeromonas* (Maridueña et al. 2003). En los estudios realizados el año 2014, por Saelens y Van Colen, el fitoplancton estaba dominado por las cianobacterias, sobre todo se reportó la floración de *Raphydiopsis raciborskii*, (antes *Cylindrospermopsis raciborskii*) (Saelens 2015; Van Colen et al. 2017); Van Colen en el estudio indicó que el estado trófico de la laguna, era eutrófico. En el año 2015, en el estudio realizado para determinar el estado trófico de la laguna, se determinó ya una tendencia de estado eutrófico a hipereutrófico (Portilla 2015; Guevara y Morales 2022). Ante el estado crítico de la laguna, en el año 2022 se instalaron equipos de ultrasonido (La Hora 2022), para eliminar las algas; hasta ahora no han tenido éxito.

En vista de esta grave situación, el objetivo principal de nuestro estudio en Yahuarcocha es identificar y cuantificar las microalgas que dominan, actualmente, el plancton de la laguna. En particular confirmar la presencia y la abundancia de cianobacterias indicadores de un estado trófico avanzado y que puedan, posiblemente, producir toxinas y afectar a la población circundante.

Materiales y Métodos

Sitio de estudio.- La laguna de Yahuarcocha (0°23'N, 78°05'E) está ubicada en los Andes del norte del Ecuador, en la provincia de Imbabura, a 5 km al noreste de la ciudad de Ibarra. Tiene un área de 254 ha y 2,5 km de largo; es una laguna poco profunda, con una profundidad máxima registrada en el período de estudio (2020-2021), que osciló entre 6 y 7,1m. La laguna de Yahuarcocha pertenece a la cuenca del río Mira, y a la microcuenca del río Tahuando (Figura 1). La cuenca se caracteriza por tener un clima cálido y templado, con una temperatura promedio anual, que oscila entre 16 y 18° C, y una precipitación media anual de 600 mm (Chen y Chen 2013; Saelens 2015). Sin embargo, el año 2020 fue un año muy seco. La vegetación circundante se compone principalmente de Totora (*Schoenoplectus californicus*). Entre las plantas acuáticas destacan los lechuguines (*Eichhornia crassipes*), que en época de lluvia cubren hasta el 40% de la laguna. Otras especies encontradas son: *Typha dominguensis*, *Miriophyllum aquaticum*, *Potamogeton pusillus*, *Elodea canadensis* y *Azolla filiculoides* (Terneus 2014). Entre la totora se pueden encontrar nidos y aves, algunas migratorias. Entre las aves observadas están Cormoranes (*Phalacrocorax brasilianus*), Patillos o Focha andina (*Fulica ardesiaca*), Gaviota Andina (*Chroicocephalus serranus*), Gavilán (*Geranoaetus polyosoma*) Garza bueyera (*Bubulcus*

ibis) Zambullidor de pico grueso (*Podilymbus podiceps*) Pato rojizo andino (*Oxyura ferruginea*), Garceta grande (*Ardea alba*), Pollona Azul (*Porphyrio martinicus*), Garcita Azulada (*Butorides striata*) Pollona negra (*Gallinula galeata*) y Garza Bruja (*Nycticorax nycticorax*). Las especies de peces presentes son introducidas. El zooplancton se caracteriza por rotíferos de los géneros *Brachionus* y *Keratella*, copépodos ciclopoideos del género *Acanthocyclops* y branchiopoda del género *Daphnia* (Van Colen et al. 2017).

Muestreos.- En el mes de noviembre del año 2020 y marzo del 2021, en época seca y época de lluvia respectivamente, entre las 11:00 y 12:00 del día, hora en que se espera que la productividad primaria sea alta, se tomaron muestras de agua en puntos establecidos, considerando el punto más profundo y las orillas opuestas de la laguna Yahuarcocha (Figura 1). Para caracterizar el agua del lago se realizaron perfiles de profundidad y se capturaron muestras de agua para análisis. Se realizaron mediciones de pH, conductividad eléctrica de la laguna, temperatura y oxígeno a cada metro de profundidad, con un equipo multiparamétrico marca Hach en el punto más profundo (según la batimetría de la laguna, Figura 1). Con la ayuda de una botella Van Dorn, se tomó una muestra y una réplica de agua, de 1 litro cada una, a tres metros de profundidad; que fueron llevadas al laboratorio para el análisis de parámetros químicos: alcalinidad, Fosfato (PO₄), Nitrógeno Total (NT), así como también para análisis de clorofila-*a*. Los análisis de agua fueron realizados por los técnicos del laboratorio la Empresa Municipal de Agua Potable Sede Ibarra (EMAPA-I), de acuerdo con el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Health Association et al. 2017)

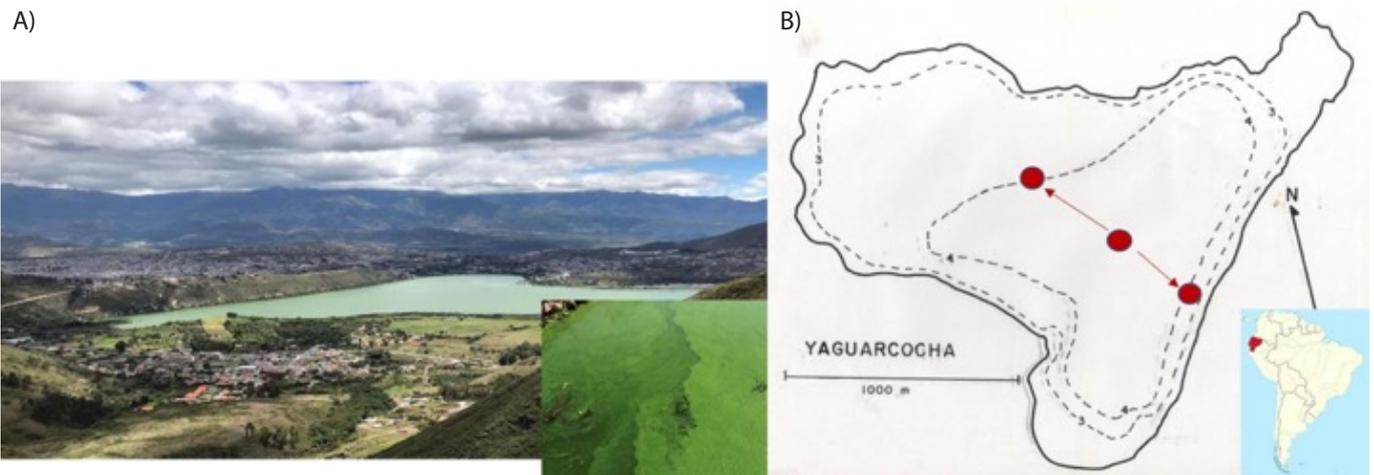


Figura 1. A) Laguna de Yahuarcocha y color verde intenso del agua por la floración, B) Mapa de Batimétrico (Steinitz-Kannan, M.) y puntos de muestreo

Identificación del fitoplancton.- Para la determinación del fitoplancton, se tomaron cinco muestras, con red de plancton, de 63 μ de diámetro de poro, marca Wildco. Tres de ellas se tomaron desde el fondo hasta la superficie, una en el punto más profundo de la laguna, y dos en las orillas (orilla 1 u orilla oeste), (orilla 2 u orilla este); para las dos restantes se hizo un arrastre desde el centro hacia la orilla 1 y otro hacia la orilla 2. Las muestras se colocaron en frascos de 50 ml, se añadió lugol para preservarlas y se llevaron al laboratorio para su posterior análisis. Las muestras fueron analizadas a 400 y 1000 aumentos, con la ayuda de un microscopio óptico binocular marca Motic modelo Panthera E. Para el conteo de las células se utilizó la técnica por campos (Gómez et al. 2009)

Resultados

Tanto en el período seco como en el de lluvia, la laguna se caracterizó por tener un color verde intenso y no presentó ningún olor que pudiera sugerir un estado de descomposición. En época seca, la visualización del disco de Secchi fue de 0,25 m y en época de lluvia de 0,24 m. Los valores de la temperatura ambiental en época seca y de lluvia no presentaron diferencia significativa,

fueron de 21 °C, y 20,8 °C respectivamente. Con relación al pH, en época seca fue de 8,73 y en época de lluvia de 8.97 (Tabla 1).

De los parámetros medidos en profundidad, tanto en la época seca como de lluvia, las concentraciones de oxígeno disuelto a nivel superficial presentaron sobresaturación, mientras que hacia el fondo descendieron abruptamente, 13,2 ppm, y 1,20 ppm; 12,41 ppm, y 0,96 ppm respectivamente (Figura 2 y Tabla 1). Los valores de temperatura, a nivel superficial y a lo largo de la columna de agua fueron similares tanto en época seca como de lluvia, 23,4 °C, y 21,1 °C; 23,6 °C y 20,4 °C, respectivamente (Figura 2). La profundidad del agua, en época seca fue de 6 m y en época de lluvia de 7,1 m (Figura 2).

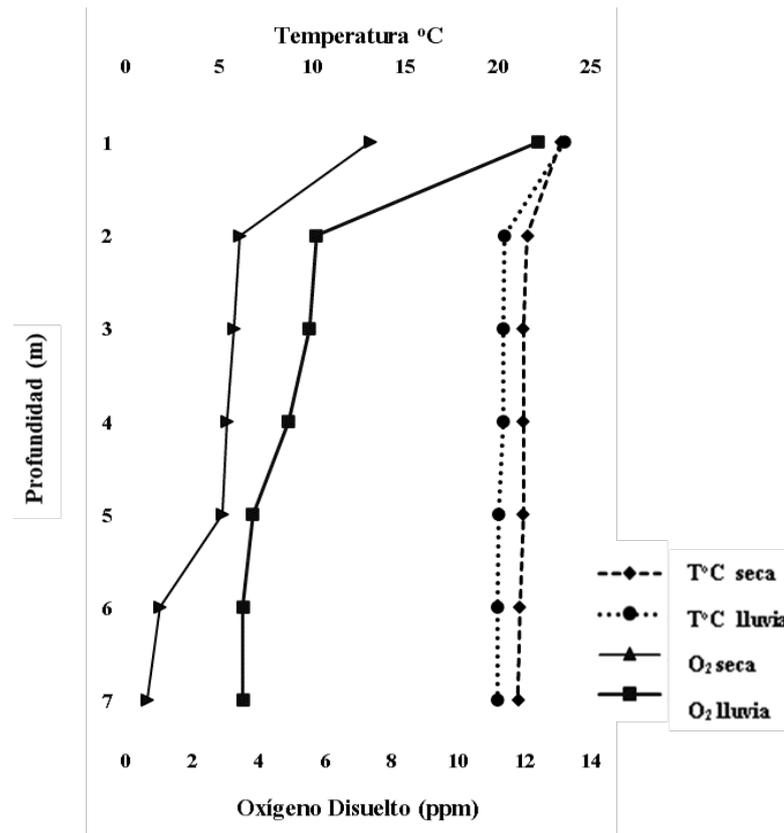


Figura 2. Comportamiento del oxígeno y temperatura a lo largo de la columna de agua de la laguna de Yahuarcocha en las épocas seca y de lluvia (2020 – 2021)

El pH y los valores de alcalinidad evidencian la condición alcalina del agua durante los dos periodos (Tabla 1). Comparando las diferencias de los parámetros químicos entre las épocas seca del 2020 y de lluvia del 2021, se observa que el fósforo en forma de fosfato (PO_4) fue muy elevado en los dos periodos con un incremento en el 2021. Con relación al nitrógeno total (NT), el comportamiento fue similar al del fósforo, se registró en el 2020 una concentración alta que aumentó en el 2021, (Tabla 1). Con relación a la concentración de clorofila-*a*, en la época seca fue elevada, 74,51 $\mu\text{g/l}$ y en la época de lluvia casi se triplicó (224,8 $\mu\text{g/l}$).

Tabla 1. Condiciones fisicoquímicas y biológicas en la laguna de Yahuarcocha durante la época seca del año 2020 y época lluviosa del año 2021

Época	Alcal meq l ⁻¹	Chl-a $\mu\text{g/L}$	Cond ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	PO ₄ - mg/L	TN mg/L	OD (ppm) superficie	OD (ppm) Fondo	pH	ToC Superf.	Secchi (m)	Prof (m)	P. agardhii (%)
seca	384	74,51	686	0,06	5	13,2	1,2	8,73	23,4	0,25	6	75,2
lluvia	288	224,8	610	1,05	5,19	12,41	0,96	8,97	23,6	0,24	7,1	90,1

mg/l – miligramos por litro; $\mu\text{g/l}$ – microgramos/litro; ppm – partes por millón

En cuanto al análisis fitoplanctónico, en época seca se contabilizaron 3965 células y/o filamentos, en cinco campos y en época lluviosa 3681 células y/o filamentos, en cuatro campos. El 90,4 % y el 96,2 % de las células en época seca y de lluvia respectivamente corresponden a cianobacterias. De las 18 especies encontradas de cianobacterias en época seca, la más abundante fue *Planktothrix agardhii* (Tabla 2), conformando el 75,2 % de las células. De las 9 especies encontradas en época lluviosa el 90,1 % de las células corresponden a *P. agardhii*. El porcentaje restante en época seca corresponde a 16 especies de clorofíceas, 10 de diatomeas y otras algas del grupo de los euglenoides, *Trachelomonas*, (Tabla 2). En época de lluvia el porcentaje restante corresponde a 6 especies de clorofíceas, 3 de diatomeas (Tabla 2) además de otras algas del grupo de los euglenoides, *Trachelomonas*, Euglena.

Tabla 2. Géneros de algas presentes en la laguna de Yahuarcocha durante la época seca del año 2020 y época de lluvia del año 2021

Año	Cianobacteria	Clorofíceas	Diatomeas
2020	<i>Anabaenopsis sp.</i>	<i>Pandorina sp.</i>	<i>Amphora ovalis</i>
	<i>Aphanizonemon sp.</i>	<i>Oocystis sp.</i>	<i>A. granulata</i>
	<i>Borzia sp.</i>	<i>Monoraphidium</i>	<i>Epithemia sp.</i>
	<i>Chrococcus turgidus</i>	<i>Ankistrodesmus</i>	<i>Eunotia sp.</i>
	<i>Cylindrospermum sp.</i>	<i>Closterium sp.</i>	<i>Gomphonema sp.</i>
	<i>Dolichospermum sp.</i>	<i>Lacunastrum simplex</i>	<i>G. sphaerophorum</i>
	<i>Gloeocapsa sp.</i>	<i>Oedogonium sp.</i>	<i>Melosira sp.</i>
	<i>Limnothrix sp.</i>	<i>Pediastrum sp.</i>	<i>Navicula sp.</i>
	<i>Microcystis sp.</i>	<i>Pediastrum boryanum</i>	<i>Nitzschia sp.</i>
	<i>Oscillatoria sp.</i>	<i>Pediastrum simplex</i>	<i>Tabellaria sp.</i>
	<i>Planktolingbya sp.</i>	<i>Peridinium sp.</i>	
	<i>Planktothrix agardhii</i>	<i>Pseudopediastrum</i>	
	<i>Planktothrix rubescens</i>	<i>Scenedesmus sp.</i>	
	<i>Planktothrix sp.</i>	<i>Sphaerocystis sp.</i>	
	<i>Raphydiopsis mediterranea</i>	<i>Staurastrum sp.</i>	
	<i>Raphydiopsis raciborskii</i>	<i>Tetraedron sp.</i>	
	<i>Snowella sp.</i>		
<i>Synetochoccus sp.</i>			
2021	<i>Cylindrospermum sp.</i>	<i>Lacunastrum sp.</i>	<i>Nitzschia sp.</i>
	<i>Chrococcus sp.</i>	<i>Monoraphidium acuaticum</i>	<i>Nitzschia closterium</i>
	<i>Limnothrix sp.</i>	<i>Mougeotia sp.</i>	<i>Melosira sp.</i>
	<i>Oscillatoria sp.</i>	<i>Oedogonium sp.</i>	
	<i>Planktothrix agardhii</i>	<i>Oocystis solitaria</i>	
	<i>Planktothrix rubescens</i>	<i>Scenedesmus sp.</i>	
	<i>Planktothrix sp.</i>		
	<i>Raphydiopsis raciborskii</i>		
<i>Snowella sp.</i>			

Discusión

La laguna de Yahuarcocha tiene una larga historia de eutrofización por ser poco profunda, y drenar una amplia cuenca con más de 2500 años de impacto humano. Su nombre que significa "laguna de sangre" refleja las floraciones de algas como *Euglena sanguinea* que tornan el agua roja. Bandas rojas reflejando estas floraciones son comunes en los sedimentos de la laguna (Anton 1987). Sin embargo, las floraciones de cianobacterias se han observado en esta laguna solamente en los últimos 10 años (desde 2014). El género *Raphydiopsis* (antes *Cylindrospermopsis*) fue identificado como dominante en 2014 (Saelens 2015; Van Colen et al. 2017). Posteriormente,

durante el período 2020-21, en época seca y época de lluvia, nuestros estudios detectaron por primera vez en la laguna, intensas floraciones de *Planktothrix agardii*. Dada su importancia ecológica y sanitaria, la identidad de la especie fue inmediatamente confirmada con un análisis metagenómico efectuado el año 2021, con el secuenciador Illumina NextSeq 2000 y al mismo tiempo se investigó la probable presencia de toxinas, con el método de Espectrometría de Masas y Cromatografía Líquida UltraPerformance (UPLC/MS/MS) (Guerra et al. 2023). *Planktothrix agardii* – (Gomont) Anagnostidis y Komárek (1988), es una cianobacteria del orden de las Oscillatoriales; responde a diferentes factores limitantes como el fósforo, el nitrógeno, la temperatura e intensidad de la luz (Paerl y Huisman 2008; Moreno et al. 2010). *Planktothrix agardii*, de acuerdo con los estudios realizados sobre el nicho que ocupa, por lo general, se encuentra en lagos poco profundos, donde hay mucha radiación, en capas inferiores; esta cianobacteria utiliza el nitrógeno en la forma de amonio (Lenard y Poniewozik 2022). Se les encuentra en lagos con alta alcalinidad (Reynolds et al. 2002). Además de tener una capacidad notable para la regulación sensible de la flotabilidad, la especie tiene una poderosa facilidad para adaptación cromática durante la estratificación profunda en el gradiente de luz (Lenard y Poniewozik 2022). Es un alga que puede producir hepatotoxinas y neurotoxinas, aparte de eso puede causar problemas en la piel (Lucena 2008).

Como se desprende de los resultados presentados en este trabajo, tales floraciones han causado que la penetración de luz sea escasa, lo cual probablemente ha reducido, tanto la cantidad de plantas acuáticas sumergidas, como *Myriophyllum* como también la diversidad de otras algas planctónicas y bentónicas como las diatomeas. Estas floraciones de cianobacterias, las altas concentraciones de clorofila-*a* (74,4 µg/L en 2020 y de 224,8 µg/L en el 2021) y la transparencia baja del agua (< 25 cm) indican que la laguna ahora podría haber entrado en un estado hipereutrófico. Durante el período 2014-15, Van Colen et al. (2017) encontró un aumento de la concentración de clorofila (185 µg/L) a partir del segundo semestre del año 2014, coincidiendo con la floración de *Raphidiopsis raciborskii* y mayor turbidez, por lo que indica que Yahuarcocha ya se encontraba en un estado eutrófico.

Es importante notar que Yahuarcocha es una laguna poco profunda y eutrofizada, donde las floraciones se han dado en diferentes épocas y con diferentes especies de algas. Actualmente, las altas temperaturas asociadas con el calentamiento global y el incremento de nutrientes y pesticidas que ahora recibe la laguna son las causas más probables de mantener y agravar este estado. El propósito del manejo de la laguna debería ser la prevención de estas floraciones nocivas. La erradicación de los organismos invasores; el uso de un método de biomanipulación para reducir las floraciones de cianobacterias y reintroducir las plantas acuáticas sumergidas (Scheffer et al. 1993; Davidson et al. 2023), contribuiría a alcanzar el objetivo de mejorar el estado de Yahuarcocha.

Los procesos de eutrofización de lagos poco profundos representan, un problema poco estudiado en el ámbito mundial. Algunas de las lagunas presentan niveles de nutrientes que están entre los más altos reportados en la literatura sobre lagos naturales. La acción humana ha incrementado sustancialmente esas cargas (Quirós et al. 2002). Las lagunas turbias constituyen un estado avanzado de hipereutrofización, caracterizado por una relación N:P relativamente baja, frecuentes florecimientos de algas. Además, este tipo de lagunas es más proclive a presentar florecimientos de cianobacterias (Izaguirre y Vinocur 1994).

El aumento de las temperaturas favorece a las cianobacterias, que generalmente crecen mejor, a temperaturas más altas (a menudo por encima de 20 °C), que otras especies del fitoplancton como diatomeas y algas verdes, dándoles una ventaja competitiva. Las algas superficiales flotantes generan una sombra subyacente, donde se encuentra el fitoplancton no flotante, suprimiendo así a sus oponentes a través de la competencia por la luz (Lund 1965; Robarts y Zohary 1987; Paerl y Huisman 2008).

Finalmente, a partir de este estudio se recomiendan las siguientes actividades: evitar la extracción la tatora que crece alrededor de la laguna, desarrollar una regulación para evitar el ingreso de nutrientes a la laguna de Yahuarcocha. Se recomienda colocar una planta de tratamiento para

aguas servidas. Los gobiernos locales, deberían establecer regulaciones para el manejo del turismo. Concientizar a la gente que vive en los alrededores de la laguna y/o que hace uso de ella, que procure no utilizar el agua de la laguna, por el alto grado de toxicidad en que se encuentra actualmente.

Conclusiones

Durante la época seca del 2020 y época de lluvia del 2021, se evidenció una intensa floración en la laguna de Yahuarcocha, de la cianobacteria *Planktothrix agardhii*, razón por la cual ha bajado la biodiversidad registrada en estudios anteriores.

Según la transparencia tan baja y la clorofila-*a* tan alta en los períodos de sequía y lluvia de los años 2020-2021, y la presencia de floraciones de cianobacterias, se sugiere que la laguna de Yahuarcocha ha entrado en un estado hipereutrófico.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración a la Ing. Carla Valarezo directora del departamento de Química de la EPMAP-I por la realización de los análisis de agua. Al Capitán Fabián López director del cuerpo de Bomberos de Ibarra, por su colaboración prestándonos la embarcación. A Edith Montalvo por su asistencia en el campo. Agradecemos también a los revisores por sus valiosas observaciones.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses en publicar este artículo.

Contribución de los autores

MLG: Concepción y diseño del estudio, diseño experimental, colección de datos, análisis e interpretación de datos, redacción de la versión inicial del manuscrito, revisión del manuscrito, gestión de financiamiento

MSK: Concepción y diseño del estudio, análisis e interpretación de datos, redacción de la versión inicial del manuscrito, revisión del manuscrito.

TVV: Análisis e interpretación de datos, revisión del manuscrito.

Referencias bibliográficas

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23RD Edition. Washington DC. USA: American Public Health Association.

Anton A. 1987. Paleolimnology of an Equatorial lake in the Inter-Andean Plateau of Ecuador [Ph.D Dissertation]. [Columbus, OH. USA]: The Ohio State University.

Asociacion de Municipalidades del Ecuador A. 2010. Cantón Ibarra. AME. <https://ame.gob.ec/2010/05/20/canton-ibarra/>.

Bonilla S, Aubriot L, Brena B, Britos A, Conde D, Challar G, De Leon L, Fabre A, Gabito L, Gravier A, et al. 2009. Cianobacterias Planctónicas del Uruguay Manual para la identificación y medidas de gestión.

Carey C, Ibelings BW, Hoffmann EP, Hamilton DP, Brookes JD. 2012. Eco-physiological adaptations that favour freshwater cyanobacteria in a changing climate. *Water Research*. 46(5):1394–1407. doi:10.1016/j.watres.2011.12.016.

Chen D, Chen HW. 2013. Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. *Environmental Development*. 6:69–79. doi:10.1016/j.envdev.2013.03.007.

Colinvaux P, Olson K, Liu K-B. 1988. Late-glacial and holocene pollen diagrams from two endorheic lakes of the inter-andean plateau of Ecuador. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 55(1):83–99. doi:10.1016/0034-6667(88)90055-3.

- Davidson T, Sayer C, Jeppesen E, Søndergaard M, Lauridsen TL, Johansson LS, Baker A, Graeber D. 2023. Bimodality and alternative equilibria do not help explain long-term patterns in shallow lake chlorophyll-a. *Nat Commun.* 14(1):398. doi:10.1038/s41467-023-36043-9.
- Davis TW, Berry DL, Boyer GL, Gobler CJ. 2009. The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of *Microcystis* during cyanobacteria blooms. *Harmful Algae.* 8(5):715–725. doi:10.1016/j.hal.2009.02.004.
- Dawson T, Jackson S, House J, Prentice IC, Mace GM. 2011. Beyond Predictions: Biodiversity Conservation in a Changing Climate. *Science.* 332(6025):53–58. doi:10.1126/science.1200303.
- Echeverría J, Athens JS. 2016. Investigación subacuática en las lagunas de Yahuarcocha, San Pablo, Mojanda, Provincia de Imbabura, Ecuador. *Revista de Arqueología Americana.*(34): 125–142. doi:10.35424/rearam342016%.
- Echeverría J, Jaramillo X. 2008. Laguna de Yahuarcocha: patrimonio natural y cultural de la sierra norte del Ecuador. [Ibarra], Ecuador: Casa de la Cultura Ecuatoriana. Núcleo de Imbabura.
- Gómez N, Donato JC, Georgi A, Huash H, Mateo P, Sabater S. 2009. La biota de los ríos: los microorganismos autótrofos. In: *Conceptos y técnicas en ecología fluvial.* BBVA. p. 26.
- Guerra M, Oerhle S, Steinitz-Kannan M, Cooper J. 2023. Metagenome-Assembled Genome Sequence of *Planktothrix agardhii* from a Toxic Cyanobacterial Bloom in Yahuarcocha, a Tropical Shallow Lake in Ecuador. *Microbiology Resource Announcements.*:2.
- Guevara V, Morales A. 2022. Evaluación de cianobacterias en el lago eutrófico Yahuarcocha por medio de estudio de secuencias de ADN [bachelorThesis].
- Izaguirre I, Vinocur A. 1994. Typology of shallow lakes of the Salado River basin (Argentina), based on phytoplankton communities. *Hydrobiologia.*(277):49–62.
- La Hora. 2003. Más químicos en la cuenca del Tahuando. <https://www.lahora.com.ec/secciones/m-s-qu-micos-en-la-cuenca-del-tahuando/>.
- La Hora. 2016. Desechos de pescados, un problema que sigue latente en Yahuarcocha. <https://www.lahora.com.ec/noticias/desechos-de-pescados-un-problema-que-sigue-latente-en-yahuarcocha/>.
- La Hora. 2022. Yahuarcocha tiene 400 veces más algas de lo normal. <https://www.lahora.com.ec/imbabura-carchi/yahuarcocha-contaminacion-algas-ultrasonido-mayo-2022/>.
- Lenard T, Poniewozik M. 2022. *Planktothrix agardhii* versus *Planktothrix rubescens*: Separation of Ecological Niches and Consequences of Cyanobacterial Dominance in Freshwater. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 19(22):14897. doi:10.3390/ijerph192214897.
- Lucena E. 2008. Aspectos Sanitarios de las Cianotoxinas. *Higiene y Sanidad ambiental.* 8:291–302.
- Lund J. 1965. The Ecology of the Freshwater Phytoplankton. *Biological Reviews.* 40(2):231–290. doi:10.1111/j.1469-185X.1965.tb00803.x.
- Maridueña A, Chalén N, Coello D, Cajas J, Solís P, Aguilar F, Elías E. 2003. Mortandad de peces en la Laguna de Yahuarcocha cantón Ibarra – Provincia de Imbabura, febrero 2003. Sección Peces. Taxonomía y características generales de los peces identificados en la Laguna Yahuarcocha. INP, Municipalidad de Ibarra.
- Miller M, Kannan M, Colinvaux PA. 1984. Limnology and primary productivity of Andean and Amazonian tropical lakes of Ecuador. *SIL Proceedings, 1922-2010.* 22(2):1264–1270. doi:10.1080/03680770.1983.11897482.

- Moreno D, Quintero J, López A. 2010. Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*. 78:25–33.
- Paerl H. 2014. Mitigating Harmful Cyanobacterial Blooms in a Human- and Climatically-Impacted World. *Life*. 4(4):988–1012. doi:10.3390/life4040988.
- Paerl H, Huisman J. 2008. Blooms Like It Hot. *Science* (New York, NY). 320:57–8. doi:10.1126/science.1155398.
- Paul V. 2008. Global warming and cyanobacterial harmful algal blooms. In: Hudnell HK, editor. *Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: State of the Science and Research Needs*. Vol. 619. New York, NY: Springer New York. (Back N, Lajtha A, Paoletti R, Cohen IR, Lambris JD, editors. *Advances in Experimental Medicine and Biology*). p. 239–257.
- Portilla K. 2015. Evaluación del Comportamiento de los Parámetros Físicos del Agua, para determinar el estado trófico Del lago Yahuarcocha, Provincia Imbabura [bachelorThesis].
- Pourrut P. 1983. *Los Climas del Ecuador. Fundamentos Explicativos*.
- Quirós R, Rennella AM, Boveri MA, Rosso JJ, Sosnovsky A. 2002. Factores que afectan la estructura y el funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología austral*. 12(2):175–185.
- Revelo C. 2017. Evaluación del Balance Hidrológico y establecimiento de Estrategias para la Conservación del Recurso Hídrico del Lago Yahuarcocha [Tesis]. [Ecuador]: Universidad Técnica del Norte.
- Reynolds C, Huszar V, Kruk C, Naselli-Flores L, Melo S. 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*. 24:417–428. doi:10.1093/plankt/24.5.417.
- Riascos, L, Geerts A, Oña T, Van der Hayden C. 2018. DNA-based monitoring of the alien invasive North American crayfish *Procambarus clarkii* in Andean lakes (Ecuador) | Elsevier Enhanced Reader. *Limnologia*.(70):20–25. doi:10.1016/j.limno.2018.02.002.
- Robarts R, Zohary T. 1987. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 21:391–399. doi:10.1080/00288330.1987.9516235.
- Saelens P. 2015. Ecological functioning of a eutrophic, high-altitude shallow lake in Ecuador, Laguna Yahuarcocha.
- Scheffer M, Hosper SH, Meijer M-L, Moss B, Jeppesen E. 1993. Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in Ecology Evolution*. 8(8):275–279. doi:10.1016/0169-5347(93)90254-M.
- Steinitz-Kannan M. 1979. Comparative Limnology of Ecuadorian Lakes. A study of species number and composition of plankton communities of the Galapagos Islands and the Equatorial Andes. [Ph.D Dissertation]. [Columbus, OH. USA]: The Ohio State University.
- Terán F. 1975. Cartilla de divulgación ecuatoriana No. 2. Nuestras lagunas andinas geografía e historia.
- Terneus E. 2014. Vegetación acuática y estado trófico de las lagunas andinas de San Pablo y Yahuarcocha, provincia de Imbabura, Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*. 35(1–2):121–131. doi:10.26807/remcb.v35i1-2.255.
- Terneus E, Vallejo B, Gómez de la Torre M. 2019. Impactos del cambio climático sobre la flora acuática de las Lagunas Verdes, volcán Chiles, Ecuador. *BC*. 20(2). doi:10.21068/c2019.v20n02a02.

Tobar C. 1985. Monografía de Ibarra. Tercera edición. Ibarra, Ecuador: Centro de Ediciones Culturales de Imbabura.

Van Colen W, Portilla K, Oña T, Wyseure G, Goethals P, Velarde E, Muylaert K. 2017. Limnology of the neotropical high elevation shallow lake Yahuarcocha (Ecuador) and challenges for managing eutrophication using biomanipulation. *Limnologica*. 67:37–44. doi:10.1016/j.limno.2017.07.008.

Varela A, Ron S. 2022. Geografía y clima. <https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb/GeografiaClima/>

Woolway RL, Kraemer BM, Lenters JD, Merchant CJ, O'Reilly CM, Sharma S. 2020. Global lake responses to climate change. *Nat Rev Earth Environ*. 1(8):388–403. doi:10.1038/s43017-020-0067-5.