



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA PARA LA GESTIÓN DE LOS
RECURSOS HÍDRICOS**

TEMA

**EVALUACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO EN RELACIÓN AL
COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y BIOLÓGICOS DE
LA LAGUNA EL VOLADERO, DEL NORTE DEL ECUADOR.**

**Tesis previa a la obtención del Título de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería para la Gestión de los Recursos Hídricos**

AUTORA: Katerine Dayanara Vizcaíno Cadena

DIRECTOR: Ing. Delia Elizabeth Velarde Cruz PhD.

IBARRA, JUNIO 2025

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y las oportunidades para llegar hasta aquí. A mis padres, que, con su amor incondicional, apoyo constante y fe en mí, me han dado la motivación para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Su ejemplo de esfuerzo y dedicación ha sido la mayor inspiración para culminar este reto. Gracias por enseñarme a no rendirme y por estar siempre a mi lado.

A mi directora de tesis, Elizabeth Velarde, y al equipo técnico del Laboratorio de Investigaciones Ambientales LABINAM, mi más profundo agradecimiento por su paciencia, dedicación y asesoría a lo largo de este proceso. Su orientación no solo ha sido clave para el desarrollo de este trabajo, sino también para mi crecimiento como profesional.

Dayanara

DEDICATORIA

A mi amada familia, por ser el pilar de mi vida. Este logro es tanto de ustedes como mío, ya que cada paso que he dado ha sido impulsado por su amor, su comprensión y su inquebrantable apoyo.

A mis hijos, quienes son mi mayor motivación y la razón por la cual siempre quiero superarme. A ustedes les dedico este título con todo mi corazón, con la esperanza de que mi esfuerzo les sirva como inspiración para que nunca dejen de luchar por sus sueños. Cada sacrificio ha valido la pena al saber que les doy lo mejor de mí, no solo como profesional, sino también como madre.

Este logro es por y para ustedes, mi mayor tesoro.

Dayanara



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0401871264		
APELLIDOS Y NOMBRES:	VIZCAÍNO CADENA KATERINE DAYANARA		
DIRECCIÓN:	Calle A 3-23 y Av. Jaime Roldós		
EMAIL:	kdvizcainoc@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0986425004

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	EVALUACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO EN RELACIÓN AL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y BIOLÓGICOS DE LA LAGUNA EL VOLADERO, DEL NORTE DEL ECUADOR.
AUTOR (ES):	VIZCAÍNO CADENA KATERINE DAYANARA
FECHA: DD/MM/AAAA	24/06/2025
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	☐ PREGRADO ☒ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA PARA LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS
ASESOR /DIRECTOR:	ING. DELIA ELIZABETH VELARDE CRUZ MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 24 días del mes de junio de 2025

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Katherine Dayanara Vizcaino Cadena



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE POSGRADO



Ibarra, 24 de junio de 2025

Dra.
Lucía Yépez
DECANA FACULTAD DE POSGRADO

ASUNTO: Conformidad con el documento final

Señora Decana:

Nos permitimos informar a usted que revisado el Trabajo final de Grado "EVALUACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO EN RELACIÓN AL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y BIOLÓGICOS DE LA LAGUNA EL VOLADERO, DEL NORTE DEL ECUADOR" del maestrante Katherine Dayanara Vizcaíno Cadena, de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería para la Gestión de los Recursos Hídricos. certificamos que han sido acogidas y satisfechas todas las observaciones realizadas.

Atentamente,

	Apellidos y Nombres	Firma
Director	Ing. Delia Elizabeth Velarde Cruz PhD.	 Firmado digitalmente por: DELIA ELIZABETH VELARDE CRUZ Validar únicamente con FIDUCIA
Asesor	Ing. Jairo Santiago Cabrera García MSc.	 Jairo Santiago Cabrera García Time Stamping Security Data

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA.....	1
1.1. Interrogantes	3
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos	4
CAPÍTULO II.....	5
MARCO REFERENCIAL	5
2.1. Marco Teórico	7
2.1.1. Procesos de eutrofización en lagos tropicales	7
2.1.1.1. Estado trófico de lagos altoandinos	7
2.1.1.2. Índice de estado trófico.....	8
2.1.2. Parámetros morfológicos	9
2.1.3. Parámetros de monitoreo	10
2.1.3.1. Comportamiento de los parámetros físicos en los lagos tropicales	10
2.1.3.2. Comportamiento de los parámetros biológicos (comunidades planctónicas) en los lagos	12
2.1.3.3. Comunidades planctónicas como indicadores biológicos de la calidad del agua	12
2.1.4. Variabilidad temporal del fitoplancton.....	14
2.1.5. Variabilidad temporal del zooplancton.....	14
2.1.6. Batimetría	15
2.2. Marco legal.....	15
CAPÍTULO III	18

MARCO METODOLÓGICO	18
3.1. Área de estudio	18
3.2. Monitoreo	19
3.2.1. Condiciones climáticas del área de estudio	20
3.2.2. Parámetros morfológicos de la laguna El Voladero	20
3.3. Parámetros físico químicos.....	21
3.4. Fitoplancton	21
3.4.1. Experimentos in situ	23
3.4.1.1. Limitación de nutrientes	24
3.4.2. Influencia de la intensidad de la luz y la radiación UV en el desarrollo del fitoplancton.....	24
3.4.2.1. Extracción de Clorofila.....	24
3.5. Zooplancton	25
3.6. Estadística.....	26
CAPÍTULO IV	27
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4.1. Condiciones climáticas.....	27
4.2. Parámetros morfométricos de la laguna El Voladero	28
4.3. Parámetros físicos-químicos.....	32
4.4. Identificación de fitoplancton.....	34
4.4.1. Índices de biodiversidad	36
4.4.1.1. Índice de biodiversidad de Shannon- Weaver	36
4.4.1.2. Índice de dominancia de Simpson	39
4.4.2. Experimento in situ.....	42
4.5. Identificación de zooplancton.....	44

4.5.1. Índice de biodiversidad de Shannon-Wiener.....	45
4.6. Índice del estado trófico	46
4.7. Análisis de Correspondencia Canónica (ACC)	48
CAPÍTULO V.....	52
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
5.1. Conclusiones.....	52
5.2. Recomendaciones	53
REFERENCIAS	54
ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ecuaciones para estimar el estado trófico de acuerdo a los indicadores de eutrofia.....	9
Tabla 2. Rango de valores del estado trófico.....	9
Tabla 3. Parámetros morfométricos de la laguna El Voladero.....	29
Tabla 4. Parámetros físico-químicos	33
Tabla 5. Especies identificadas de fitoplancton.....	34
Tabla 6. Valores del Índice de Shannon-Wiener en las estaciones de muestreo.....	37
Tabla 7. Valores del Índice de dominancia de Simpson.....	40
Tabla 8. Valores de riqueza aplicando la rarefacción de las muestras	41
Tabla 9. Identificación de zooplancton.....	44
Tabla 10. Valores de los indicadores del TSI	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la laguna El Voladero.....	19
Figura 2. Puntos de muestreo en la laguna El Voladero.....	20
Figura 3. Climograma de la estación meteorológica El Ángel.....	27
Figura 4. Mapa batimétrico de la laguna El Voladero.....	29
Figura 5. Perfiles de profundidad correspondientes a los transectos A, B de la laguna El Voladero	31
Figura 6. Curva hipsográfica relativa	32
Figura 7. Riqueza de fitoplancton.....	37
Figura 8. Abundancia de especies de fitoplancton	38
Figura 9. Abundancia relativa a nivel de phylum de fitoplancton	39
Figura 10. Relación entre índice de Shannon-Weaver e Inverso de Simpson.....	40
Figura 11. Curva de acumulación de especies.....	41
Figura 12. Curva de rarefacción	42
Figura 13. Prueba estadística de los experimentos in situ	44
Figura 14. Abundancia de especies de zooplancton	46
Figura 15. Análisis de correspondencia canónica entre variables fisicoquímicas con especies de fitoplancton.....	49
Figura 16. Análisis de correspondencia canónica entre variables fisicoquímicas con especies de zooplancton.....	51

RESUMEN

Los lagos andinos ecuatoriales son esenciales para el consumo humano, la pesca y la agricultura, pero se enfrentan a amenazas debido al cambio climático. La investigación sobre estos ecosistemas se ve limitada por la escasez de estudios limnológicos. Este estudio se centró en la laguna de El Voladero, en el norte de Ecuador, y analizó parámetros fisicoquímicos y biológicos para determinar su estado trófico. Se caracterizaron las condiciones climáticas, morfológicas, físicas y químicas, así como las taxonomías del fitoplancton y zooplancton, utilizando datos de una estación meteorológica y un estudio batimétrico, además de análisis en cuatro estaciones de muestreo. Los resultados mostraron que el crecimiento de las comunidades planctónicas depende del nitrógeno y el fósforo como nutrientes limitantes. La laguna, de 0,64 km² y forma subcircular, es poco profunda, con una profundidad máxima de 2,1 m. Se identificaron 32 géneros de fitoplancton, siendo *Botryococcus* y *Oocystis* los más abundantes, característicos de los lagos oligotróficos. El zooplancton, de baja diversidad, incluye especies de cladóceros, copépodos y rotíferos, siendo *Keratella cochlearis* el más abundante. Según el índice de Carlson de 1977, la laguna es mesotrófica, y las comunidades planctónicas no están significativamente influenciadas por los parámetros fisicoquímicos del agua.

Palabras clave: Limnología, fitoplancton, zooplancton, batimetría

ABSTRACT

Equatorial Andean lakes are essential for human consumption, fisheries and agriculture, but face threats due to climate change. Research on these ecosystems is limited by the scarcity of limnological studies. This study focused on the El Voladero lake in northern Ecuador, analyzing physicochemical and biological parameters to determine its trophic status. Climatic, morphological, physical and chemical conditions were characterized, as well as phytoplankton and zooplankton taxonomies, using data from a meteorological station and a bathymetric survey, in addition to analyses at four sampling stations. The results showed that the growth of planktonic communities depends on nitrogen and phosphorus as limiting nutrients. The lake, 0.64 km² and subcircular in shape, is shallow, with a maximum depth of 2.1 m. Thirty two genera of phytoplankton were identified, with *Botryococcus* and *Oocystis* being the most abundant, characteristic of oligotrophic lakes. The zooplankton, with low diversity, includes species of Cladocerans, Copepods and rotifers, with *Keratella cochlearis* being the most abundant. According to Carlson's 1977 index, the lake is mesotrophic, and the planktonic communities are not significantly influenced by the physicochemical parameters of the water.

Keywords: Limnology, phytoplankton, zooplankton, bathymetry

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

Los lagos que se encuentran en los Andes ecuatoriales son importantes para el aprovisionamiento de agua para consumo humano, pesca, agricultura y en algunos casos en la generación de energía (Herzog *et al.*, 2011). Sin embargo, estos cuerpos lacustres se ven afectados negativamente por los efectos de cambio climático, lo cual se refleja en la principal característica que es la estratificación térmica que influye en las propiedades de estos ecosistemas (Gerten y Adrian, 2002). Considerando que la funcionalidad de los lagos donde el agua circula con facilidad difiere de los lagos perennemente estratificados, los cambios referentes al clima en la circulación o estratificación del agua modifican sus propiedades respecto a las concentraciones de oxígeno en el hipolimnio, cambios en el ciclo de nutrientes, distribución de plancton, entre otros aspectos (Hampton *et al.*, 2014). Tomando como base los pocos estudios de lagos ecuatoriales de alta montaña donde mencionan que la circulación es prácticamente continua y la estratificación térmica se produce muy pocas veces o es de corta duración. No obstante, los cambios mencionados anteriormente generan cascadas tróficas donde la afectación negativa involucra de alguna manera a los sectores sociales debido a que dependen directa o indirectamente de estos cuerpos lacustres (Michelutti *et al.*, 2016).

Los estudios limnológicos son de gran importancia dentro de la investigación ya que permiten generar nuevos conocimientos, sin embargo, en el Ecuador hay escasos estudios continuos por lo tanto el conocimiento referente a los ecosistemas lacustres es deficiente (Gunkel, 2000). No obstante, el proceso de eutrofización observado en algunos estudios de los lagos tropicales de alta montaña requiere de un manejo y conservación adecuada, para lo cual la evaluación de la calidad de sus aguas es importante y requiere un conocimiento a profundidad de los procesos limnológicos (Gunkel, 2003). La

eutrofización incide en el aumento de la biomasa y la composición de distintas especies de algas, en los sistemas lacustres los factores más comunes aparte de la carga de nutrientes son el crecimiento en exceso de algas planctónicas y bentónicas, macrófitas, sucesos de hipoxia y anoxia, cambios bruscos de pH, turbidez, coloración del agua verde o marrón (Chanamé, 2020).

La caracterización morfométrica de un sistema lenticó debe ser el punto de partida en un estudio limnológico ya que brindan una información global acerca de su funcionamiento tomando en cuenta relaciones agua-sedimento y agua-aire (Montoya, 2005). Los parámetros morfométricos están vinculados principalmente con las características geológicas de la cubeta de agua y de su cuenca en general, incluso con su origen e historia. Mientras que, la morfología de un cuerpo lacustre tiene que ver con efectos en los parámetros físico-químicos y biológicos ya que estos determinan el metabolismo de cualquier lago (Vega *et al.*, 2005). El estudio de estos parámetros resulta importante debido a que las variaciones climáticas en el trópico son menos acentuadas que en regiones templadas, en consecuencia, las variables morfométricas influyen sobre las condiciones limnológicas en los sistemas lacustres tropicales (Montoya, 2008).

El conocimiento integrado de las características fisicoquímicas y biológicas del agua es importante al momento de realizar un análisis limnológico debido a que los componentes biológicos siendo el caso de peces, macroinvertebrados, fitoplancton y zooplancton indican el deterioro ambiental en estos sistemas (García *et al.*, 2007). Mientras que, los parámetros físicos y químicos brindan una amplia información respecto a las propiedades físicas y características químicas, mostrando la calidad del agua, pero no contribuyen con información sobre su influencia en la vida acuática, considerando que cada sistema lacustre asocia una comunidad particular de organismos (Samboni *et al.*, 2007). Las comunidades de plancton al ser interdependientes por compartir un mismo

ambiente y recursos, cumplen un rol importante en la ecología de los sistemas acuáticos especialmente los que tienen una velocidad reducida, donde el fitoplancton actúa en función de la dinámica de los nutrientes y gases disueltos en la producción primaria acuática, por otra parte la función del zooplancton es controlar a las comunidades de microalgas y de ciertas bacterias además, aporta con nutrientes mediante sus exudados y desechos (Pinilla *et al.*, 2007).

Como expone Miño y Rodríguez (2018), el escaso conocimiento de información referente al estado ecológico de los recursos hídricos, especialmente de los lagos tropicales en nuestro país, repercute en la gestión deficiente y adecuada de la laguna El Voladero del Norte del Ecuador, debido al desconocimiento de los factores antrópicos o naturales que puedan estar o no, afectando a la salud de sus aguas. Sumado al desinterés por parte de las autoridades locales ya que no desarrollan proyectos de investigación respecto a la calidad del agua de los lagos en mención.

1.1. Interrogantes

- ¿Cuáles son las condiciones climáticas y parámetros morfológicos de la laguna El Voladero?
- ¿Cuáles son los parámetros físicos in situ, los taxones de fitoplancton y zooplancton de la columna de agua de los lagos en estudio?
- ¿Cómo se relaciona la información de los parámetros físicos y biológicos (fitoplancton y zooplancton) con el estado trófico de los lagos en estudio?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Evaluar el estado trófico en relación al comportamiento de los parámetros físicos y biológicos de la laguna El Voladero, del norte del Ecuador

1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las condiciones climáticas y parámetros morfológicos de la laguna El Voladero
- Determinar los parámetros físicos in situ, los taxones de fitoplancton y zooplancton de la columna de agua de los lagos en estudio.
- Relacionar la información de los parámetros físicos y biológicos (fitoplancton y zooplancton) con el estado trófico de los lagos en estudio.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

A partir de los años 60 y 70`s en América Latina la producción científica toma un auge con un gran número de publicaciones científicas de estudios limnológicos especialmente en Brasil, se sumaron países como Colombia, Bolivia, Perú, Ecuador, entre otros (Padial y Thomaz, 2008). Mientras que, en el neotrópico del Norte los cuerpos de agua son recursos importantes para el abastecimiento de agua local, pese a su importancia, en estos ecosistemas se han realizado pocos estudios limnológicos principalmente en Guatemala y Belice (Pérez *et al.*, 2013).

En el neotrópico los estudios limnológicos brindan información valiosa que ayuda a comprender de manera general a la ecología y limnología de los lagos principalmente de alta montaña, pero la falta de conocimiento acerca de procesos biológicos, estacionarios, calidad de agua, entre otros, dificulta la capacidad de gestión y conservación de dichos sistemas lacustres (Ramírez *et al.*, 2020). Algunos de los estudios realizados en los lagos tropicales muestran la importancia de las interacciones tróficas de variables como las algas, peces y factores físicos, por ejemplo si los peces omnívoros controladores directos del fitoplancton y zooplancton llegaran a escasearse, generan un impacto negativo a la cadena trófica de los sistemas acuáticos, además, se ven involucrados otros factores que alteran su composición, siendo el caso de la biomasa de algas, los nutrientes, materia orgánica, entre otros (Catalan y Donato, 2016).

Ecuador es un país que sobresale en el estudio de ecosistemas lacustres, en el cual, investigadores de otros países realizaron estudios desde el siglo XXVIII, describiendo a los recursos de agua dulce de esta región, en la actualidad hay un énfasis en la realización de dichos estudios por parte de las instituciones académicas e investigadores locales, sin embargo, hay varios estudios limnológicos que siguen sin publicarse, pero la poca

información obtenida resulta útil para ir formando un conocimiento sólido referente a la dinámica de los sistemas lacustres (Steinitz *et al.*, 2020).

En los lagos del Norte del Ecuador se han desarrollado investigaciones para conocer su estado trófico, en ese sentido, el estudio realizado por Van Colen *et al.*, 2017) en el lago Yahuarcocha determina que se encuentra atravesando un proceso de eutrofización donde las concentraciones de clorofila son altas, y la comunidad de fitoplancton esta predominada por cianobacterias que generan toxinas que son perjudiciales para el ser humano. Otro caso similar es el lago San Pablo que presenta concentraciones altas de Coliformes fecales asimismo, tiene un gran aporte de nutrientes que provocan la eutrofización por la alta demanda de descomposición y por ende existe menos oxígeno lo que limita el desarrollo de la vida acuática (Gunkel, 2000). Mientras que, en el lago Cuicocha el estudio limnológico demuestra que ocurren procesos de mezcla debido a la emisión de gases y fuentes hidrotermales que generan en el fondo olas con burbujas de gases ya que es un cráter volcánico, el desarrollo de fitoplancton depende de este proceso y el desarrollo de biomasa es mínimo por lo que se cataloga al lago en estado oligotrófico (Gunkel & Beulker, 2000).

Entre otros lagos del Norte se encuentra el lago El Voladero que al estar ubicado en una llanura extensa la topografía y el tipo de vegetación prohíben el paso de escorrentía convirtiendo en pantanos a las áreas aledañas al lago por lo que es necesario ser estudiado, además, este lago posee aproximadamente 3 m de profundidad, el nivel de agua se encuentra afectado por distintas situaciones tales como por el uso del agua o por cambios estacionales o climáticos, con lo que respecta a las características fisicoquímicas se evidencia una baja carga de nutrientes y su productividad primaria es escasa, el pH del agua oscila los 5.5 considerada ligeramente acida y la conductividad eléctrica es aproximadamente los 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la temperatura del agua superficial oscila entre 10° y 17°

dependiendo de la hora y la época, por lo tanto se lo considera como lago en estado oligotrófico (Barriga y Ternaus, 2005). Por otra parte, se encuentra al lago El Salado que a simple vista se evidencia un proceso de eutrofización por características físicas como la turbiedad, debido a lixiviados de cultivos aledaños al lago y como consecuencia del arrastre de sedimentos (Chulde, 2020).

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Procesos de eutrofización en lagos tropicales

Los procesos de eutrofización en los lagos tropicales son producto de actividades antropogénicas, convirtiendo a los lagos en una fuente de descarga de aguas residuales y muchas veces de desechos sólidos. En las últimas décadas dichas actividades han tomado impulso por el continuo crecimiento poblacional que trae consigo gran producción de residuos líquidos y sólidos (Dolbeth *et al.*, 2003). Esto repercute en los ecosistemas lacustres donde hay una concentración alta de nutrientes que ocasionan la proliferación de algas y degradación del medio acuático en general (Fontúrbel, 2005). Asimismo, la eutrofización abarca distintos procesos físicos, biológicos y climáticos que provocan cambios en la abundancia y en la diversidad de las especies (Fontúrbel, 2003).

2.1.1.1. Estado trófico de lagos altoandinos

Los ecosistemas lacustres de alta montaña son remotos y extremos que están sometidos a duras condiciones climáticas, puesto que se presentan temperaturas invernales extremas, la hidrodinámica de los lagos alpinos está condicionada por la composición química de la deposición atmosférica y la contaminación atmosférica, aunque en algunos casos están menos influenciados por actividades antrópicas que en otros hábitats (Rogora *et al.*, 2018). Por lo que, las amenazas humanas globales y locales pueden alterar el estado natural de los lagos de montaña ya sean por extracción y explotación del agua, introducción de especies exóticas, cambio climático, transporte

directo o indirecto de contaminantes, turismo, actividades agropecuarias, entre otras fuentes que amenazan la biodiversidad acuática de los cuerpos de agua lacustres (Tiberti *et al.*, 2014).

2.1.1.2. Índice de estado trófico

El estado trófico es la expresión integrada del estado nutricional de las aguas superficiales, por lo tanto en la limnología se vienen utilizando varios indicadores físicos, químicos y biológicos para cuantificar y describir el estado trófico. Se han propuesto numerosos índices tróficos y estos varían mucho en cuanto a la selección de variables del indicador, la complejidad matemática, el método de desarrollo, la cuantificación, la precisión y la aceptación a criterio por parte de los limnólogos. Es importante considerar que un índice simplifica fenómenos complicados en el ambiente y reduce al fenómeno a una sola dimensión o variable que es el resultado de varias variables medidas previamente. Uno de los índices más utilizados en la actualidad es el de Carlson (1977), su enfoque es llamativo por su base teórica y su confianza en los indicadores cuantificados tales como: Disco Secchi (D_s), Clorofila ($Cl-a$) y Fósforo Total (P_t), estas tres variables están íntimamente relacionadas y se las puede considerar como estimadores del mismo fenómeno ya sea biomasa de algas o estado trófico (Brenzonik, 1984). El rango de variación de este índice está entre 0 y 100, oligotrófico a hipereutrófico respectivamente. Respecto al indicador Disco Secchi (D_s) un valor de 0 corresponde a una profundidad de 64m de D_s y cada incremento de 10 m representa una reducción del 50%, la relación de la concentración de $Cl-a$ y P_t con la transparencia de D_s se ha deducido previamente, las formulas empleadas para determinar el TSI para cada indicador se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Ecuaciones para estimar el estado trófico de acuerdo a los indicadores de eutrofia

Parámetro de Eutrofización	Índice de Estado Trófico (Carlson,1977)
Transparencia del agua (D_s) [m]	$TSI_{D_s} = 60 - 14.41 \ln(D_s)$
Fósforo Total (P_t) [mg/l]	$TSI_{P_t} = 14.42 \ln(P_t) + 4.15$
Clorofila-a (Cl-a) [mg/m ³]	$TSI_{Cl-a} = 9.81 \ln(Cl-a) + 30.6$

Los resultados se someten a una comparación con los valores de la Tabla 2 que muestran los distintos niveles tróficos establecidos por Carlson (1977) y modificados por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 1982).

Tabla 2

Rango de valores del estado trófico

		Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipertrófico
Concentración de fósforo total (µg/L)	Promedio	8.0	26.7	84.4	-
	Rango	3.0 – 17.7	10.9 – 95.6	16 - 386	750 – 1200
Concentración de nitrógeno total (µg/L)	Promedio	661	753	1875	-
	Rango	307 - 1630	361 - 1387	393 - 6100	-
Concentración de clorofila a (µg/L)	Promedio	1.7	4.7	14.3	-
	Rango	0.3 – 4.5	3.0 - 11.0	3.0 - 78.0	100 – 150
Disco Secchi (m)	Promedio	9.9	4.2	2.45	-
	Rango	5.4 – 28.3	1.5 – 8.1	0.8 – 7.0	0.4 – 0.5
Índice de Estado Trófico	Carlson (1977)	<40	41-50	51-70	>70

2.1.2. Parámetros morfológicos

El análisis morfo métrico permite obtener información básica de una cuenca, relacionado a los parámetros que caracterizan un ambiente geomorfológico, mediante la interpretación de datos obtenidos en cuanto a características de forma y de relieve (Delgado y Gaspari, 2010). Las características geomorfológicas una gran influencia en la

ecología acuática, de los cuerpos de agua, debido a que los factores influyentes como la composición físico-química, los procesos de erodabilidad y sedimentación dependen de la forma de la cuenca (Geraldí, Piccolo y Perillo, 2010).

2.1.3. Parámetros de monitoreo

El monitoreo es un procedimiento global que enmarca a estudios limnológicos específicos, que se realiza mediante una observación profunda y continúa, que permite generar información sistemática por parte de un investigador, orientados a la caracterización de lagos en términos de calidad físico-química y parámetros de carácter biológico, los cuales proporcionan una idea del estado y situación actual de un lago, además son una evidencia objetiva que posibilita evaluar la evolución en el tiempo (Rodríguez *et al.*, 2006)

2.1.3.1. Comportamiento de los parámetros físicos en los lagos tropicales

La evaluación de la calidad del agua mediante parámetros físicos es de gran importancia, ya que cualquier parámetro monitoreado ya sea en solitario o en grupo según su característica común, proporciona información parcial sobre la calidad (Kannel *et al.*, 2007). El cambio climático y la eutrofización global son factores determinantes del estado ecológico de los cuerpos de agua, considerando que los lagos tropicales son muy sensibles a las variaciones climáticas. La temperatura es uno de los parámetros que determina las condiciones ecológicas de los lagos puesto que influye directamente en la química del agua y en los procesos biológicos dentro del ecosistema acuático, en consecuencia el crecimiento y la fenología de las especies de fitoplancton se ven influenciados por la temperatura del agua, asimismo, la concentración de clorofila-a varía dependiendo de los patrones meteorológicos y climatológicos (Bresciani *et al.*, 2011).

Por otra parte, el Oxígeno Disuelto (OD) es un parámetro esencial para casi todas las formas de vida de los ecosistemas acuáticos ya que al igual que la temperatura influye

en los procesos químicos y biológicos de las masas de agua, por lo tanto el agua fría tiene la capacidad de mantener al OD mas alto a diferencia de un cuerpo de agua caliente, la relación de temperatura-densidad del agua juega un papel importante en los niveles de OD en un lago (Deng *et al.*, 2006). A medida que aumenta la densidad del agua la temperatura disminuye, por lo general el agua fría se encuentra en el fondo y el agua más caliente y menos densa permanece en la superficie, este proceso se denomina estratificación térmica y puede impedir que el agua bien oxigenada se mezcle con el agua desoxigenada, además, los niveles de OD dependen de otros factores como la salinidad, la turbulencia y la mezcla del lago y sus condiciones pueden cambiar drásticamente con la profundidad del cuerpo lacustre (Akkoyunlu *et al.*, 2011).

La producción de oxígeno se produce a nivel superficial donde la luz solar impulsa el motor de la fotosíntesis y el consumo de oxígeno es mayor cerca del fondo donde da lugar la acumulación y descomposición de materia orgánica sedimentada, el OD es esencial para el desarrollo de microorganismos como las bacterias descomponedoras de materia orgánica, la descomposición de la materia orgánica en ausencia de OD provoca niveles altos de pH (Schmid y Koskiahho, 2006). Otro de los parámetros importantes es la conductividad eléctrica (CE) ya que es un indicador directo del contenido de sales en el agua, existe una relación directa entre la CE y la cantidad de sólidos disueltos en el agua (Brodnjak *et al.*, 2002).

Otro parámetro de análisis es la turbidez, en los lagos poco profundos la mezcla inducida por el viento por lo general penetra toda la capa de agua, permitiendo la resuspensión de sedimentos y liberación de nutrientes (Huang *et al.*, 2012). Este proceso provoca el aumento de la actividad primaria y reduce la transparencia de la masa de agua dando paso a la eutrofización (Qin *et al.*, 2006). En los lagos tropicales suelen encontrarse

ecosistemas lacustres con agua muy turbia debido a la escorrentía glaciar (Barta *et al.*, 2018).

2.1.3.2. Comportamiento de los parámetros biológicos (comunidades planctónicas) en los lagos

En los lagos tropicales, la baja concentración de nutrientes es probablemente el principal factor que limita el crecimiento bacteriano, mientras que el pastoreo de microzooplancton generalmente se supone que es el principal factor de pérdida de bacterias, los estudios de la nutrición mineral bacteriana han sugerido que, debido a su gran relación superficie / volumen, las bacterias son excelentes competidoras del fitoplancton por elementos nutritivos como nitrógeno y fósforo y, por lo tanto, pueden servir como "sumideros" de nutrientes en ecosistemas acuáticos, el microzooplancton puede desempeñar un papel importante en la transferencia de energía y materia debido a su "reenvasado trófico" de bacterias en células "animales" más grandes que pueden ser capturadas por el zooplancton (Rejas *et al.*, 2005).

2.1.3.3. Comunidades planctónicas como indicadores biológicos de la calidad del agua

Los estudios relacionados a la comunidad de zooplancton en la región neotropical sin duda siguen creciendo con estudios fragmentados y la riqueza de taxones zooplanctónicos se ve subestimada por la presunta alta diversidad y al mismo tiempo la escasez de expertos taxónomos (Gama *et al.*, 2018). Sin embargo, la abundancia de especies de zooplancton está íntimamente relacionadas con el estado trófico de los cuerpos lacustres, es por eso que su diversidad resulta útil ya que actúa como un indicador de la calidad del agua (Jaime *et al.*, 2021). En los ecosistemas eutróficos tropicales las comunidades de zooplancton son comunes a diferencia de los organismos más grandes,

puesto que, hay mayor disponibilidad de alimento y las condiciones del agua les favorecen (Gómez *et al.*, 2013).

Un caso especial de zooplancton son los *rotíferos* suelen ser sensibles a cambios ambientales y por ende actúan a manera de indicadores tróficos, ocupan rápidamente nichos abiertos, por lo tanto, están distribuidos ampliamente en cualquier tipo de masa de agua, debido a la eutrofización esta especie de zooplancton se ha convertido dominante especialmente en los cuerpos lacustres (Jiang *et al.*, 2017). La abundancia de los *rotíferos* se relaciona en gran medida con el tipo y la cantidad de alimento disponible que a su vez varía con los cambios en los niveles de nutrientes a lo largo del gradiente trófico (Liang *et al.*, 2020). Además, se han observado correlaciones entre las floraciones de cianobacterias con la abundancia del zooplancton de tamaño pequeño como los *rotíferos* (Jurczak *et al.*, 2019).

Por otra parte, las comunidades de microalgas o fitoplancton principalmente en lagos pequeños en ambientes de montaña pueden ser indicadores por su sensibilidad a la variación climática al igual que las comunidades de zooplancton, el fitoplancton ocupa un hábitat dinámico por lo que pueden presentar rápidas fluctuaciones en cuanto a la abundancia y composición de las comunidades. Al ser el primer escalón de la cadena alimentaria acuática, su producción biológica se la utiliza como un índice del estado trófico en cualquier sistema acuático, la productividad en estos sistemas está íntimamente correlacionada con la densidad del fitoplancton ya que cumplen un papel importante como productores primarios y afectan a los niveles tróficos superiores proporcionando bases nutricionales a otros invertebrados como los peces (Narasimha, R., y Benarjee, 2013). Por lo tanto, para la evaluación o análisis de las comunidades planctónicas se debe relacionar variables de su entorno con las variables ambientales para considerarlos como bioindicadores de cambios ambientales (Vinebrooke y Leavitt, 1999).

2.1.4. Variabilidad temporal del fitoplancton

La producción de fitoplancton está directamente relacionado con los factores físicos, su crecimiento y diversidad pueden estar controlados principalmente por cambios de temperatura estacionales y cambios de temperatura en el agua (Schabhuttl *et al.*, 2013). la temperatura es uno de los factores vitales que afectan el metabolismo, la distribución espacial y temporal, la tasa de crecimiento y la estructura de tamaño del fitoplancton, el aumento de temperatura ocasiona el aumento o disminución de su biomasa, alterando la riqueza y la uniformidad de las especies de fitoplancton (Gonzales *et al.*, 2021). La luz que es otro factor importante para el crecimiento del fitoplancton por los procesos de fotosíntesis (Edding *et al.*, 2006). La alta turbidez en el agua reduce la disponibilidad de luz impidiendo llevar a cabo los procesos de fotosíntesis extensiva por lo tanto se encuentran concentraciones bajas de fitoplancton (Singh *et al.*, 2010). Además, el fitoplancton presenta una correlación significativa con el Oxígeno Disuelto, Sólidos Totales Disueltos, Demanda Bioquímica de Oxígeno, pH, CO₂, Nutrientes como el Nitrógeno y Fosforo (Jakhar, 2013).

2.1.5. Variabilidad temporal del zooplancton

Los patrones estacionales y diarios de las poblaciones de zooplancton suelen ser predecibles en los lagos naturales (Bernot *et al.*, 2014). Los sistemas ecológicos son dinámicos por naturaleza y se reorganizan dependiendo de las variaciones ambientales (Scarsbrook, 2002). Por lo tanto, la variabilidad es una propiedad natural de las comunidades ecológicas, que en algunos niveles superan el rango de tolerancia de los organismos provocando efectos adversos en las poblaciones y producen cambios en función del ecosistema debido a las alteraciones en la estructura de las comunidades, pérdida de biodiversidad y cambios en el flujo de energía (Behrend *et al.*, 2009). Algunos eventos que ocurren en el tiempo interrumpen el desarrollo natural del ecosistema en

general, la perturbación elimina individuos limitando la tolerancia de los organismos y afectando a la reproducción, el crecimiento, y la supervivencia es así que, la variabilidad temporal natural afecta a las comunidades cambiando su estabilidad y las prolongadas sequías representan una situación de estrés para la comunidad de zooplancton (Lansac *et al.*, 2009).

2.1.6. Batimetría

Es de gran importancia comprender los diferentes procesos que ocurren en el fondo de los cuerpos lacustres tales como procesos físicos como la erosión y sedimentación, procesos químicos que se relacionan a la disponibilidad de sustancias reductoras u oxidantes y procesos biológicos como la fotosíntesis oxigénica y anoxigénica, la fijación de carbono inorgánico por parte de bacterias autótrofas que desarrollan en este tipo de entornos (Toro *et al.*, 2012). Los estudios batimétricos consisten en obtener datos para representar la profundidad de las cubetas de agua, esto permite llevar a cabo una gestión adecuada para el desarrollo de distintas actividades como es la construcción de muelles, instalación de estructuras, piscicultura, dragados, entre otros (Rivera *et al.*, 2010). Para lo cual, la batimetría comprende la medición de la profundidad y la configuración del fondo de los lagos, la estructura morfológica del lecho y presencia de obstáculos navegacionales (Mohamed *et al.*, 2016).

2.2. Marco legal

La presente investigación se fundamenta en la Constitución de la República del Ecuador establecida en el año 2008, mencionando lo siguiente: Título II Derechos: Capítulo segundo; Derechos del buen vivir Sección primera Agua y alimentación, menciona en el Art. 14 “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, Sumak kawsay”.

En cuanto respecta a los tratados internacionales es preciso mencionar a La Convención de Ramsar, que se trata de un tratado intergubernamental a nivel internacional que proporciona medidas para la conservación de los humedales. El convenio se puede tomar como punto de partida para la conservación a nivel nacional e internacional. La ideología Ramsar se trata del “uso racional”. El uso racional de los humedales se define como "el mantenimiento de sus características ecológicas, logrado mediante la implementación de enfoques por ecosistemas, dentro del contexto del desarrollo sostenible". Por consiguiente, la conservación de los humedales, así como su uso sostenible y el de sus recursos, se hallan en el centro del "uso racional" en beneficio de la humanidad (Ramsar, 2014).

Además, la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua. La presente ley de aguas, garantiza y considera de gran importancia la conservación y el control para la contaminación, con el fin de proteger este recurso y sea aceptable, asequible para uso recreacional y doméstico. En el Art. 64 se menciona que la naturaleza o Pacha Mama tiene derecho a la conservación de las aguas con sus propiedades como soporte esencial para todas las formas de vida. La protección de sus fuentes, zonas de captación, regulación, recarga, afloramiento y cauces naturales de agua, en particular, nevados, glaciares, páramos, humedales y manglares. El Art. 65 menciona que los recursos hídricos serán gestionados de forma integrada e integral, con enfoque ecosistémico que garantice la biodiversidad, la sustentabilidad y su preservación conforme con lo que establezca el Reglamento de esta Ley.

Basados en la el Código Orgánico Ambiental (COA), el estudio se sustenta en el Art. 26, el cual manifiesta las facultades de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Provinciales en materia ambiental, haciendo énfasis en el literal 6 que señala la responsabilidad de los GAD's en generar normas y procedimientos para prevenir, evitar,

reparar, controlar y sancionar la contaminación y daños ambientales, una vez que el Gobierno Autónomo Descentralizado se haya acreditado ante el Sistema Único de Manejo Ambiental.

También en el Art. 30 en el que se mencionan los objetivos del estado relativos a la biodiversidad, en el literal 3 se considera el establecer y ejecutar las normas de bioseguridad y las demás necesarias para la conservación, el uso sostenible y la restauración de la biodiversidad y de sus componentes, así como para la prevención de la contaminación, la pérdida y la degradación de los ecosistemas terrestres, insulares, oceánicos, marinos, marino-costeros y acuáticos

Se consideró el Plan Nacional de Desarrollo, “Toda una vida” cuyo objetivo tercero es “Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones” determina en su política 3.1 “Conservar, recuperar y regular el aprovechamiento del patrimonio nacional y social, rural y urbano, continental insular y marino-costero, que asegure y precautele los derechos de las presentes y futuras generaciones.” (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017).

CAPÍTULO III

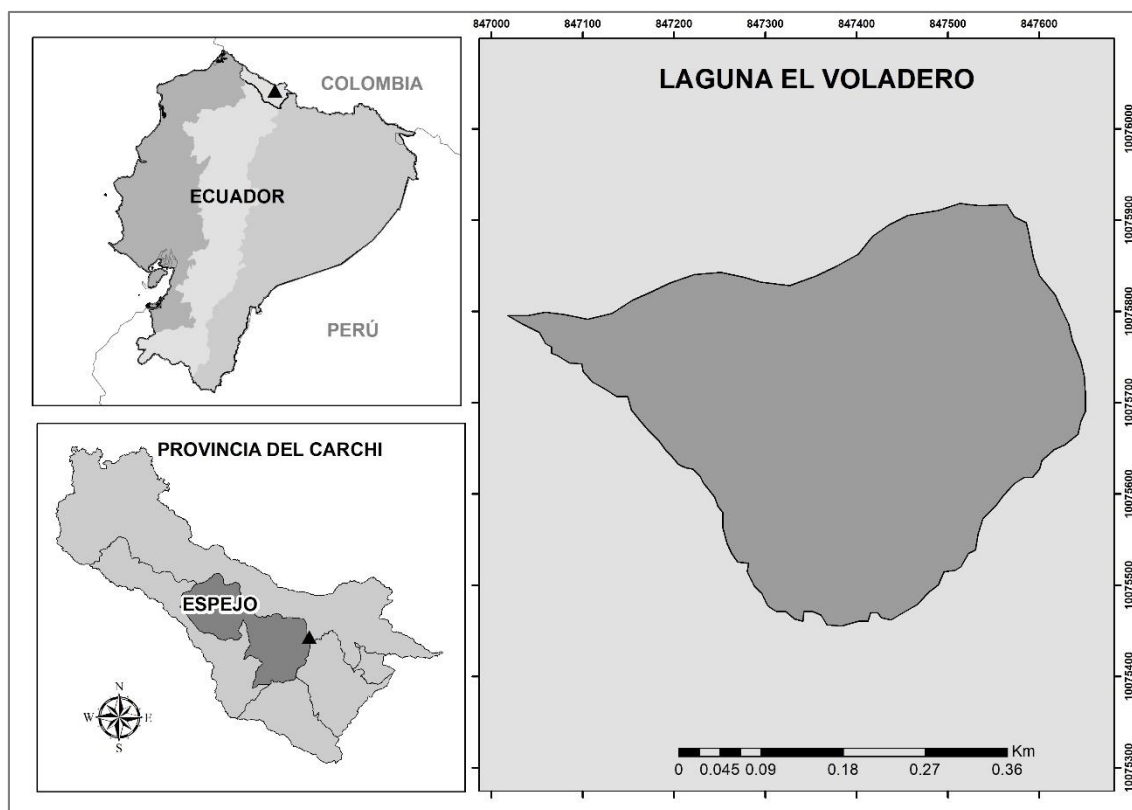
MARCO METODOLÓGICO

3.1. Área de estudio

Las lagunas El Voladero (179201.97 E; 76606 N) de origen glacial son el principal ecosistema lentic de la Reserva Ecológica El Ángel, ubicadas a 3680 m s.n.m. entre los cantones Espejo y Tulcán y Mira de la provincia del Carchi. (Figura 1). La laguna central posee una extensión de 72 m y su profundidad no sobrepasa los 3 m en algunos sitios presenta material de sedimento limoso que da lugar a una vegetación emergente y sumergida que cumplen un rol importante en el ciclo de vida para otras especies. Son tres lagunas que se encuentran interconectadas a través de pequeñas quebradas, el nivel del agua en los sistemas lacustres sufren fluctuaciones debido a los cambios climáticos y estacionales. La temperatura oscila entre los 9° y 11° C, pero sus extremos fluctúan entre 0° a 22° C manteniendo un patrón de lluvias irregular, la flora que se encuentra en la zona es principalmente un conjunto de biota de páramo tales como: frailejones y gramíneas que son las principales especies indicadoras de paramo húmedo y contribuyen en la biomasa por su gran cobertura de suelo y su capacidad de retención de agua y por ende de nutrientes (Barriga y Ternaus, 2005).

Figura 1

Ubicación de la laguna El Voladero

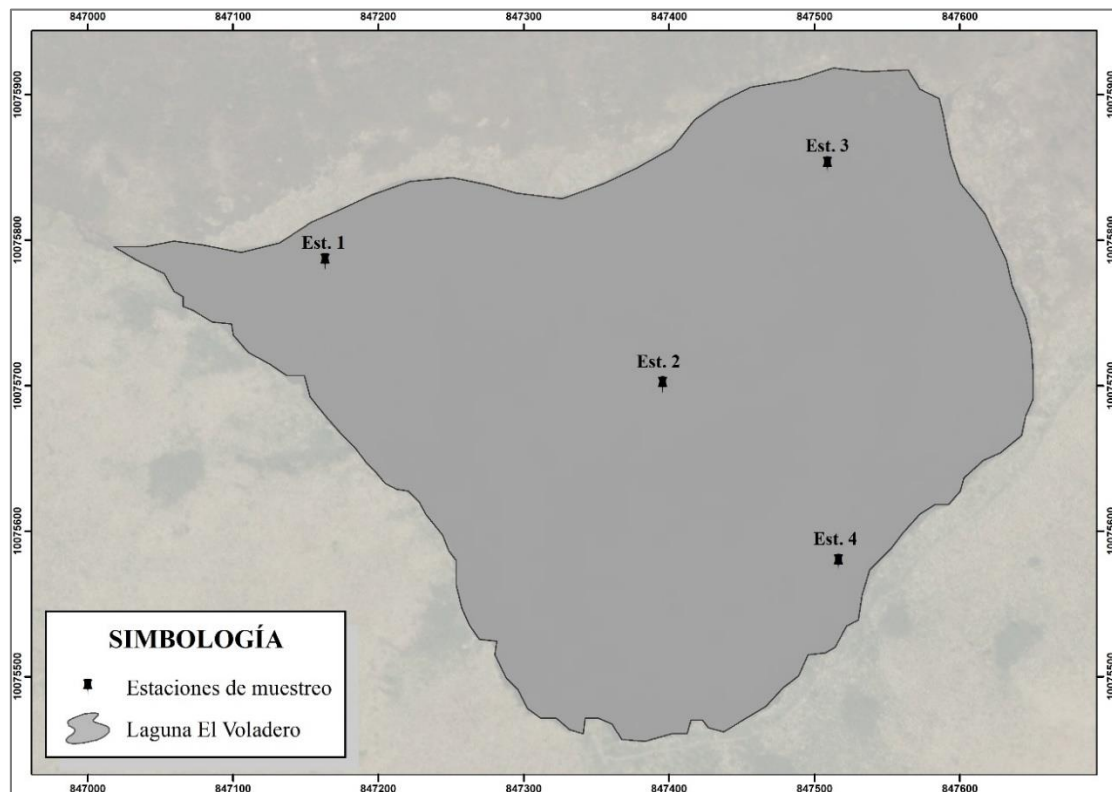


3.2. Monitoreo

Se tomó en cuenta el protocolo de muestreo del proyecto VLIR-UOS, el cual menciona que los puntos de muestreo se deben ubicar a las entradas, salidas, punto más profundo de los lagos y en zonas estratégicas donde haya la presencia de actividades antropogénicas (Figura 2).

Figura 2

Puntos de muestreo en la laguna El Voladero



3.2.1. Condiciones climáticas del área de estudio

Las condiciones climáticas del área de estudio se determinaron mediante el análisis de datos de la estación meteorológica El Ángel, tomando en cuenta un historial de datos mensuales de precipitación y temperatura desde el año 2010 hasta el informe más actualizado 2022 según el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Por otra parte, La humedad relativa y la velocidad del viento se determinaron considerando las series temporales diarias de mayor resolución de la NASA POWER del mismo periodo de tiempo.

3.2.2. Parámetros morfológicos de la laguna El Voladero

Los parámetros morfológicos de la laguna se establecieron mediante el levantamiento batimétrico de la laguna para lo cual, se utilizó un bote Sea Eagle 14S donde se colocó la ecosonda GPS Map 526s y el navegador GPS Map Garmin conectados a la

computadora portátil de campo Durabook. La antena y el sonar fueron colocados firmemente en una estructura de madera con el fin de lograr uniformidad en la recolección de datos. Finalmente se realizó la conexión de los equipos al convertidor de energía que fue conectado a la batería de 110 voltios, por consiguiente se verificó el funcionamiento de todos los equipos y del software y se realizó un barrido horizontal y vertical abarcando toda la superficie del cuerpo lacustre.

En efecto, los puntos recolectados mediante la batimetría en el software Dr. Deph en formato (.drd) fueron exportados a formato Excel (.xls) verificando el formato adecuado de latitud en el eje Y, longitud en el eje X y profundidad en el eje Z. Además, otra manera para evitar problemas a la hora de proyectar los datos fue de multiplicar (*-1) los valores de profundidad para que sean negativos los valores de longitud se dividieron para 1 millón obteniendo de esa manera valores decimales, Una vez verificado dichos aspectos en los datos se procedió a realizar el análisis en el software ArcGis.

3.3. Parámetros físico químicos

Se llevó a cabo el análisis in situ de los parámetros físicos (Temperatura (T°), pH, Oxígeno Disuelto (OD), Conductividad Eléctrica (CE) y Turbidez) mediante un multiparámetro, se lo realizó en los puntos de muestreo establecidos previamente en el mes de enero, para ello, se tomó en cuenta el protocolo de muestreo establecido por el proyecto “Manejo Sostenible de lagos en el Norte del Ecuador, bajo las Crecientes Actividades Económicas y el Cambio Climático” que considera técnicas del Standart Methods Ed. 1 el cual se adaptó al área de estudio.

3.4. Fitoplancton

Las muestras de fitoplancton se colectaron a aproximadamente 25 cm de profundidad de la columna de agua mediante el uso de la botella de Van Dorn de 2,2 litros, las muestras fueron filtradas con un filtro de 64 μ m para eliminar zooplancton y se

las colocó en tubos falcon de 50 ml con su respectiva etiqueta y fueron preservadas con formol a una concentración del 4%. Posteriormente las muestras fijadas se almacenaron en un cooler en un sitio oscuro. La identificación de las especies de fitoplancton se la realizó mediante un microscopio marca LEICA serie DM750 a un aumento de 100X, se tomó en cuenta características morfológicas importantes como forma, tamaño, presencia o ausencia de flagelos, color, entre otras. Además, se utilizaron guías, bases de datos y literatura para determinar las taxas fitoplanctónicas.

La cuantificación del fitoplancton consistió en sedimentar las muestras por 12 horas y posteriormente se realizó una visualización previa al recuento a fin de establecer una lista general de los taxones y tener una idea de la densidad de las taxas presentes en la muestra. El conteo realizó utilizando una cámara Utermohl de 10 ml ya que es una herramienta óptima para contabilizar muestras con baja densidad celular, para ello, en el microscopio se realizaron barridos de manera vertical y el registro se lo llevo en un contador digital abarcando toda la superficie de la cámara con la finalidad de que los resultados sean confiables (Samanez *et al.*, 2014).

La diversidad de las especies fitoplanctónicas se las determinó aplicando el índice de Shannon-Wiener (Ecuación 1 y 4). Este análisis de diversidad abarcó la riqueza de las especies y sus componentes determinando el estado de contaminación de la masa de agua por lo tanto, es un buen indicador del impacto ambiental sobre las especies (Baylón *et al.*, 2018). Además, mide el grado promedio de incertidumbre al momento de predecir a que especie pertenecerá un individuo que es escogido al azar de un conjunto (Valdivia, 1998).

Dicho índice presenta valores entre 0 cuando hay una sola especie y el logaritmo de S cuando todos los individuos están representados por el mismo número de especies, por lo general el valor máximo es cercano a 5, sin embargo, un ecosistema altamente rico

puede superar este valor. De igual manera, es importante calcular la Equitabilidad (Ecuación 3) para establecer si las abundancias relativas de las muestras son semejantes (Flores, 2019). Asimismo, se aplicó el Índice de Riqueza de Margalef el cual muestra que valores <2 y >5 para áreas de baja y alta diversidad respectivamente (Ecuación 4).

$$H' = - \sum_{i=1}^S (p_i * \log_2 p_i) \quad (1)$$

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

$$E = \frac{H'}{\ln S} \quad (3)$$

Dónde:

H' = Índice de Shannon – Wiener

S = Número de especies (riqueza de especies)

p_i = Proporción de individuos de la especie i respecto al total de individuos

n_i = Número de individuos de la especie i

N = Número de todos los individuos de todas las especies

E = Índice de Equitabilidad

Índice de Margalef

$$D = \frac{(S - 1)}{\ln N} \quad (4)$$

Dónde:

D = Diversidad

E = Número de especies diferentes

N = Número total de individuos

3.4.1. Experimentos in situ

La implementación de los experimentos tuvo la finalidad de conocer la limitación de nutrientes, la influencia de la intensidad de la luz y la radiación UV en el desarrollo del fitoplancton y la capacidad de pastoreo del zooplancton. Para ello, los tratamientos se incubaron durante siete días en la laguna El Voladero.

3.4.1.1. Limitación de nutrientes

La limitación de nutrientes se la realiza a través de la adición de nutrientes al fitoplancton para evaluar su respuesta, para lo cual, se llenaron 12 botellas de 1 litro con agua previamente filtrada (64 μm) y se dividirán en cuatro tratamientos distintos: enriquecimiento en Fósforo (P) (adición de 0.77 mg L^{-1} de P como K_2HPO_4), enriquecimiento de Nitrógeno (N) (adición de 7.01 mg L^{-1} de N como NaNO_3), enriquecimiento en NP (adición de N y P) con las mismas cantidades ya mencionadas y un tratamiento de control sin adición de ningún nutriente. Cada tratamiento se replicará tres veces y las botellas serán colocadas al azar en un marco de aluminio horizontal en la capa de agua superficial.

3.4.2. Influencia de la intensidad de la luz y la radiación UV en el desarrollo del fitoplancton

En el experimento anterior se realizó el de radiación UV colocando 3 botellas de 1 litro, para lo cual se cubrieron las botellas con papel filtro UV (-UV) sin añadir nutrientes y se tomó en cuenta el tratamiento testigo ya que las botellas no estaba encintadas con el filtro (tratamiento +UV). Considerando que la profundidad del lago es de 2 m las botellas se las ubicaron a 1 m de profundidad y se calculó previamente el porcentaje de irradiancia residual a través de la fórmula $100 * \exp(\text{coeficiente de extinción} * \text{profundidad})$ para lo cual, dicho coeficiente se midió con el Disco Secchi.

3.4.2.1. Extracción de Clorofila

Tomando en cuenta que la clorofila (Chl a) y la ficocianina son indicadores clave de la biomasa total de algas y de biomasa cianobacterias respectivamente, se midieron mediante un fluorómetro que posee una fluorescencia 29 in vivo (diseños de Turners Aquauor). Para lo cual se colocó una muestra de agua de 2 mL en la oscuridad durante 30 minutos, previamente se mide la Chl a y la ficocianina y se extraerá la Chl a con

metanol, para medir dicha extracción se tomará una muestra de agua superficial integrada con la botella de Van Dorn y el agua pasará por un filtro de 64 µm para eliminar zooplancton y posteriormente por un filtro de Whatman GF/F de tamaño de poro 0,7 µm hasta que el filtro se saturó en este caso con 300 ml de muestra considerando que el agua de la laguna el Voladero es altamente transparente. Luego se cortó en trozos pequeños y se añadió 10 ml de etanol 100% para extraer la Chl a, por consiguiente los tubos se colocaron a 4°C en la oscuridad durante 24 horas y se homogeneizaron después de 23 horas para evitar el gradiente de Chl a dentro de los tubos, por consiguiente se tomó 2 ml de cada tubo y se centrifugaron a 3000 rpm durante 20 minutos y el sobrenadante se analizó con el fluorímetro Turner Designs 8000-010, finalmente los valores arrojados por el fluorímetro fueron transformados a µg/l utilizando la ecuación (5).

$$Chla (\mu g/L) = \frac{1.1526 * (valor \text{ fluorímetro}) * (\frac{Vol \text{ metanol}}{Vol \text{ filtrado}})}{2.45} \quad (5)$$

Una vez obtenida la base de datos de clorofila extraída en el software Rstudio se verificaron los supuestos paramétricos: normalidad, linealidad, homogeneidad y homocedasticidad para determinar si los datos son paramétricos o no.

3.5. Zooplancton

Las muestras de zooplancton fueron colectadas con la caja de Schindler Patalas de 30 litros y posteriormente colocadas en envases de 90 ml con su respectiva etiqueta y fueron preservadas con alcohol a una concentración del 4%. Para la identificación de zooplancton se consideró homogeneizar la muestra, posteriormente se tomó 1 ml de muestra que fue colocada en una cámara Sedgwick-Rafter cuyas dimensiones son de 5, 2 y 1cm de largo, ancho y altura respectivamente y tiene la capacidad de 1 ml óptima para muestras de 104 células/mL. La cuantificación se la realizó utilizando una caja Petri previamente dividida en cuadrículas para lograr un conteo adecuado y evitar el recuento

de la muestra. Dicho conteo se lo realizó a través de un microscopio realizando un barrido total de la muestra, desde la parte superior izquierda. Este proceso se lo repitió hasta cumplir con el conteo total del volumen de la muestra y el registro se lo llevó en un contador digital.

3.5.1. Capacidad de pastoreo del zooplancton

El pastoreo de zooplancton se evaluó comparando el crecimiento del fitoplancton en el tratamiento con y sin zooplancton. Además, se añadirán nutrientes para evitar la interferencia de los nutrientes excretados por el mismo zooplancton y el crecimiento de fitoplancton. Para lo cual, se construirá un marco con 9 botellas de 0.5 litros llenas de agua de los lagos que estarán libres de zooplancton. En el tratamiento de control (3 botellas) no se añadirá zooplancton, en otras 3 botellas se añadirán 10 individuos del género *Daphnia* en cada una y en las últimas 3 botellas se añadirán 10 individuos de copépodos.

3.6. Estadística

El procesamiento de los datos de cada parámetro se lo realizará mediante el software RStudio. Además, se realizará una correlación a través de un método estadístico multivariado (Análisis de Correspondencia Canónico) puesto que se obtendrá gran cantidad de datos que se relacionarán entre sí. Así también, se aplicará un Análisis de Varianza (ANOVA) para constatar de que por lo menos una estación de muestreo es diferente a las demás estaciones.

CAPÍTULO IV

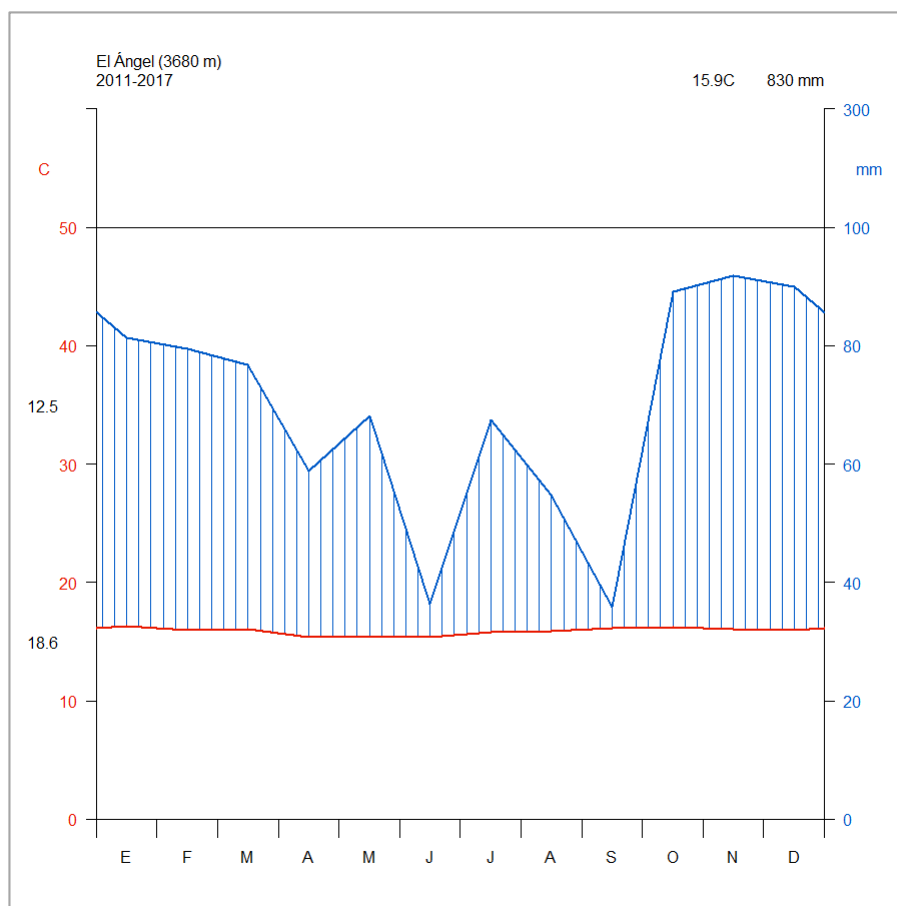
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Condiciones climáticas

El climograma realizado previamente a la salida de campo permitió observar que en la zona de estudio la época seca se manifiesta en el mes de junio y septiembre con una precipitación de 36.3 y 35.9 mm respectivamente y una temperatura de 11.9 °C. Por otra parte, la época lluviosa se da durante los meses octubre a enero con precipitaciones de 81.4 a 90 mm, no obstante durante esta época la temperatura oscila los 12.3 °C (Figura 3).

Figura 3

Climograma de la estación meteorológica El Ángel



Pourrut (1995), menciona que las temperaturas medias anuales en la región Andina del Ecuador oscilan los 12 y 20 °C y la temperatura mínima raramente desciende a -0°C y las máximas no superan los 30 °C, sin embargo, dependiendo de la altura y la exposición estos datos varían. Mientras que, la precipitación fluctúa entre los 500 y 2000 mm dando lugar a dos épocas marcadas que son la seca y la lluviosa que se presentan en los meses de junio a septiembre y noviembre a diciembre respectivamente. No obstante, en la actualidad los cambios bruscos de temperatura y precipitación han alterado estos patrones lo que supone un fuerte avance del calentamiento global (León *et al.*, 2021).

Por otra parte, la humedad relativa (HR) a 2 metros en el área de estudio es de 82.84 %, por lo que hay mayor probabilidad de que en este sitio se presente niebla o rocío a medida que el vapor se condensa, en cuanto a la velocidad del viento se obtuvo 1.69 m/s por lo que el viento se percibe en la piel valorándolo como suave principalmente en la sierra la dirección del viento va en dirección E.

4.2. Parámetros morfométricos de la laguna El Voladero

El estudio batimétrico ayudó a determinar los parámetros morfométricos de la laguna (Tabla 3) que son de gran importancia para la comprensión funcional y estructural del ecosistema (Wetzel y Likens, 2000). Se observa que el cuerpo lacustre presenta un área de 0.16 km², desde el punto de vista estadístico es una variable de tamaño que caracteriza de mejor manera al lago (Castillo, 2003). En el norte del Ecuador la media de áreas de los lagos rodea los 2.4 km² (Maynaguez y Tumbaco, 2019) por lo tanto, a la laguna El Voladero se la considera pequeña. Además, se estimó que la cubeta alberga un volumen de 113847.09 m³ de agua considerando que el levantamiento de información se lo realizó en época lluviosa y cuenta con una extensión de 0.64 km.

Tabla 3

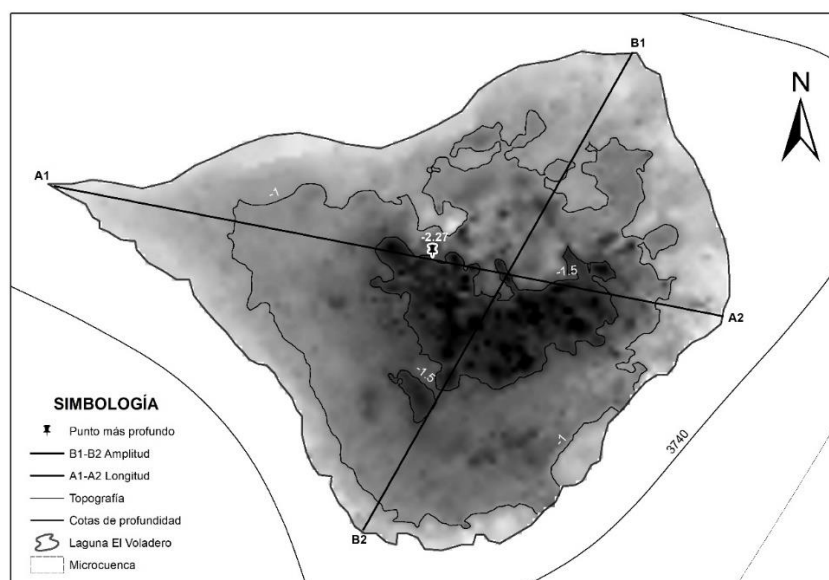
Parámetros morfométricos de la laguna El Voladero

Parámetro	Valor	Unidad
Área	16.0631	Ha
Perímetro	1.79	Km
Amplitud	250	M
Longitud	640	M
Volumen	113847.09	m ³
Profundidad máxima	-2.27	M
Profundidad media	0.7	M
Profundidad mediana	1	M
Profundidad relativa	1	%
Índice de desarrollo de costa	1.25	
Forma	Elipsoidal	

Por otra parte, se observa que la laguna es poco profunda (-2.27 m), la zona más profunda se ubica en la zona septentrional (Figura 4), la longitud máxima es de 640 m y la amplitud de 250 m. La profundidad media (0.7 m) es uno de los parámetros morfométricos que mejor caracterizan a la producción, funcionamiento y la estructura ecosistémica de un cuerpo de agua (Fornerón, 2010).

Figura 4

Mapa batimétrico de la laguna El Voladero



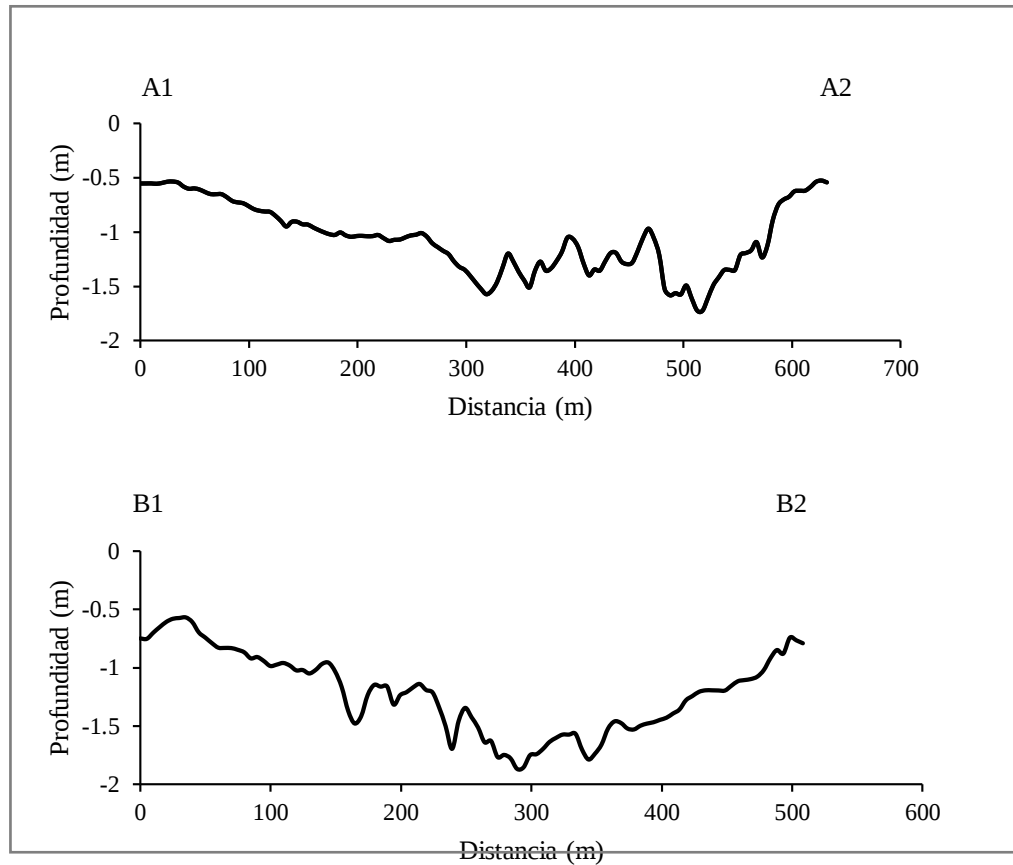
Por otro lado, la profundidad relativa indica la estabilidad que mantiene la columna de agua por lo que Wetzel (1983) denota que la mayoría de lagos poseen una profundidad relativa menor al 2%, sin embargo, los lagos profundos y de superficies pequeñas presentan por lo general valores mayores al 4% por lo que se asume que están protegidos contra el viento y por lo tanto tienen una mayor estabilidad. En este caso, la laguna el Voladero presenta un valor de 1% y considerando que es un lago somero y pequeño y sumado a las condiciones climáticas de la zona tiende a formar termoclina por lo que la columna de agua es menos estable, además este lago tiende a tener menor volumen de agua que otro más profundo y en proporción una mayor superficie relativa de intercambio de calor con la atmosfera (Castillo, 2003).

Los perfiles realizados sobre los ejes de la laguna (Figura 5) indican que en el transecto A1-A2 hasta los 300 m aproximadamente es una zona con pendiente suave que asciende de manera uniforme, no obstante, se observan dos pendientes pronunciadas a partir de 0.7 m hasta 1.5 m de profundidad, a partir de los 320 m hasta los 570 m aproximadamente de distancia se empieza a observar desigualdades en el fondo hasta que la pendiente comienza a descender hacia la zona litoral A2 de la laguna. Mientras que, en el transecto B1-B2 se observa más irregularidad en las pendientes ya que en los primeros 140 metros de distancia desde la zona litoral presenta una pendiente que asciende desde los 0.4 m hasta 1 m aproximadamente de profundidad y de manera similar al trasecto A se observa irregularidad en el fondo hasta que la pendiente desciende de manera uniforme desde los 370 m hasta la zona litoral B2 de la laguna. En general la laguna presenta una zona litoral poco desarrollada, la forma de los perfiles puede variar por distintos aspectos de origen natural o por eventos climáticos estacionales, uno de ellos es el viento que ocasiona oleaje e influye de alguna manera al transporte y deposición de sedimentos en

zonas puntuales a nivel de la orilla ya que ingresan por escorrentía superficial modificando así la morfometría de la laguna (Rico *et al.*, 1995).

Figura 5

Perfiles de profundidad correspondientes a los transectos A, B de la laguna El Voladero



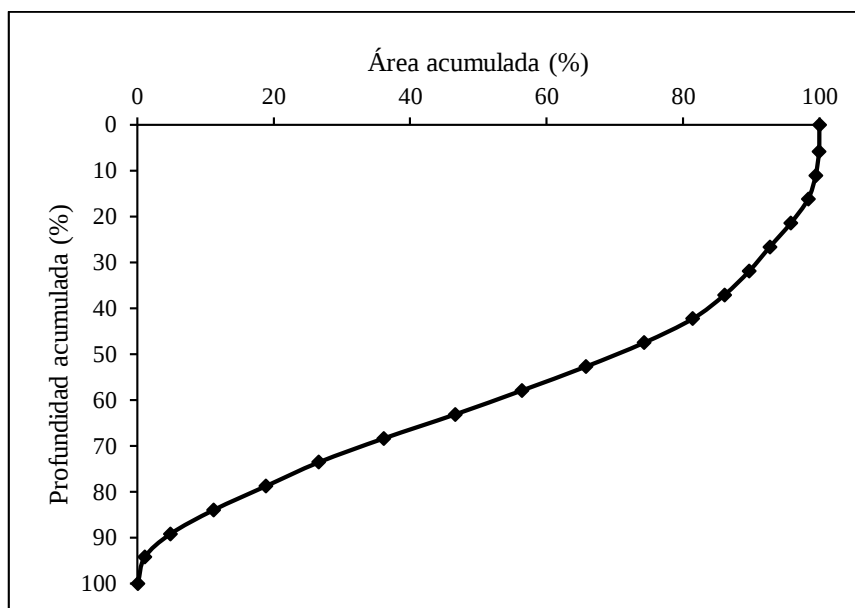
En cuanto a la forma, se aplicó el índice del cociente entre las profundidades media y máxima ($\bar{Z}/Z$) los valores inferiores a 0.33 demuestra que el lago no se compone solamente de una cubeta, por otra parte Wetzel (1993) menciona que la relación ($\bar{Z}/Z$) cercana a 0.7 es característico de cubetas de agua de forma elipsoidal de los lagos poco profundos que presentan pendientes muy bajas, en este caso la laguna El Voladero presentó un índice de 0.3. Asimismo, se determinó el índice de desarrollo de costa (DL) que muestra la forma del lago, un valor igual a 1 indica que el lago es plenamente circular lo que no se da en ningún lago de manera precisa, en ese contexto para la laguna en estudio

se obtuvo un DL de 1.25 que indica que a medida que va aumentando o es mayor a 1 tiende a ser de forma irregular (Morales *et al.*, 2018).

De igual manera, para Hutchinson (1957) y Timms (1992) quienes plantearon las primeras clasificaciones de forma exterior de los lagos, la forma de la laguna es subcircular ya que el valor de DL está dentro del rango establecido por dichos autores que es entre 1.15 y 1.3 considerando que esta forma es menos perfecta que un círculo como tal. Según Hakanson (1981) en función de la curva hipsométrica relativa de profundidad vs área (Figura 6), se determinó que la forma de la cubeta es uniformemente cóncava ya que presenta un perfil tipo C (Curcio *et al.*, 2018). Además, la profundidad media (0.7 m) es menor a la profundidad mediana (1 m) lo cual es característico en los lagos que presentan curvas cóncavas (Benjumea *et al.*, 2008). Además, la curva muestra que

Figura 6

Curva hipsográfica relativa



4.3. Parámetros físicos-químicos

Los valores de los parámetros físico químicos (Tabla 4) se determinaron de manera in situ mediante un multiparámetro para lo cual se obtuvo que en las estaciones

1, 3 y 4 el pH es ligeramente ácido con un valor promedio de 6.3 mientras que la estación 2 presenta un valor de 8.85 ligeramente alcalino; de igual manera el valor promedio de Oxígeno Disuelto en la estación 1, 3 y 4 es de 74 % de saturación y en la segunda estación es de 64.9 % , considerando que la estación 2 se encuentra en la mitad de la laguna y cercana al punto más profundo el valor de OD es bajo respecto al resto de estaciones, esto debido a que en las zonas menos profundas de la laguna hay mayor oxigenación por el oleaje que produce mayor movimiento del agua, no obstante los niveles de saturación son aceptables para el desarrollo de la vida acuática en este cuerpo lacustre (Rascón *et al.*, 2021). Es así que, Álvarez *et al.*, (2008) manifiesta que la turbulencia favorece el intercambio entre el aire y el agua por lo que en lagos con temperaturas más frías y agitadas contienen mayor cantidad de oxigenación.

Asimismo, se obtuvo que la temperatura es uniforme en todas las estaciones de muestreo 9.8 °C considerando que la laguna se encuentra ubicada en zona de páramo a una altitud de 3680 m.s.n.m. En cuanto a la turbidez del agua se observa un promedio de 0.96 FNU no obstante, la estación 1 y 2 presentan valores más altos que las estaciones 3 y 4, estos valores muestran que la transparencia del agua es alta y se lo pudo corroborar con el disco secchi ya que llegando al punto más profundo se logró visualizar el disco especialmente en la estación 2 que es la parte más profunda del lago, cabe mencionar que la transparencia del agua puede variar de acuerdo a las estaciones temporales, factores bióticos, fluctuaciones en las características físicas o por floraciones de fitoplancton ya que estas disminuyen el valor de disco secchi (Rodríguez y Miño, 2018).

Tabla 4

Parámetros físico-químicos

Parámetro	Unidades	Est. 1	Est.2	Est.3	Est.4
pH	pH	6.31	8.85	6.56	6.25

Oxígeno Disuelto	mg/L	72	64.90	75.90	74.90
Temperatura	°C	9.82	9.82	9.88	9.74
Turbidez	FNU	1.20	1.40	0.80	0.90
Disco Secchi	m	1.25	2.10	1.00	1.00

4.4. Identificación de fitoplancton

La identificación del fitoplancton es de gran importancia ya que es considerado como un indicador biológico de la calidad de las aguas (Pereira y Portillo, 2021), además, juega un papel importante en los sistemas lenticos puesto que actúan en la producción primaria, si bien es cierto, las comunidades fitoplanctónicas se distribuyen en la columna de agua cumpliendo varias funciones dependiendo de las características fisicoquímicas que presentan los cuerpos lacustres (Toro *et al.*, 2012). En las muestras tomadas en cuatro estaciones de muestreo de la laguna el Voladero se identificaron 32 géneros distribuidos en 28 familias, 18 órdenes, 9 clases y 8 filos (Tabla 5).

Tabla 5

Especies identificadas de fitoplancton

PHILUM	CLASE	ORDEN	FAMILIA	GÉNERO
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Tabellariales	Tabellariaceae	Tabellaria
		Bacillariophyceae	Fragilariaceae	Fragilaria
Charophyta	Conjugatophyceae	Zygnematales	Desmidiaceae	Micrasteria
			Mesotaeniaceae	Planotaenium
Chlorophyta	Chlorophyceae	Chlorococcales	Oocystaceae	Oocystis
			Palmellaceae	Planktosphaeria
			Palmellaceae	Sphaerocystis
			Oocystaceae	Franceia
			Scenedesmaceae	Scenedesmus
			Hydrodictyceae	Tetraëdron
			Ankistrodesmaceae	Ankistrodesmus
			Botryococcaceae	Botryococcus
		Volvocales	Chlamydomonadaceae	Chlamydomonas
Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Pseudanabaenaceae	Pseudanabaena
Dinophyta	Dinophyceae	Peridiniales	Peridiniaceae	Peridinium
		Gonyaulacales	Ceratiaceae	Ceratium

Euglenophyta	Euglenophyceae	Euglenales	Euglenaceae	Trachelomonas
Myxozoa	Dinophyceae	Gymnodiniales	Hemidiniaceae	Hemidinium
Ochrophyta	Bacillariophyceae	Thalassiosiphales	Catenulaceae	Amphora
		Bacillariales	Bacillariaceae	Denticula
		Rhopalodiales	Rhopalodiaceae	Epithemia
		Naviculales	Amphipleuraceae	Frustulia
			Stauroneidaceae	Stauroneis
			Pinnulariaceae	Pinnularia
			Naviculaceae	Navicula
		Cymbellales	Cymbellaceae	Cymbella
		Licmophorales	Ulnariaceae	Ulnaria
				Euastrum
Streptophyta	Zygnematophyceae	Desmidiiales	Desmidiaceae	Staurodesmus
				Staurostrum
			Closteriaceae	Closterium
	Klebsormidiophyceae	Klebsormidiales	Elakatotrichaceae	Elakatothrix

Se identificó la presencia de la especie *Pseudoanabaena*, al ser una cianobacteria puede ser perjudicial en los lagos altoaninos y poco profundos ya que dicha especie tiende a proliferar en condiciones favorables, como la presencia de nutrientes elevados (nitrógeno y fósforo), temperaturas cálidas y aguas tranquilas. Como es el caso de esta investigación la laguna El Voladero al ser poco profunda la columna de agua está más expuesta a la luz del sol, favoreciendo de esa manera la fotosíntesis y el crecimiento descontrolado de esta cianobacteria (Yang *et al.*, 2023).

Además, esta especie puede producir toxinas que durante las floraciones masivas puede generar compuestos que afectan de alguna manera la salud de los organismos acuáticos y de manera indirecta a los humanos, de igual manera, cuando las colonias de *pseudoanabaena* mueren y se descomponen consumen grandes cantidades de oxígeno en el agua lo que conlleva a la hipoxia en los lagos someros. Esto resulta en la muerte de peces y otras formas de vida acuática que dependen del oxígeno disuelto en el agua (Oviedo y Marin, 2017). Otro impacto negativo a causa de las floraciones de *pseudoanabaena* es en la alteración de las redes tróficas, especialmente el zooplancton ya

que sirve de alimento para los peces, puede verse afectado por la calidad de agua reducida y la disminución de las plantas acuáticas que proporcionan hábitats adecuados. Es así que, la presencia de esta especie y otras cianobacterias en los lagos altoandinos pueden afectar la calidad del agua para consumo humano y recreación (Rodas y Vásquez, 2020).

4.4.1. Índices de biodiversidad

Los índices aplicados en este estudio son los más usados para evaluar distintas características de la diversidad biológica, el índice de Shannon por lo general toma valores entre 1 y 4.5 en donde los valores superiores a 4 se los interpreta como diversos. Por otra parte, El índice de Simpson demuestra que 1 es muy diverso y 0 que no existe diversidad (Salmerón *et al.*, 2017).

4.4.1.1. Índice de biodiversidad de Shannon- Weaver

En la figura 7 se logró observar que la estación 4 presenta mayor biodiversidad con un valor de 2.28 encontrándose un total de 31 géneros y una riqueza de 5599 individuos a diferencia de la estación 1 que posee una baja diversidad e inequidad con un valor de 0.70 con 23 géneros y una riqueza de 3032 individuos y con la dominancia considerable de un solo género en este caso *Botryococcus* que acapara un total de 2624 individuos, cabe mencionar que el número de especies no siempre es una medida precisa de biodiversidad. En cuanto a las estaciones 2 y 3 presentan 28 géneros con 3995 y 5575 individuos respectivamente, a pesar de que la estación 3 presenta mayor riqueza que la estación 2 el valor de Shannon es similar 1.50 y 1.46 respectivamente

Figura 7

Riqueza de fitoplancton

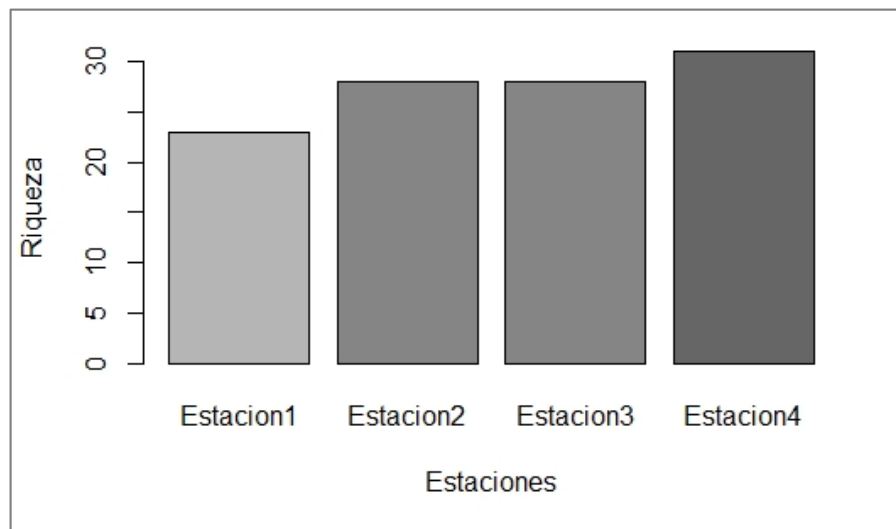


Tabla 6

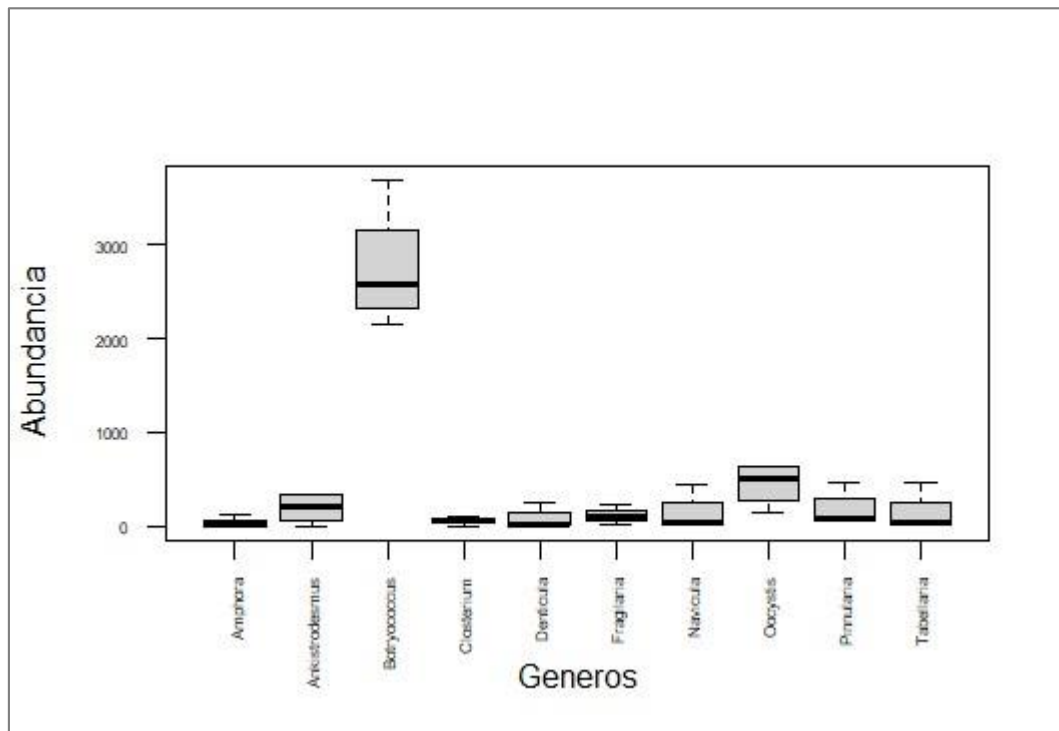
Valores del Índice de Shannon-Wiener en las estaciones de muestreo

Estaciones de Muestreo	Número total de Géneros	Riqueza	Índice de Shannon
Estación 1	23	3032	0.70
Estación 2	28	3995	1.50
Estación 3	28	5575	1.46
Estación 4	31	5599	2.28

En la figura 8 se pudo observar que los géneros *Botryococcus* y *Oocystis* del phylum *Chlorophyta* tienen mayor presencia superando los 10 000 y 1816 individuos respectivamente en las cuatro estaciones de muestreo. Por una parte, *Botryococcus* es una clorofita plantónica cosmopolita que se la encuentra principalmente en cuerpos de agua dulce ya sean reservorios, pantanos o lagos (Banerjee *et al.*, 2002). Sin embargo, su presencia es característica de lagos oligotróficos, se presentan en colonias con una morfología botroidal (Estevam *et al.*, 2022).

Figura 8

Abundancia de especies de fitoplancton

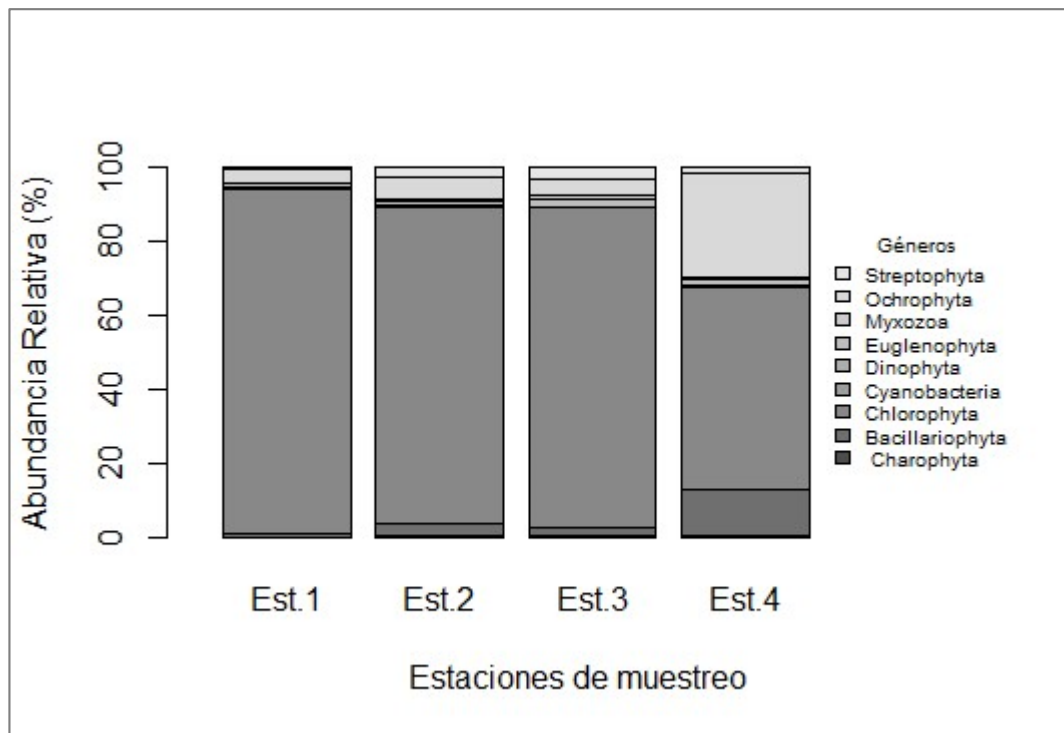


Además, este género compite de manera satisfactoria con otros organismos planctónicos especialmente en aguas someras puesto que las condiciones climáticas varían de acuerdo a la época estacional durante el año (Amenabar y Ottone, 2003). Esto se corrobora con Zolacar *et al.*, (1998) donde menciona que en los lagos tropicales es normal encontrar especies del género *Botryococcus* ya que son especies dominantes que contribuyen en más del 50% de la biomasa de dichos lagos. De igual manera se encuentra dominado por especies del genero *Oocystis* del mismo phylum que son especies comúnmente encontradas en lagos oligotróficos a hipertróficos (García *et al.*, 2003). Es importante mencionar que este grupo de algas verdes que incluyen al phylum *chlorophyta* son consideradas como relevantes ya que en los cuerpos de agua dulce mantienen una alta tolerancia que les permite desarrollarse en distintos hábitats y por lo general son un grupo que mejor representa al fitoplancton. Estos hallazgos coinciden con otras investigaciones en cuerpos lacustres someros de (Huber, 2010; Bazán, 2010; Becerra, 2009; Izaguirre *et*

al., 2004; O'Farrell *et al.*, 2003) donde encontraron las mencionadas especies de manera regular.

Figura 9

Abundancia relativa a nivel de phylum de fitoplancton



4.4.1.2. Índice de dominancia de Simpson

En cuanto a la dominancia de los géneros encontrados se observó que la estación 1 presenta un 25 % lo que demuestra que existe una distribución más equitativa entre los géneros con una alta dominancia del género *Botryococcus* que pertenece al phylum *Chlorophyta* y por ende presenta mayor diversidad, en cambio la estación 4 presenta un 82 % con alta dominancia de géneros de los phylum *Ochrophyta* seguido por *Chlorophyta* y *Bacillariophyta*, por lo tanto se la considera una comunidad menos diversa y con menor equidad ya que acaparan mayor número de individuos a diferencia de los otros géneros. Por otra parte, la estación 2 y 3 presentan un porcentaje de 57 % y 55 % respectivamente lo que demuestra que existe una equidad y dominancia similar. Por lo tanto, se pudo

constatar al igual que Baylón *et al.*, (2018) que la presencia de los taxones reunidos en los phylum antes mencionados a pesar de su equidad son dominantes especialmente en aguas limpias.

Tabla 7

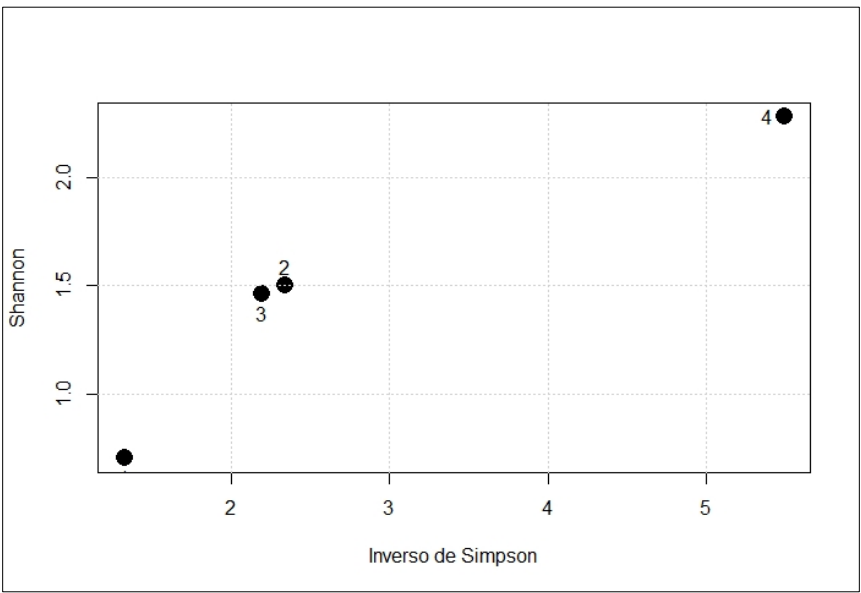
Valores del Índice de dominancia de Simpson

Estaciones de Muestreo	Número total de Géneros	Riqueza	Índice de Simpson	Índice Inverso de Simpson
Estación 1	23	3032	0.24	1.32
Estación 2	28	3995	0.57	2.33
Estación 3	28	5575	0.54	2.19
Estación 4	31	5599	0.81	5.48

Además, para interpretar de manera directa se aplicó el Índice Inverso de Simpson ya que este aumenta la diversidad en lugar de disminuirla, para lo cual los valores muestran que la estación 1 es menos diversa a diferencia de la estación 4 esto se puede corroborar con el índice de Shannon aplicado anteriormente donde la estación 1 es menos diversa y la estación 4 presenta mayor diversidad (Figura 10).

Figura 10

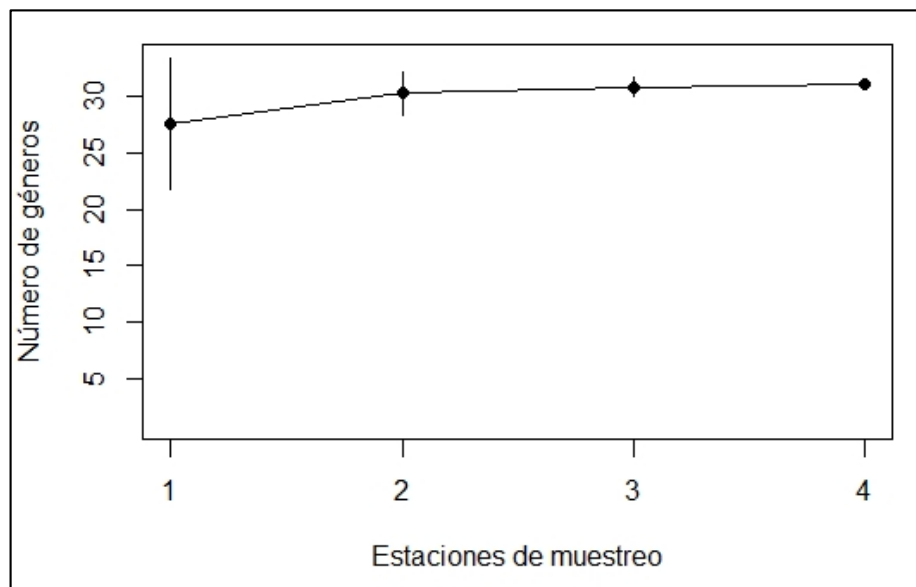
Relación entre índice de Shannon-Weaver e Inverso de Simpson



La curva de acumulación de especies (Figura 11) muestra que el esfuerzo de muestreo es acorde al número de especies muestreadas ya que al inicio de la curva va en aumento y posteriormente se presenta la asíntota estable, por lo tanto se considera que el muestreo ha abordado el mayor número de especies presentes en el área de estudio.

Figura 11

Curva de acumulación de especies



Además, se realizó la rarefacción basada en muestras ya que se logró encontrar la riqueza de especies esperada para un tamaño definido de muestra Tabla 8. Considerando que la rarefacción es una forma de remuestrear las estaciones de muestreo en función del tamaño de muestra único para todas las estaciones, esta corrección permitió comparar de manera directa la riqueza entre las muestras que tienen diferente tamaño.

Tabla 8

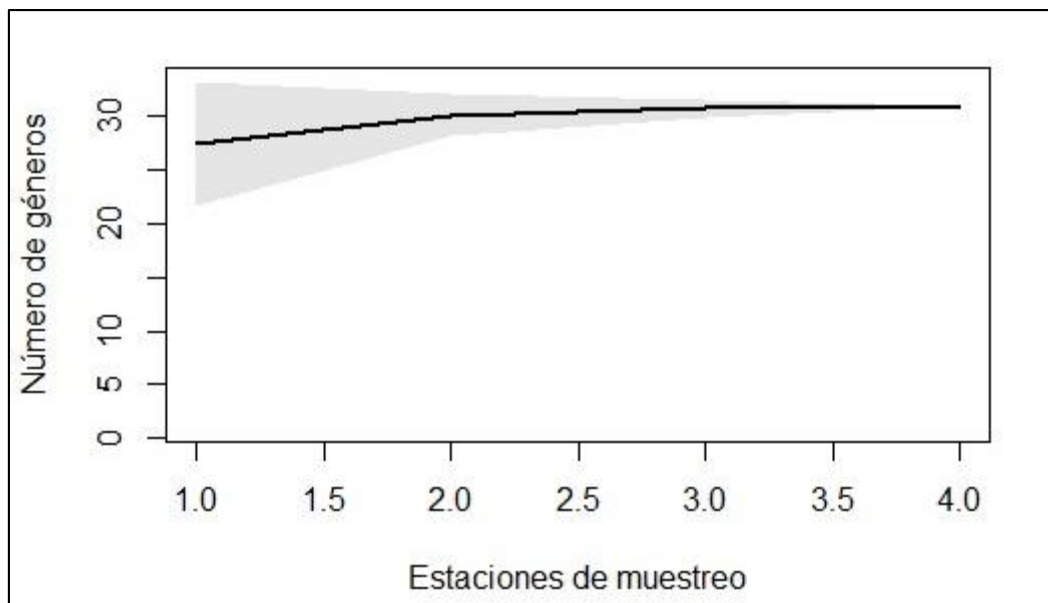
Valores de riqueza aplicando la rarefacción de las muestras

Estaciones de muestreo	1	2	3	4
Riqueza	27.7	30.2	30.8	31
Desviación estándar	2.8	0.9	0.4	0

Por lo tanto, se observó que para una sola estación de muestreo se tendría 27 géneros con dos estaciones se tendría 30 y así sucesivamente por lo que la curva tiende a estabilizarse a partir de la segunda estación indicando que el muestreo abarca la mayor cantidad de géneros presentes en la laguna El Voladero.

Figura 12

Curva de rarefacción



4.4.2. Experimento in situ

La laguna El Voladero al ser un cuerpo lacustre poco profundo presenta 2.10 m en su punto más profundo por lo que, el experimento fue implementado a 1m de profundidad considerando que la transparencia medida con el Disco Secchi es la misma que el punto más profundo y la temperatura del agua fue de 10 °C.

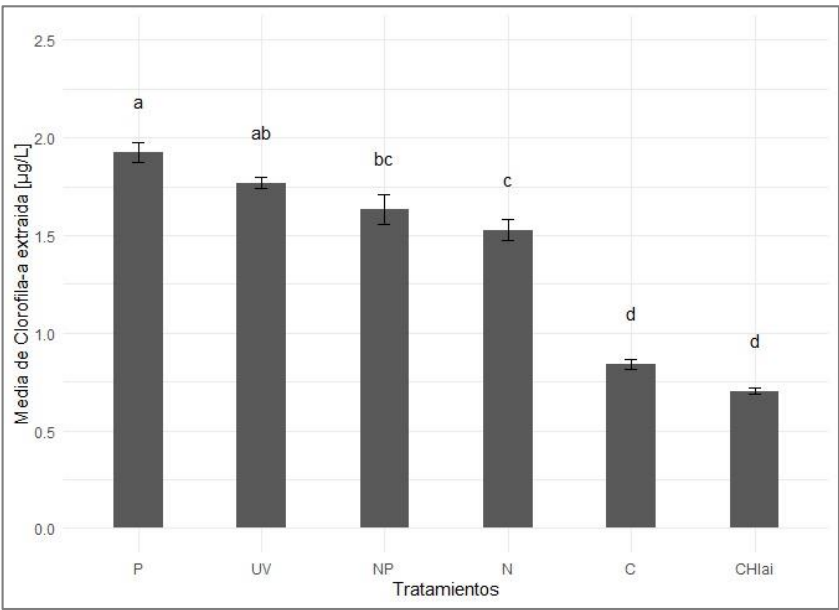
Pasado los siete días de incubación del experimento se realizó la extracción de clorofila de cada muestra obteniendo datos de 141 filtros, los datos se sometieron a una depuración y fueron tratados en el software Rstudio aplicando una transformación de BoxCox con la finalidad de corregir ciertos sesgos en su distribución y que los datos sean paramétricos, posteriormente se verificaron los supuestos estadísticos obteniendo la

normalidad con un p value de 0.1 por lo tanto o se tiene los elementos suficientes para rechazar la hipótesis nula por lo que se sugiere que los datos presentan una distribución normal. Además, el supuesto de homocedasticidad indicó que no se puede rechazar la hipótesis nula por lo que los datos presentan varianzas homogéneas, una vez aplicado el análisis de varianza se obtuvo que en al menos un tratamiento existen diferencias significativas ($F_{5,92} = 29.45$, $p < 0.05$) en los valores de clorofila de cada muestra.

Sin embargo, para tener una lectura específica de los tratamientos que difieren de los demás se aplicó una prueba posterior en este caso la Prueba de Tukey. En la Figura 13 se puede observar mediante una comparación pareada de promedios que los tratamientos de clorofila inicial y el control (CHLA-C), nitrógeno-fosforo con nitrógeno (NP-N), radiación ultravioleta con nitrógeno-fosforo (UV-NP) y radiación ultravioleta con fosforo (UV-P) no presentan diferencias significativas ya que no llegan a la línea vertical discontinua presentando un pvalue > 0.05 . No obstante, en la mayoría de los tratamientos restantes existen diferencias significativas con p values < 0.05 y se observa que el nitrógeno y fosforo actúan como nutrientes limitantes en el desarrollo y crecimiento de las comunidades fitoplanctónicas.

Figura 13

Prueba estadística de los experimentos in situ



4.5. Identificación de zooplancton

En la campaña realizada en cuatro estaciones de muestreo permitió identificar un total de 9 especies de zooplancton que conforman los tres grupos principales de los cuales cinco especies son rotíferos, dos especies cladóceros y dos especies copépodos. La presencia o ausencia de especies zooplanctónicas principalmente en sistemas lenticos continentales se encuentra relacionado directamente entre el gradiente de extinción de luz y la distribución del fitoplancton en la columna de agua (Toro *et al.*, 2012).

Tabla 9

Identificación de zooplancton

GRUPO	ESPECIE
Cladoceros	<i>Daphnia sp</i>
	<i>Bosmina</i>
	<i>Keratella cochlearis</i>

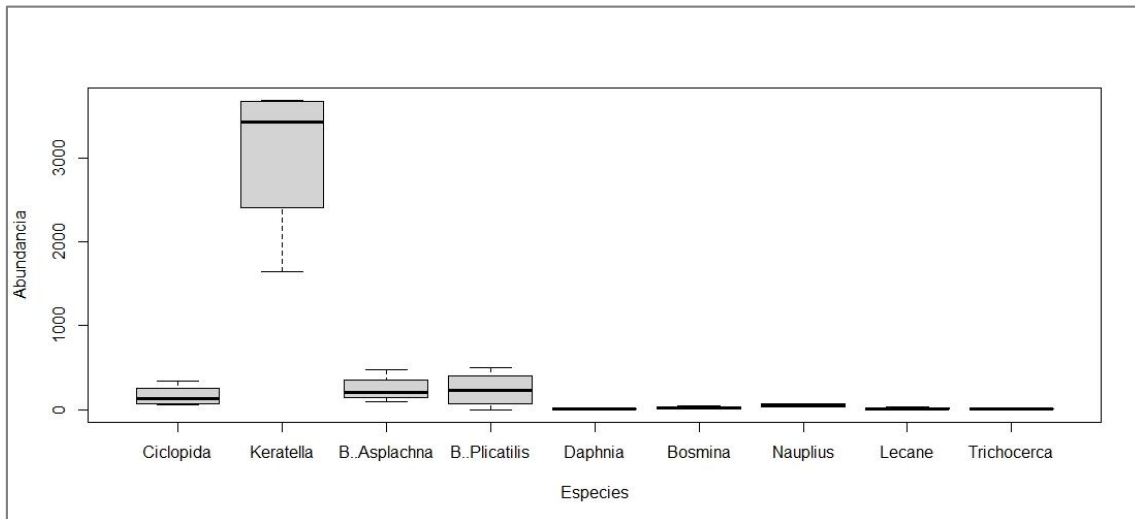
Rotíferos	<i>Brachionus Asplanchna</i>
	<i>Brachionus Plicatilis</i>
	<i>Lecane lunaris</i>
	<i>Trichocerca sp</i>
Copepodos	<i>Ciclopoida</i>
	<i>Nauplius ciclopoida</i>

4.5.1. Índice de biodiversidad de Shannon-Wiener

Los valores resultantes de la aplicación del índice de Shannon-Wiener muestran que en la estación 2 y 3 la riqueza y la equidad de las especies varían levemente ya que en ambas estaciones se encuentran 9 especies y mantienen una abundancia de 4033 y 4846 encontrando valores de 0.83 y 0.84 respectivamente. Mientras que, en la estación 1 el valor es de 0.71 ya que la riqueza y abundancia son menores con 8 especies y 2002 individuos. Asimismo, en la estación 4 se observa un valor de 0.65 que es el más bajo respecto al resto de valores demostrando así que existe inequidad ya que el grupo de rotíferos manifiesta la dominancia ante el resto de especies encontradas. En la figura 14 se observa que la especie de *keratella cochlearis* es la más abundante, seguida por la familia *brachionus* y del grupo de calanoide, este patrón se encuentra presente en las cuatro estaciones de muestreo. El zooplancton es abundante y diverso en los ecosistemas especialmente lenticos los cuales son muy dinámicos, en este caso los rotíferos están mejor representados por lo que se identificaron 5 de 9 especies, al igual que en un humedal ubicado en Tolima, Colombia los rotíferos son los más abundantes presentando una abundancia relativa de 83.41% (Carranza *et al.*, 2021). Asimismo Saelens (2015), encontró que en la laguna Yahuarcocha del norte del Ecuador la especie *keratella* es la más abundante mostrando un 39.48%.

Figura 14

Abundancia de especies de zooplancton



4.6. Índice del estado trófico

El índice del estado trófico (TSI) fue calculado tomando en cuenta los tres parámetros indicadores de eutrofia en cuerpos de agua según Carlson 1977 (Tabla10), los datos tomados a diferentes profundidades se promediaron a fin de tener un solo valor.

Tabla 10

Valores de los indicadores del TSI

Indicador	Valor
Transparencia del agua (D_s)	2.10 [m]
Fósforo Total (P_t)	< 60 [ug/L]
Nitrógeno Total (N_t)	430 [ug/L]
Clorofila-a (Cl-a)	0.77 [ug/L]

Una vez aplicadas las ecuaciones del índice de estado trófico se obtuvo 49.30 para Disco Secchi, 63.19 Fósforo Total y 27.90 clorofila-a. Por lo tanto, el valor del TSI_T fue de 46.80, éste valor se lo comparó con la tabla de clasificación de estado trófico de la OECD

1982 y Carlson 1977. Cabe mencionar que la clasificación de la OECD fue diseñada especialmente para lagos templados, sin embargo, según la discusión en la literatura se toma en cuenta los valores de referencia para lagos tropicales debido a que a menudo presentan limitación por nitrógeno (Esteves, 2011). Por otra parte, (Huszar *et al.*, 1998) mencionan que para clasificar a los lagos tropicales resulta más útil tomar en cuenta el tamaño de fitoplancton y a las especies dominantes en lugar de los criterios basados en la concentración de nutrientes.

Según el índice de estado trófico de Carlson (1997) la laguna El Voladero se encuentra en estado mesotrófico ya que el valor de TSI_T (46.80) se encuentra en el rango de 41-50, a pesar de que los valores de Disco Secchi (49.30), $Cl-a$ (0.76) y N_t corresponden a un estado oligotrófico el P_t indica un estado eutrófico. Considerando que el fósforo es uno de los parámetros indicadores de eutrofización necesariamente debe existir alta concentración de nutrientes conjuntamente con el nitrógeno y clorofila para considerar a la laguna en estado eutrófico, en este caso el alto nivel de fósforo a diferencia del resto de parámetros altera de alguna manera la aplicación del índice dando como resultado un estado mesotrófico a pesar de que la mayoría de los parámetros demuestra que es oligotrófico, la laguna El Voladero en la actualidad no presenta actividades antrópicas que determinen la eutrofización del mismo.

Sin embargo, la presencia considerable de fósforo se asocia a las características de la geología del suelo ya que la composición química y mineralógica especialmente en los suelos de páramo contienen minerales ricos en fósforo que son liberados a manera de iones permitiendo que este compuesto se disuelva en el agua y sea transportado a través del flujo hacia la laguna (Hofstede *et al.*, 2002), además, el tipo de suelo que se encuentra en los ecosistemas páramos son principalmente andisoles que tienen la capacidad de

almacenar agua y son ricos en materia orgánica de descomposición lenta (Silva *et al.*, 2021).

4.7. Análisis de Correspondencia Canónica (ACC)

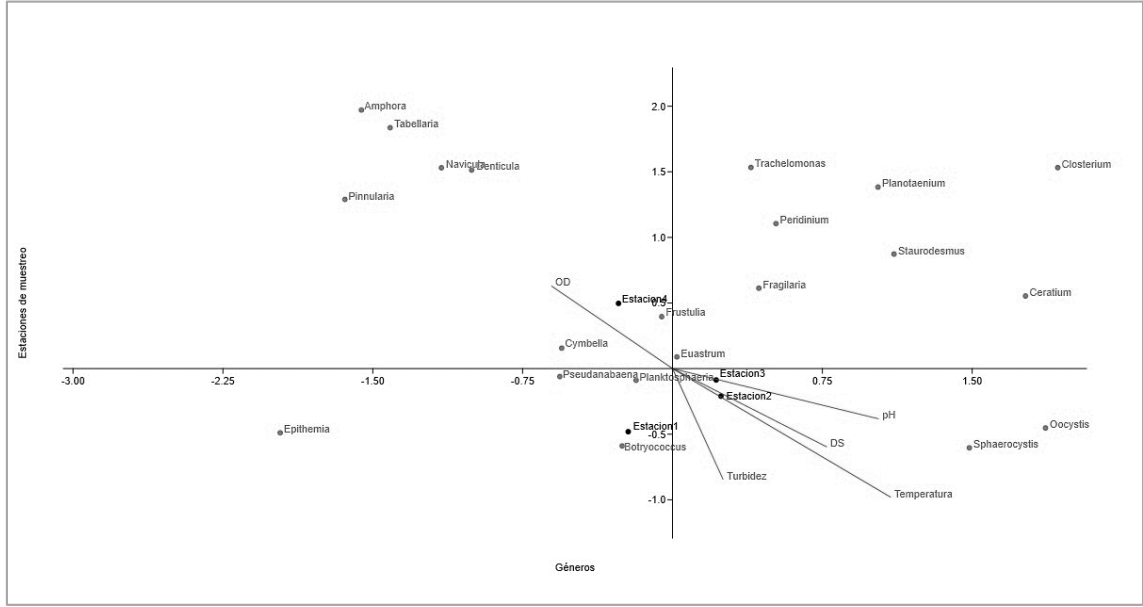
Una vez realizado el ACC (Figura 15), se obtuvo que el primer eje explica un 52.57 % la relación existente de entre las variables ambientales o parámetros fisicoquímicos con las especies de fitoplancton. Sin embargo, de manera similar el segundo eje muestra el 47.43 % de variabilidad, aunque el porcentaje es más bajo que el primero sigue siendo importante en la explicación de la correlación entre variables. No obstante, el análisis de correspondencia canónico muestra que existe multicolinealidad y redundancia ya que algunas variables están altamente correlacionadas entre sí, por lo tanto conlleva a la multicolinealidad en el presente modelo. Esto hace que algunas especies no contribuyan de manera significativa a la explicación en la variación de los datos (León *et al.*, 2008). A manera de verificación se realizaron permutaciones las cuales mostraron que la correlación no es significativa ya que se obtuvieron valores $p > 0.05$. En ese contexto, de manera general se observó que la estación 1 posee menor abundancia de géneros, no obstante, se observó mayor abundancia de la especie *Botryococcus* y se encuentra en una zona con menor oxígeno disuelto ya que son especies tolerantes a altas concentraciones de nutrientes donde el oxígeno es escaso (Hernández *et al.*, 2014).

Además, las estaciones 2 y 3 presentan valores de pH con tendencia a básicos y existe abundancia de especies de los géneros *Sphaerocystis* y *Oocystis*, considerando un pH de 6.5 se asume que estas especies se desarrollan en ambientes acuáticos saludables, según (Silva y Felisberto, 2015) por otra parte, la estación 4 presenta mayor variabilidad en la abundancia de especies de los géneros *Denticula*, *Navicula*, *Tabellaria*, *Amphora*, *Micrasteria* y *Pinnularia* su presencia también se relaciona a las zonas donde el oxígeno disuelto es prácticamente alto. Además, se observó que la mayoría de las especies se

encuentran ampliamente distribuidas y no se asocian con los parámetros fisicoquímicos ni con las estaciones de muestreo demostrando que pueden alcanzar altos rangos de tolerancia y en este caso no son vulnerables a los cambios que puedan existir en las variables físicas y químicas del entorno.

Figura 15

Análisis de correspondencia canónica entre variables fisicoquímicas con especies de fitoplancton



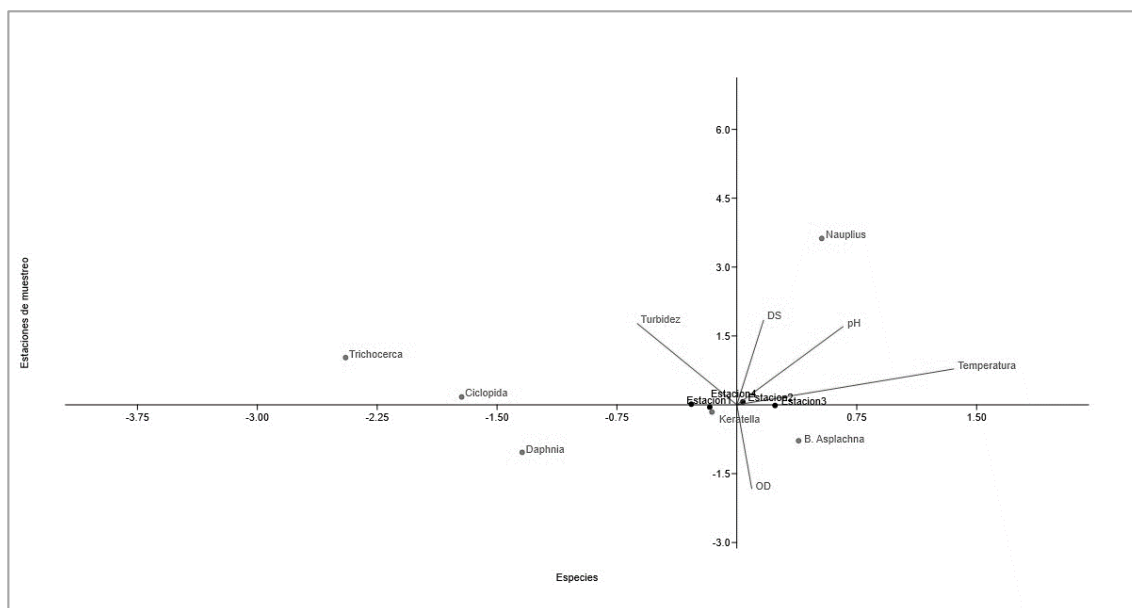
Por otra parte, el análisis de correspondencia canónico entre las variables fisicoquímicas con las especies de zooplancton muestra que el primer eje es muy importante ya que permitió relacionar de manera efectiva la relación entre las variables con un 94.45%. Por lo tanto, las diferencias observadas en la posición de las estaciones de muestreo a lo largo de este eje están fuertemente asociadas con las diferencias en las características fisicoquímicas y a la composición de especies de zooplancton. Mientras que, el segundo eje explica una cantidad mucho menor de la variabilidad total de los datos, es así que las diferencias adicionales en las posiciones de las estaciones de muestreo a lo largo de este eje están relacionadas con aspectos más específicos o menos dominantes de las características fisicoquímicas y la composición de especies de zooplancton que no se asocian al primer eje. Además, se realizaron permutaciones donde se obtuvo un valor de $p > 0.05$ indicando que la correlación no es significativa.

Para lo cual, en la figura 16 se observó que en la última estación de muestreo la especie de *keratella* es la más abundante y en la estación 3 la especie más abundante es *Brachionus asplachna* y se encuentra asociada al parámetro oxígeno disuelto, es importante mencionar que el grupo de los rotíferos es muy diverso y por lo general se vuelve dominante en ecosistemas con baja producción fitoplanctónicas y en ambientes someros donde hay importantes fluctuaciones en el nivel del agua, por otra parte el incremento de la conductividad y oxígeno disuelto aumenta la producción de fitoplancton y por ende las densidades poblacionales de los rotíferos se ven favorecidas ya que existe mayor incremento del recurso alimenticio (Rodríguez, 2003). No obstante, el oxígeno disuelto es uno de los factores que se relaciona directamente con las poblaciones de rotíferos.

Los nauplius que son las larvas de los *ciclopoides* tienen cierta afinidad con la transparencia de disco secchi, por lo que la composición de estas especies está determinada por las condiciones ambientales y la alteración en su distribución poblacional es indicio de perturbaciones en los sistemas acuáticos, sin embargo es una especie que mantiene una distribución cosmopolita (Quirós *et al.*, 2002). Asimismo, la especie *Bracchionus plicatilis* tiene afinidad con la temperatura puesto que es capaz de sobrevivir en un amplio rango de temperatura ya que tolera y se adapta a cualquier tipo de ambiente (Velasco *et al.*, 2005). En cuanto al resto de especies en su mayoría se encuentran altamente distribuidas y no se relacionan con los parámetros fisicoquímicos sobre todo la especie *Bosmina* que se encuentra muy alejada a las variables del entorno y de las estaciones de muestreo.

Figura 16

Análisis de correspondencia canónica entre variables fisicoquímicas con especies de zooplancton



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La laguna El Voladero al encontrarse ubicada en el norte del Ecuador en un ecosistema páramo, las condiciones climáticas marcan un patrón considerable que define a la época seca y lluviosa por lo tanto, dichas características juegan un papel importante en la dinámica entre variables del entorno con el sistema lacustre. Ésta laguna abarca una superficie de 0.64km² considerándola pequeña con una forma irregular subcircular y a su vez presenta una zona litoral poco desarrollada por lo que la forma de la cubeta es uniformemente cóncava y su punto más profundo es de 2.1 m considerándola como una laguna sómera.
- Los índices de diversidad aplicados demostraron que la laguna es biodiversa de acuerdo a su riqueza de especies de fitoplancton encontrando 32 géneros donde las especies más abundantes son *Botryococcus* que presenta alrededor de 10000 individuos seguido del género *Oocystis*, estas especies se denominan cosmopolitas y se encuentran en gran medida en lagos oligotróficos, por otra parte la presencia de zooplancton es limitada encontrando 9 especies distribuidas en los tres grandes grupos que son Cladoceros, Copepodos y Rotíferos, de este último grupo *Keratella cochlearis* es la especie más abundante, el desarrollo y crecimiento de las comunidades planctónicas dependen del nitrógeno y fósforo que actúan como nutrientes limitantes.
- El índice de estado trófico de Carlson 1977 aplicado en este estudio muestra que la laguna se encuentra en un estado mesotrófico y que las comunidades tanto de fitoplancton como de zooplancton en su mayoría no se relacionan con parámetros fisicoquímicos mostrando valores de $p > 0.05$. por lo tanto, se considera que las especies identificadas en este estudio no son vulnerables a grandes cambios en la composición física ni química del agua.

5.2. Recomendaciones

- Dado que la laguna El Voladero se encuentra en un ecosistema de páramo, es fundamental implementar estrategias de monitoreo continuo tanto durante la época seca como la lluviosa, ya que las variaciones climáticas impactan significativamente en su dinámica. Debido a su pequeña superficie y su condición de laguna somera, se recomienda priorizar estudios que analicen los cambios en la calidad del agua y la biodiversidad de su zona litoral. Además, el manejo adecuado del entorno debe enfocarse en la conservación del ecosistema circundante, dado que la laguna presenta una zona litoral poco desarrollada, lo que la hace particularmente sensible a las alteraciones ambientales.
- La laguna El Voladero al presentar una alta diversidad de fitoplancton con 32 géneros, es importante implementar estrategias de conservación para mantener su biodiversidad. Sin embargo, debido a la limitada presencia de zooplancton y la dependencia de nutrientes como nitrógeno y fósforo para el desarrollo de las comunidades planctónicas, se recomienda monitorear periódicamente estos nutrientes y las interacciones tróficas para asegurar el equilibrio del ecosistema. Además, es necesario evaluar el estado trófico y las condiciones del agua ya que las especies planctónicas no parecen vulnerables a grandes cambios y es importante seguir observando cualquier variación en la calidad del agua para prevenir alteraciones que puedan afectar el ecosistema a largo plazo.

REFERENCIAS

- Alcocer, J., Delgado, C. y Sommaruga, R. (2020). Photoprotective compounds in zooplankton of two adjacent tropical high mountain lakes with contrasting underwater light climate and fish occurrence. *Journal of Plankton Research*, 42(2), 105-118.
- Amenabar, C. R., y Ottone, E. G. (2003). La aplicación de *Botryococcus* (Chlorococcales) como indicador paleoambiental en el Triásico de Argentina. *Revista Española de Micropaleontología*, 35(2), 161-169.
- Akkoyunlu, A., Altun, H. y Cigizoglu, H. K. (2011). Depth-integrated estimation of dissolved oxygen in a lake. *Journal of Environmental Engineering*, 137(10), 961-967.
- Bao, R., Hernández, A., Sáez, A., Giralt, S., Prego, R., Pueyo, J. y Valero-Garcés, B. L. (2015). Climatic and lacustrine morphometric controls of diatom paleoproductivity in a tropical Andean lake. *Quaternary Science Reviews*, 129, 96-110.
- Barriga, R. y Ternaus, E. (2005). Primer hallazgo de una población paleoendémica del pez *Grudulus cf. Bogotensis* (Humboldt, 1821) en los altos andes del Ecuador. *Politécnica*, 26(1). 7-19.
- Barta, B., Mouillet, C., Espinosa, R., Andino, P., Jacobsen, D. y Christoffersen, K. (2018). Glacial-fed and páramo lake ecosystems in the tropical high Andes. *Hydrobiologia*, 813(1), 19-32.
- Baylón, M., Roa, K., Libio, T., Tapia, L., Jara, E., Macedo, D. y Dextre, A. (2018). Evaluación de la diversidad de algas fitoplanctónicas como indicadores de la

- calidad del agua en lagunas altoandinas del departamento de Pasco (Perú). *Ecología Aplicada*, 17(1), 119-132.
- Baylón Coritoma, M., Roa Castro, K., Libio Sánchez, T., Tapia Ugaz, L., Jara Pena, E., Macedo Prada, D., ... & Dextre Rubina, A. (2018). Evaluación de la diversidad de algas fitoplanctónicas como indicadores de la calidad del agua en lagunas altoandinas del departamento de Pasco (Perú). *Ecología aplicada*, 17(1), 119-132.
- BazaN, G. (2010). Estudio ficologicos en el sistema lenitico de La Arocena, departamento de Maraco, La Pampa, Argentina.
- Banerjee, A., Sharma, R., Chisti, Y. y Banerjee, UC (2002). *Botryococcus braunii*: una fuente renovable de hidrocarburos y otras sustancias químicas. Revisiones críticas en biotecnología, 22 (3), 245-279.
- Becerra, C. (2009). Catálogo fitoplanctónico de los lagos del Dique, municipio de Xalapa, Veracruz, México (Doctoral dissertation, Tesis de licenciatura). Universidad Veracruzana: Veracruz, México).
- Benjumea, C, Wills, Á., y Aguirre, N. (2008). Principales aspectos morfométricos de la ciénaga de Cachimbero, Santander-Colombia. *Gestión y ambiente*, 11(2), I-VIII.
- Bécares, E., Conty, A., Rodríguez-Villafañe, C., & Blanco, S. (2004). Funcionamiento de los lagos someros mediterráneos. *Ecosistemas*, 13(2), 2-12.
- Bernot, R., Dodds, W., Quist, M., y Guy, C. (2004). Spatial and temporal variability of zooplankton in a Great Plains reservoir. *Hydrobiologia*, 525(1), 101-112.
- Bresciani, M., Giardino, C., & Boschetti, L. (2011). Multi-temporal assessment of bio-physical parameters in lakes Garda and Trasimeno from MODIS and MERIS.

Italian Journal of Remote Sensing/Rivista Italiana di Telerilevamento, 43(3), 49-62.

Brenner, M., Islebe, G., Lozano, M., Scharf, B. y Schwalb, A. (2013). Bioindicators of climate and trophic state in lowland and highland aquatic ecosystems of the Northern Neotropics. *Revista de Biología Tropical*, 61(2), 603-644.

Brezonik, P. (1984). Trophic state indices: rationale for multivariate approaches. *Lake and Reservoir Management*, 1(1), 441-445.

Brodnjak, D., Dobčnik, D., Novič, M. y Zupan, J. (2002). Chemometrics characterisation of the quality of river water. *Analytica Chimica Acta*, 462(1), 87-100.

Carlson, R. (1977). A trophic state index for lakes 1. *Limnology and oceanography*, 22(2), 361-369.

Casallas, J y Gunkel, G. (2001). Algunos aspectos limnológicos de un lago altoandino: el lago San Pablo, Ecuador. *Limnetica* 20(2): 215-232

Catalan, J. y Donato, J. Perspectives for an integrated understanding of tropical and temperate high-mountain lakes. *Journal of Limnology*, 75.

Carranza, H., Gordillo, J. y Reinoso-Flórez, G. (2021). Rotíferos, copépodos y branquiópodos presentes en un humedal del departamento del Tolima, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(175), 421-431.

Castillo, M. (2003). Morfometría de lagos. Una aplicación a los lagos del Pirineo. Universitat de Barcelona.

- Curcio, J. Cueto, J. y Ortíz, L. (2018). Caracterización morfométrica de una laguna costera neotropical (ciénaga El Chino, Magdalena-Colombia). *Intropica: Revista del Instituto de Investigaciones Tropicales*, 13(1), 21-29.
- Chanamé, F., Custodio, M., Poma, C., & Cruz, A. (2020). Nutrient concentrations and trophic state of three Andean lakes from Junín, Perú. *Revista Ambiente & Água*, 15(4).
- Chulde, W. (2020). Elaboración de una guía turística de la laguna “El Salado”, ubicada en el Cantón Montúfar, Provincia del Carchi, [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10830>
- Deng, C., Wei, X. y Guo, L. (June 21-23, 2006). *Application of neural network based on PSO algorithm in prediction model for dissolved oxygen in fishpond*. In 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, China.
- Dolbeth, M., Pardal, M., Lillebø, A., Azeiteiro, U., y Marques, J. (2003). Short-and long-term effects of eutrophication on the secondary production of an intertidal macrobenthic community. *Marine Biology*, 143(6), 1229-1238.
- Edding, M., Tala, F., y Vásquez, J. (2006). Fotosíntesis, productividad y algas marinas. *Fisiología Vegetal*. Ediciones Universidad de La Serena, 1-39.
- Estevam, B. Pinto, L. Maciel, R. y Fregolente, L. (2022). Posibles aplicaciones de *Botryococcus terribilis*: una revisión. *Biomasa y Bioenergía*, 165, 106582.
- Esteves, F. (2011). edition 3. *Fundamentos de Limnología*. Rio de Janeiro. Interciencia.
- Fornerón, C. Piccolo, M., y Carbone, M. (2010). Análisis morfométrico de la laguna Sauce Grande (Argentina).

- Flores, S. (2019). Relevamiento de flora del área protegida Bosque de Bolognia para la obtención de un índice de diversidad Shannon Wiener a través de una aplicación móvil. *Fides et Ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 17(17), 215-238.
- Fontúrbel, F. (2005). Indicadores fisicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del Lago Titikaka (Bolivia). *Ecología aplicada*, 4(1-2), 135-141.
- Fontúrbel, F. (2003). Algunos criterios biológicos sobre el proceso de eutrofización a orillas de seis localidades del lago Titikaka. *Ecología Aplicada*, 2(1), 75-79.
- Flores Miranda, S. (2019). Relevamiento de flora del área protegida Bosque de Bolognia para la obtención de un índice de diversidad Shannon Wiener a través de una aplicación móvil. *Fides et Ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 17(17), 215-238.
- Gama, J., Sarma, S., López, A. (20019). Effects of cladoceran-conditioned medium on the demography of brachionid rotifers (Rotifera: Brachionidae). *Hydrobiologia* 844, 21–30
- García, C., Román, C., Vanegas, A y Arcila, D. (2007). Análisis fisicoquímico y biológico comparado en dos quebradas de alta montaña neotropical. *Revista de Investigaciones de la Universidad del Quindío*, 17, 57-80.
- Gonzales, J., Medina, J. y Carrillo, P. (2021). Fluctuation at High Temperature Combined with Nutrients Alters. *Microbial Ecology*, 1-13
- Gerten, D., & Adrian, R. (2002). Effects of climate warming, North Atlantic Oscillation, and El Nino-Southern Oscillation on thermal conditions and plankton dynamics in northern hemispheric lakes. *TheScientificWorldJOURNAL*, 2, 586-606.

- García, J., Molina, F., Miranda, E., Soriano, M., y Díaz, M. (2015). Variación fitoplanctónica en un lago urbano del municipio de Cuernavaca, Morelos, México. *Acta universitaria*, 25(1), 03-11.
- Gómez, J., Peña, B., Guzmán, J., y Gallardo, V. (2013). Composición, abundancia del zooplancton y calidad de agua en un microreservorio en el estado de Morelos. *Hidrobiológica*, 23(2), 227-240.
- Gunkel, G. (2000). Limnology of an equatorial high mountain lake in Ecuador, Lago San Pablo. *Limnologica*, 30(2), 113-120.
- Gunkel, G. (2003). Limnología de un Lago Tropical de Alta Montaña, en Ecuador: Características de los sedimentos y tasa de sedimentación. *Revista de Biología Tropical*, 51(2), 381-390.
- Gunkel, G. y Beulker (2009). Limnology of the Crater Lake Cuicocha, Ecuador, a Cold Water Tropical Lake. *Hydrobiology*, 94(1). 103-125.
- Gunkel, G. y J. Casallas. (2002). "Limnology of an equatorial high mountain lake—Lago San Pablo, Ecuador: the significance of deep diurnal mixing for lake productivity". *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, (32), 33-43
- Hofstede, R., Coppus, R., Váscquez, P. M., Segarra, P., Wolf, J., y Sevink, J. (2002). El estado de conservación de los páramos de pajonal en el Ecuador. *Ecotropicos*, 15(1), 3-18.
- Huber, M., Novoa, M., y de Fabricius, A. L. M. (2011). Fitoplancton de una laguna endorreica de uso recreacional (Córdoba, Argentina). *Biológicas Revista de la*

DES Ciencias Biológico Agropecuarias Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 13(1), 24-33.

Hutchinson, George E. 1957. A Treatise on Limnology: Geography, Physics and Chemistry. Vol. 1. Londres: Chapman and Hall.

Huszar, V, Silva, L, Domingos, P, Marinho, M., y Melo, S. (1998). Phytoplankton species composition is more sensitive than OECD criteria to the trophic status of three Brazilian tropical lakes. In *Phytoplankton and Trophic Gradients: Proceedings of the 10th Workshop of the International Association of Phytoplankton Taxonomy & Ecology (IAP)*, held in Granada, Spain, 21–29 June 1996 (pp. 59-71). Springer Netherlands.

Herrera, M., Vera, D. y Valdiviezo, J. Dieta de *Grundulus quitoensis* (Characiformes: Characidae) una especie endémica de la Reserva Biológica El Ángel, Carchi, Ecuador. *Caldasia*, 42(2):181-187

Herzog, S., Martinez, R., Jørgensen, P. & Tiessen, H. (2011). Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 348 pp.

Hampton, S., Gray, D., Izmet'eva, L., Moore, M. & Ozersky, T. (2014). The rise and fall of plankton: long-term changes in the vertical distribution of algae and grazers in Lake Baikal, Siberia. *PLoS One*, 9(2).

Izaguirre, I., O'farrell, I., Unrein, F., Sinistro, R., dos Santos Afonso, M., & Tell, G. (2004). Algal assemblages across a wetland, from a shallow lake to relictual oxbow lakes (Lower Paraná River, South America). *Hydrobiologia*, 511, 25-36.

Jaime, S., Cervantes, A., Gutiérrez, M., Suárez, E., Juárez, J., Reyes, E. y Delgado, V. (2021). Historical Zooplankton Composition Indicates Eutrophication Stages in a

- Neotropical Aquatic System: The Case of Lake Amatitlán. *Central America. Diversity*, 13(9), 432.
- Jakhar, P. (2013). Role of phytoplankton and zooplankton as health indicators of aquatic ecosystem: A review. *International Journal of Innovation Research Study*, 2(12), 489-500.
- Jiang, X., Xie, J., Xu, Y., Zhong, W., Zhu, X., y Zhu, C. (2017). Increasing dominance of small zooplankton with toxic cyanobacteria. *Freshwater Biology*, 62(2), 429-443.
- Jurczak, T., Wojtal, A., Frankiewicz, P., Kaczkowski, Z., Oleksińska, Z., Bednarek, A. y Zalewski, M. (2019). Comprehensive approach to restoring urban recreational reservoirs. Part 2–Use of zooplankton as indicators for the ecological quality assessment. *Science of the Total Environment*, 653, 1623-1640.
- Kannel, P., Lee, S., Lee, Y., Kanel, S. y Khan, S. (2007). Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental monitoring and assessment*, 132(1), 93-110.
- Kuefner, W., Hofmann, A., Geist, J., Dubois, N., y Raeder, U. (2021). Algal community change in mountain lakes of the Alps reveals effects of climate warming and shifting treelines¹. *Journal of Phycology*, 57, 1266–1283.
- León, E., Vásquez, V., & Valderrama, M. (2021). Changes in precipitation and temperature patterns in Ecuador: highlands and eastern regions. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores*, 8.
- León, Á., Llinás, H., y Tilano, J. (2008). Análisis multivariado aplicando componentes principales al caso de los desplazados. *Ingeniería y desarrollo*, (23), 119-142

- Liang, D., Wang, Q., Wei, N., Tang, C., Sun, X., & Yang, Y. (2020). Biological indicators of ecological quality in typical urban river-lake ecosystems: The planktonic rotifer community and its response to environmental factors. *Ecological Indicators*, 112, 106-127.
- López, M. y Madroñero, S. (2015). Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: caso Laguna de La Cocha. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2).
- Maynaguez, E y Tumbaco, E. (2019). Estrategias de control y conservación en relación con la capacidad de almacenamiento hídrico de la laguna Huarmicocha, cantón Pedro Moncayo (Bachelor's thesis).
- Melack, J. (1979). Temporal Variability of Phytoplankton in Tropical Lakes. *Oecologia*, 44. 1-7.
- Michelutti, N., Labaj, A., Grooms, C. & Smol, J. (2016). Equatorial mountain lakes show extended periods of thermal stratification with recent climate change. *Journal of Limnology*, 75(2), 403-408.
- Miño, C. y Rodríguez, A. (2008). *Evaluación del estado trófico en relación al comportamiento de los parámetros físicos y biológicos del lago San Pablo, Ecuador* [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8580>
- Morales, F., Ujpan, D., y Valiente, S. (2018). Batimetría y análisis morfométrico del lago de Atitlán (Guatemala). *Revista Científica*, 27(2), 48-58.
- Mohamed, H., Negm, A., Zahran, M., y Saavedra, O. (2016). Bathymetry determination from high resolution satellite imagery using ensemble learning algorithms in

- Shallow Lakes: Case study El-Burullus Lake. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(4), 295.
- Montoya, Y. (2005). Caracterización morfométrica básica de tres lagos someros en el municipio de El Carmen de Viboral Antioquia), Colombia. *Actualidades Biológicas*, 27(82), 79-86.
- Montoya, Y. (2008). Morphometric characterization of a tropical fluviolacustrine system, Antioquia, Colombia. *Caldasia*, 30(2), 413-420.
- Narasimha, R., y Benarjee, G. (2013). Physico-chemical factors influenced plankton biodiversity and fish abundance-a case study of Nagaram tank of Warangal, Andhra Pradesh. *International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research*, 2(2), 248-260.
- O'Farrell, I., Sinistro, R., Izaguirre, I. & Unrein, F. (2003). Do steady state assemblages occur in shallow lentic environments from wetlands? *Hydrobiologia*, 502(1-3), 197-209.
- Oviedo, A. y Marin, M. (2017). Variación espacial y temporal de la diversidad y abundancia de cianobacterias del Lago de Yojoa (2014-2015). *Revista Ciencia y Tecnología*, 47-70.
- Padial, A. y Thomaz, S. (2008). Prediction of the light attenuation coefficient through the Secchi disk depth: empirical modeling in two large Neotropical ecosystems. *Limnology*, 9(2), 143-151.
- Padisak, J. y Naselli, L. (2021). Phytoplankton in extreme environments: importance and consequences of habitat permanency. *Hydrobiologia*, 848(1), 157-176.

- Pereira, V., y Portillo, E. (2021). Identificación y variación espacio-temporal del fitoplancton en el embalse Tacuary, Carmen del Paraná, Itapúa, Paraguay. *Revista Impacto*, 1(1), 12-23.
- Pérez, L., Lorenschat, J., Massafarro, J., Pailles, C., Sylvestre, F., Hollwedel, W., Oltmann, B., Rogora, M., Massafarro, J., Marchetto, A., Tartari, G., y Mosello, R. (2008). The water chemistry of some shallow lakes in Northern Patagonia and their nitrogen status in comparison with remote lakes in different regions of the globe. *Journal of Limnology*, 67(2), 75.
- Pinilla, G., Canosa, A., Vargas, A., Gavilán, M. y López, L. (2007). Acoplamiento entre las comunidades planctónicas de un lago amazónico de aguas claras (lago Boa, Colombia). *Limnetica*, 26 (1), 53-65.
- Pinto, R., Bezerra, J., Miranda, F., Mota, T., Resck, R., Santos, A. y Barbosa, F. (2008). The inverted trophic cascade in tropical plankton communities: impacts of exotic fish in the Middle Rio Doce lake district, Minas Gerais, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 68(4), 1025-1037.
- Ponce, M y Jiménez, M. (2009). *Proyecto de creación de una hostería en la ciudad de San Gabriel, Cantón Montúfar, Provincia del Carchi*. [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7337>
- Portilla, K. (2015). Evaluación del comportamiento de los parámetros físicos del agua, para determinar el estado trófico del Lago Yahuarcocha, Provincia Imbabura [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6928>

- Quirós, R., Rosso, J., Rennella, A., Sosnovsky, A., y Boveri, M. (2002). Análisis del estado trófico de las lagunas pampeanas (Argentina). *Interciencia*, 27(11), 584-591.
- Ramírez, A., Caballero, M., Vázquez, G., & Colón, C. (2020). Preface: Recent advances in tropical lake research. *Hydrobiologia*, 1-2.
- Rascón, J., Corroto, F., Tafur, D., y Torres, O. (2021). Variaciones limnológicas espaciotemporales de un lago altoandino tropical al norte de Perú. *Ecología Austral*, 31(2), 343-356.
- Rico, E., Chicote, A., González, M., y Montes, C. (1995). Batimetría y análisis morfométrico del lago de Arreo (N. España). *Limnética*, 11 (1), 55-58.
- Rivera, C., Zapata, A., y Donato, J. (2010). Estudio morfométrico del lago Guatavita (Colombia). *Acta Biológica Colombiana*, 15(3), 131-144.
- Rodas, E., y Vasquez, C. (2020). Evaluación anual del fitoplancton y su respuesta a la calidad de agua en el lago de Amatitlán, Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 7(2), 170-188.
- Rodríguez, C. (2003). Cambios en la estructura de la comunidad de rotíferos en el lago Yahuaraca. Planicie de inundación del Río Amazonas. Trabajo de grado (Biólogo). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá DC 122p.
- Rodríguez, J., y Miño Arias, C. (2018). Evaluación del estado trófico en relación al comportamiento de los parámetros físicos y biológicos del Lago San Pablo, Ecuador Rodríguez Fuelantala, Jenifer Andrea; Miño Arias, Cristina Aracely (Bachelor's thesis).

- Pujoni, D., Maia, P., Barbosa, F., Fragoso, C. y van Nes, E. (2016). Effects of food web complexity on top-down control in tropical lakes. *Ecological modelling*, 320, 358-365.
- Ruiz Guerrero, K., y Cuarán Mejía, D. (2019). Evaluación del estado trófico en relación a los parámetros físico-químicos y macroinvertebrados bentónicos del lago San Pablo, cantón Otavalo [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9415>
- Saelens, P. (2014). Ecological functioning of a eutrophic, high-altitude shallow lake in Ecuador, Laguna Yahuarcocha [Tesis de Posgrado, Katholieke Universiteit Leuven].
- Salas, R., Cruz, S., Castillo, E. y Guzmán, C. T. (2018). Análisis morfométrico y batimétrico de la laguna de Huamanpata, región Amazonas. *INDES Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable*, 2(2), 30-38.
- Salazar, M., Naundorf, G. y Medina, M. Composición, dinámica y abundancia de la comunidad fitoplanctónica de una laguna con aguas de origen volcánico. *Revista Luna Azul*, 32. 46-60
- Salmerón López, A., Geada López, G., & Fagilde Espinoza, M. D. C. (2017). Propuesta de un índice de diversidad funcional: Aplicación a un bosque semideciduo micrófilo de Cuba Oriental. *Bosque (Valdivia)*, 38(3), 457-466.
- Silva, J., Martínez, R., Serrano, C., & Lescano, G. (2021). Allophane, a natural nanoparticle present in andisoles of Ecuador, properties and applications. La Granja. *Revista de Ciencias de la Vida*, 33(1), 53-66.

- Silva, F., & Felisberto, S. (2015). Euastrum and Micrasterias (family Desmidiaceae) in lentic tropical ecosystem, Brazil. *Biota Neotropica*, 15, e20140079.
- Singh, M., Lodha, P., y Singh, G. (2010). Seasonal diatom variations with reference to physico-chemical properties of water of Mansagar Lake of Jaipur, Rajasthan. *Research Journal of Agricultural Sciences*, 1(4), 451-457.
- Steinitz, M., López, C., Jacobsen, D. & Guerra, M. (2020). History of limnology in Ecuador: a foundation for a growing field in the country. *Hydrobiologia*, 847(20), 4191-4206.
- Samboni, N., Carvajal, Y. & Escobar, J. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172-181.
- Samanez, I., Rimarachín, V., Palma, C., Arana, J., Ortega, H., Correa, V., & Hidalgo Del Águila, M. (2014). *Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú*.
- Schmid, B. y Koskiaho, J. (2006). Artificial neural network modeling of dissolved oxygen in a wetland pond: the case of Hovi, Finland. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(2), 188-192.
- Schabhüttl, S., Hingsamer, P., Weigelhofer, G., Hein, T., Weigert, A. y Striebel, S. (2013). Temperature and species richness effects in phytoplankton communities. *Oecologia*, 171(2): 527–536.

- Tiberti, R., Von Hardenberg, A. y Bogliani, G. (2014). Ecological impact of introduced fish in high altitude lakes: a case of study from the European Alps. *Hydrobiologia*, 724(1), 1-19.
- Timms, Brian Victor. 1992. Lake Geomorphology. Australia: Gleneagles Publishing.
- Velasco, J., Álvarez, M., y Sánchez, M. (2005). Comunidades planctónicas de los lagos de montaña de Neila (Burgos, España). *Ecología*, 19, 75-94
- Toro, D., Jaramillo, M., Correa, R., y Salgado, P. (2012). Estudio limnológico de la Laguna Negra. Zona Amortiguadora del P.N.N Los Nevados. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 16(2), 23-38.
- Van Colen, Portilla, K., Oña, T., Wyseure, G., Goethals, P., Velarde E. y Muylaert, K. Limnology of the neotropical high elevation shallow lake Yahuarcocha (Ecuador) and challenges for managing eutrophication using biomanipulation. *Limnologica*, 67. 37-44.
- Velasco, J., Álvarez, M. y Sánchez, M. (2005). Comunidades planctónicas de los lagos de Montaña de Neila (Burgos, España). *Ecología*, 19, 75-94.
- Vega, J., De Hoyos, C., Aldasoro, J., De Miguel, J. y Fraile, H. (2005). Nuevos datos morfométricos para el Lago de Sanabria. *Limnetica*, 24(1-2), 115-122.
- Villabona, S., Benjumea, C., Gutiérrez, J., López, M. y González, E. (2020). Variables fisicoquímicas y biológicas de mayor influencia en el estado trófico de cinco embalses andinos colombianos. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 344-359.

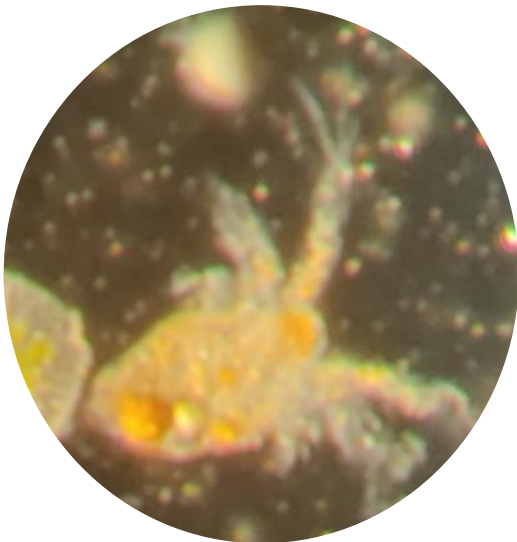
- Vinebrooke, R. y Leavitt, P. (1999). Phytobenthos and phytoplankton as potential indicators of climate change in mountain lakes and ponds: a HPLC-based pigment approach. *Journal of the North American Benthological Society*, 18(1), 15-33.
- Wan,W. y Makhrough, A. (2015). Water quality of tropical reservoir based on spatio-temporal variation in phytoplankton composition and physico-chemical analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(7), 2221-2232.
- Wetzel, R., y Likens, G. (2000). Análisis limnológicos. Medios de ciencia y negocios de Springer.
- Yang, C., Shen, X., Shi, X., Cui, Z., Nan, J., Lu, H., y Huang, Q. (2023). Impact of submerged macrophytes on growth and 2-MIB release risk of *Pseudanabaena* sp.: from field monitoringa to cultural experiments. *Journal of Hazardous Materials*, 442, 130052.
- Zalocar, D., Asselborn, V., y Casco, S. (1998). Variaciones espaciales y temporales del fitoplancton en un lago subtropical de Argentina. *Revista Brasileira de Biología* , 58 , 359-382.

ANEXOS

Anexo 1. Orden Calanoida



Anexo 2. Nauplio de calanoide



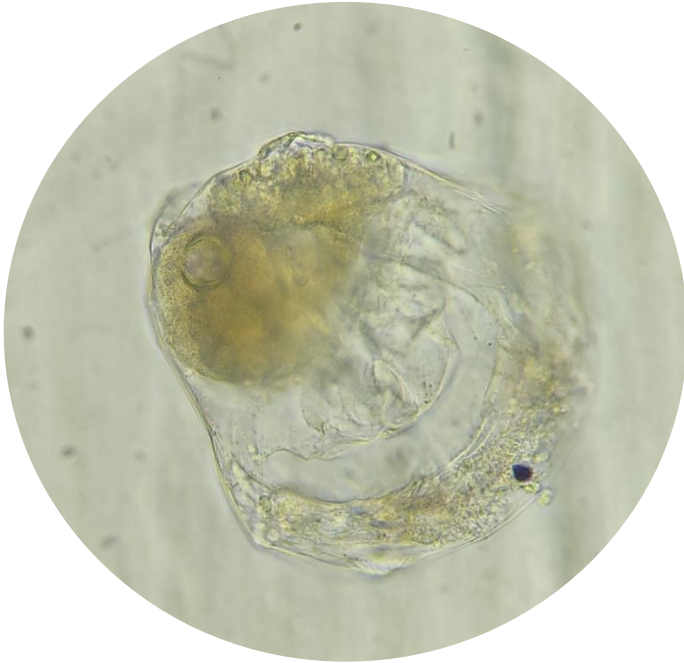
Anexo 3. *Keratella cochlearis*



Anexo 4. *Brachionus Asplanchna*



Anexo 5. *Brachionus angularis*



Anexo 6. *Lecane lunaris*



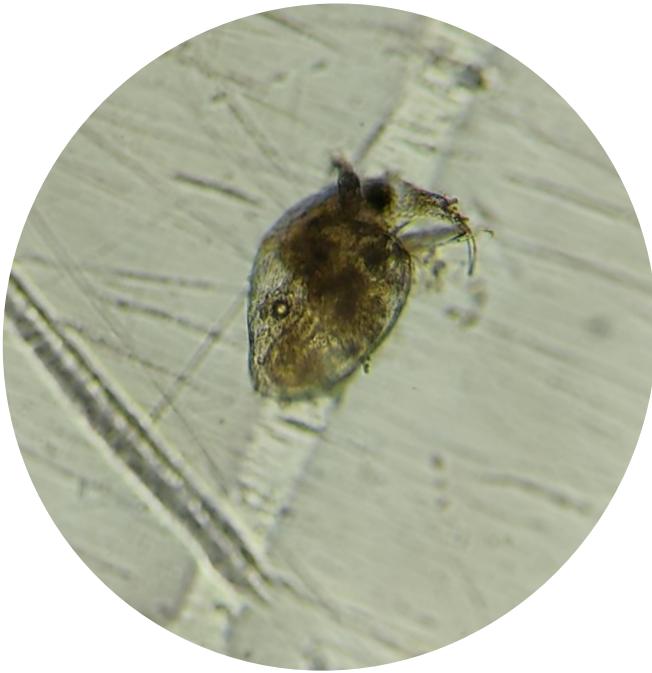
Anexo 7. *Trichocerca* sp



Anexo 8. *Daphnia* sp



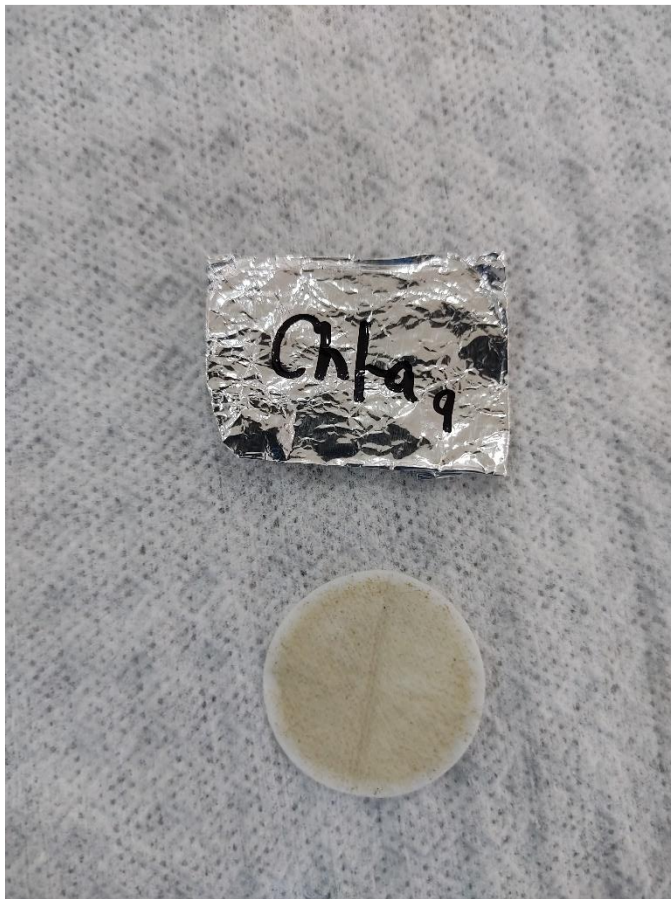
Anexo 9. *Bosmina* sp



Anexo 10. Extracción de clorofila-a



Anexo 12. Filtro saturado de clorofila-a



Anexo 13. Muestras de tratamiento in situ para evaluar en el fluorímetro

