

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

“Evaluación del comportamiento de los parámetros físico-químicos del
agua, para determinar el estado trófico del lago Cuicocha, Ecuador”

PLAN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PARA OBTENER EL
TÍTULO DE INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTOR:

Jair Bryan Estrella Herrera

DIRECTOR/A:

Ing. Delia Elizabeth Velarde Cruz MSc.

Ibarra, 2024



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

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: | 1004439228 | | |
| APELLIDOS Y NOMBRES: | ESTRELLA HERRERA JAIR BRYAN | | |
| DIRECCIÓN: | GUAYAQUIL DE CARANQUI | | |
| EMAIL: | jbestrellah@utn.edu.ec | | |
| TELÉFONO FIJO: | ----- | TELÉFONO MÓVIL: | 0939658416 |

| DATOS DE LA OBRA | |
|-----------------------------|--|
| TÍTULO: | EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS FÍSICO – QUÍMICOS DEL AGUA, PARA DETERMINAR EL ESTADO TRÓFICO DEL LAGO CUICOCHA, ECUADOR |
| AUTOR (ES): | ESTRELLA HERRERA JAIR BRYAN |
| FECHA: DD/MM/AAAA | 19/07/2024 |
| SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO | |
| PROGRAMA: | GRADO: X POSGRADO: |
| TÍTULO POR EL QUE OPTA: | Ingeniería en Recursos Naturales Renovables |
| ASESOR /DIRECTOR: | MSc. Elizabeth Velarde |

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 19 días del mes de julio de 2024

EL AUTOR:

Nombre: Estrella Herrera Jair Bryan

**CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**



Ibarra, 19 de Julio de 2024

MSc. DELIA ELIZABETH VELARDE CRUZ

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f) .....

MSc. DELIA ELIZABETH VELARDE CRUZ

C.C.: 1002587622

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR



El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular "EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS DEL AGUA, PARA DETERMINAR EL ESTADO TRÓFICO DEL LAGO CUICOCHA, ECUADOR" elaborado por ESTRELLA HERRERA JAIR BRYAN, previo a la obtención del título de INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte;

(f): 

MSc. DELIA ELIZABETH VELARDE CRUZ

C.C.: 100758762-2

(f): 

MSc. JAIRO SANTIAGO CABRERA GARCÍA

C.C.: 100731531-2

DEDICATORIA

Primero y ante todo, este logro se lo dedico a Dios, por ser mi guía, mi fuerza y mi refugio en todo momento. Por darme sabiduría, perseverancia y sobre todo el coraje para poder completar este logro.

Con profunda gratitud y amor, dedicado a mis padres, Adriana y Javier quienes, con su cariño, amor, paciencia y apoyo constante, me han enseñado el valor del esfuerzo y la dedicación. Sus enseñanzas, sacrificios y valores inculcados me han guiado y motivado en cada paso del camino.

A mis queridos hermanos, Jonathan, Shirley y Giselle, que han sido mis compañeros de vida, mis confidentes y mi apoyo incondicional para culminar este objetivo de vida, sus palabras de ánimo, su cariño y su constante fe en mí han sido una fuente invaluable de fortaleza y motivación.

Y a ti Estefanía, por tu amor incondicional, tu apoyo y por ser mi fuente constante de inspiración a lo largo de este viaje académico.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mis padres y a mis hermanos por siempre creer en mí, incluso en los momentos en que yo dudaba. Por sus palabras de aliento, por su paciencia infinita y por ser mi refugio en tiempos de incertidumbre. Sin su apoyo incondicional, este logro no hubiera sido posible.

A todos mis docentes que fueron parte de esta etapa, en especial a mi tutora MSc. Elizabeth Velarde y a mi asesor MSc. Santiago Cabrera por compartirme sus conocimientos y experiencias, por su apoyo, su paciencia y confianza en mi durante este proceso académico.

Agradezco a mis amigos y a todas las personas que formaron parte de esta importante etapa. Por la ayuda y el apoyo que me han brindado durante este largo camino.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| Contenido | Páginas |
|--|---------|
| CAPÍTULO I | 14 |
| INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1.1 Revisión de antecedentes o estado del arte | 14 |
| 1.2 Problema de investigación | 16 |
| 1.3 Justificación de investigación | 17 |
| 1.4 Objetivos | 17 |
| 1.4.1 <i>Objetivo General</i> | 17 |
| 1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i> | 17 |
| 1.5 Pregunta directriz de la investigación | 18 |
| 1.6 Hipótesis | 18 |
| CAPÍTULO II | 19 |
| REVISIÓN DE LA LITERATURA | 19 |
| 2.1 Marco teórico referencial | 19 |
| 2.1.2 <i>Conservación de los ecosistemas lacustres</i> | 19 |
| 2.2.3 <i>Limnología en lagos</i> | 19 |
| 2.1.4 <i>Índice de Estado Trófico (TSI)</i> | 20 |
| 2.1.5 <i>Características Físicas y Químicas de los ecosistemas lacustres</i> | 21 |
| 2.1.6 <i>Estratificación de los lagos</i> | 25 |
| CAPÍTULO III | 26 |
| METODOLOGÍA | 26 |
| 3.1 Descripción del área de estudio | 26 |
| 3.2 Métodos | 26 |
| 3.2.1 <i>Método para determinar las condiciones climáticas, morfológicas y parámetros físico-químicos in situ que rigen el área de estudio, basados en el protocolo de muestreo:</i> | 27 |
| a) <i>Condiciones Climáticas</i> | 27 |
| b) <i>Condiciones Morfológicas del Lago Cuicocha</i> | 27 |
| c) <i>Parámetros físico-químicos in situ, basados en el protocolo de muestreo.</i> | 27 |
| 3.2.2 <i>Método para determinar el estado trófico del Lago Cuicocha en base a los parámetros físico-químicos.</i> | 29 |
| a) <i>Cálculo del TSI</i> | 29 |
| b) <i>Clasificación General del Estado Trófico</i> | 30 |
| 3.2.3 <i>Método para diseñar una guía batimétrica como una estrategia de conservación del Lago Cuicocha.</i> | 30 |
| CAPÍTULO IV | 31 |

| | |
|---|----|
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 31 |
| 4.1 Analizar las condiciones climáticas, morfológicas y parámetros físico-químicos in situ que rigen el área de estudio en base a un protocolo de monitoreo. | 31 |
| a) Corte vertical de la cubeta lacustre..... | 34 |
| b) Corte transversal de la cubeta lacustre | 35 |
| 4.1.3 <i>Parámetros físico-químicos in situ que rigen el área de estudio en base a un protocolo de monitoreo.</i> | 36 |
| 4.2 Estado trófico del lago Cuicocha en base a los parámetros físico-químicos del agua..... | 41 |
| 4.2.1 Clasificación general del TSI | 42 |
| 4.3 Diseñar una guía batimétrica como estrategia de conservación del Lago Cuicocha. .. | 43 |
| 4.3.1 <i>Pasos a seguir para la batimetría en campo.</i> | 43 |
| 4.3.2 <i>Pasos del procesamiento de datos para obtener el mapa batimétrico</i> | 49 |
| CAPÍTULO V | 55 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 55 |
| 5.1 Conclusiones | 55 |
| 5.2 Recomendaciones..... | 55 |
| 6. ANEXOS | 59 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. <i>Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua</i> | 21 |
| Tabla 2. <i>Tabla de registro de parámetros morfológicos</i> | 33 |
| Tabla 3. <i>Tabla de datos en los diferentes puntos de muestreo</i> | 37 |
| Tabla 4. <i>Parámetros físicos y químicos de los puntos de muestreo</i> | 37 |
| Tabla 5. <i>Promedios obtenidos con la fórmula general de la clorofila</i> | 41 |
| Tabla 6. <i>Promedios generales de los parámetros para evaluar el TSI</i> | 41 |
| Tabla 7. <i>Clasificación general de Estado Trófico de la OECD y TSI Carlson</i> | 42 |
| Tabla 8. <i>Materiales y equipos de laboratorio</i> | 43 |
| Tabla 9. <i>Medición general de clorofila y control con el fluorímetro</i> | 66 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. <i>Mapa de ubicación del Lago Cuicocha</i> | 26 |
| Figura 2. <i>Diagrama Ombrotérmico de temperatura y precipitación</i> | 31 |
| Figura 3. <i>Mapa de puntos registrados por la sonda de profundidad</i> | 32 |
| Figura 4. <i>Mapa batimétrico del Lago Cuicocha con herramienta ArcScene (3D)</i> | 33 |
| Figura 5. <i>Corte vertical y transversal de la cubeta lacustre del Lago Cuicocha</i> | 34 |
| Figura 6. <i>Gráfica de corte vertical de la cubeta lacustre</i> | 35 |
| Figura 7. <i>Gráfica de corte transversal de la cubeta lacustre</i> | 35 |
| Figura 8. <i>Mapa batimétrico del Lago Cuicocha</i> | 36 |
| Figura 9. <i>Diagrama de comparación entre valores y promedio del D. secchi</i> | 38 |
| Figura 10. <i>Diagrama de comparación entre valores y promedio del O.D (mg/L)</i> | 38 |
| Figura 11. <i>Diagrama de comparación entre valores y promedio del O.D (%)</i> | 39 |
| Figura 12. <i>Diagrama de comparación entre valores y promedio de la Temperatura</i> ... | 40 |
| Figura 13. <i>Conexión del programa con el sistema de posición global</i> | 48 |
| Figura 14. <i>Configuración del rango de dimensión y tamaño del mapa</i> | 48 |
| Figura 15. <i>Recorrido y registro de puntos de la cubeta lacustre</i> | 49 |
| Figura 16. <i>Verificación de datos de latitud, altitud y profundidad</i> | 49 |
| Figura 17. <i>Archivos en formato csv delimitado por comas</i> | 50 |
| Figura 18. <i>Datos subidos al software</i> | 50 |
| Figura 19. <i>Proyección de coordenadas</i> | 51 |
| Figura 20. <i>Interpolación de datos con Kriging</i> | 51 |
| Figura 21. <i>Corte de raster con perfil de la cubeta</i> | 52 |
| Figura 22. <i>Realización de curvas de nivel</i> | 52 |
| Figura 23. <i>Escala de colores del mapa</i> | 52 |
| Figura 24. <i>Mapa final de batimetría del Lago Cuicocha</i> | 53 |
| Figura 25. <i>Uso de herramienta ArcScene</i> | 53 |
| Figura 26. <i>Mapa de la cubeta del Lago Cuicocha en 3D</i> | 54 |

RESUMEN

El presente estudio se realizó en el lago Cuicocha, sistema lacustre de origen volcánico del Ecuador, que en la actualidad presenta factores que pueden contaminar el lugar, por ser una zona de gran movimiento turístico, por ello fue necesario evaluar el comportamiento de los parámetros físicos y químicos del agua, para determinar en qué estado trófico se encuentra el lago actualmente y así tomar medidas de conservación del ecosistema en futuros proyectos e investigaciones. Se determinó las condiciones climáticas del área del estudio, en base a una recopilación de datos meteorológicos de precipitación (mm) y temperatura (°C) y se realizó un diagrama ombrotérmico para observar los meses secos y lluviosos. Se obtuvo las condiciones morfológicas del lago a través del estudio batimétrico, donde los datos obtenidos fueron procesados en el programa de Sistemas de Información Geográfica ArcGIS 10.8 generando un mapa batimétrico de la cubeta del lago, donde se determinó la profundidad máxima, amplitud, longitud, volumen, entre otros parámetros. Se evaluó los parámetros físicos y químicos como el disco secchi, temperatura, oxígeno disuelto y nutrientes, siguiendo el protocolo de muestreo del proyecto de investigación “Manejo Sostenible de los Lagos en el Norte de Ecuador bajo la Creciente de Actividades Económicas y el Cambio Climático” de la Universidad Técnica del Norte y VLIR-UOS Bélgica, finalmente se determinó el estado trófico del lago utilizando el índice de estado trófico (TSI) de Carlson 1977, empleando el promedio general del disco secchi (m), la clorofila (CHL a) y el fósforo total (PT), relacionando los resultados con el cuadro de la clasificación general del estado trófico según la OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) 1982, donde se obtuvo un índice de estado oligotrófico y considerándolo apto para la preservación y como una herramienta se diseñó una guía batimétrica.

Palabras clave: lago Cuicocha, Parámetros físicos y químicos, Índice de estado trófico, estudio batimétrico, parámetros morfológicos, oligotrófico.

ABSTRACT

This study was conducted in Lake Cuicocha, a lake system of volcanic origin in Ecuador, which currently presents factors that can contaminate the place, as it is an area of great tourist movement, so it was necessary to evaluate the behavior of the physical and chemical parameters of the water, to determine what trophic state the lake is currently in and thus take measures for the conservation of the ecosystem in future projects and research. The climatic conditions of the study area were determined, based on a compilation of meteorological data on precipitation (mm) and temperature (°C) and an ombrothermal diagram was made to observe the dry and rainy months. The morphological conditions of the lake were obtained through a bathymetric study, where the data obtained were processed in the Geographic Information Systems program ArcGIS 10.8, generating a bathymetric map of the lake basin, where the maximum depth, amplitude, length, volume, among other parameters, were determined. The physical and chemical parameters such as the secchi disk, temperature, dissolved oxygen and nutrients, following the sampling protocol of the research project "Sustainable Management of Lakes in Northern Ecuador under Increasing Economic Activities and Climate Change" of the Technical University of the North and VLIR-UOS Belgium, finally the trophic state of the lake was determined using the trophic state index (TSI) of Carlson 1977, using the general average of the secchi disk (m), chlorophyll (CHL a) and total phosphorus (PT), relating the results with the table of the general classification of the trophic state according to the OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) 1982, where a trophic state index oligotrophic lake and considering it suitable for the preservation through a bathymetric guide.

Key words: Cuicocha Lake, physical and chemical parameters, trophic state index, bathymetric study, morphological parameters, oligotrophic.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Revisión de antecedentes o estado del arte

El uso del agua de los lagos previamente tratada es de vital importancia para el consumo humano, proporcionan agua de riego para la agricultura, atracciones recreativas y turísticas como actividades de ocio y deporte. Además, son fuente de vida para los microorganismos y hábitats de varias especies animales y vegetales (Sánchez, 2021). El planeta cuenta con un gran porcentaje de agua disponible, donde un 0,3 % se considera como agua dulce líquida superficial y de esta cantidad el 90 % se acumula en los lagos y lagunas; a pesar de ello, son considerados ecosistemas bastante vulnerables por la cantidad de sustancias que pueden llegar como algunos minerales, materiales orgánicos, sedimentos, entre otros (López & Madroño, 2015).

Anta (2019) menciona que uno de los principales problemas en estos sistemas lacustres es la eutrofización, porque la composición de lagos se altera por la presencia de las actividades antrópicas que se desarrollan en el sitio. Los principales efectos de la eutrofización son el exceso de nutrientes que son absorbidos por plantas y algunos organismos que, al morir, son descompuestos por los microorganismos, involucrando un alto consumo del oxígeno disuelto, impidiendo la vida de otros seres vivos y ocasionando malos olores; causando también una disminución de la calidad del agua, cambio en las condiciones ambientales del entorno y generando un peligro en la salud humana (Soluciones Medioambientales y Agua [SMA], 2016). García-Miranda & Miranda-Rosales (2017) indican que de acuerdo con la ONU (Organización de las Naciones Unidas), a nivel mundial, el número de lagos con floraciones de algas perjudiciales aumentará un 20 % por lo menos hasta el año 2050 y se espera que la eutrofización de las aguas superficiales aumente aproximadamente en todas partes hasta el 2030.

En Latinoamérica existe una gran variedad de ecosistemas lacustres, que cumplen más de 20 servicios ambientales como abastecimiento de agua potable, riego, navegación, pesca, turismo entre otros; en Ecuador existe gran diversidad de ecosistemas de agua dulce, entre ellos 5 220 lagos y lagunas en las 4 regiones del país, donde los lagos de alta montaña son ecosistemas vulnerables sujetos a alteraciones en las características fisicoquímicas que impactan en sus condiciones biológicas y ecológicas (Durán, 2019). Morales (2017) señala que Imbabura es una provincia privilegiada, por sus diferentes paisajes, variedad de climas y

regiones; también conocida como la “Provincia de los Lagos”, por poseer alrededor de 30 lagos, entre los que destacan, Yahuarcocha, Puruhanta, Mojanda, Cuicocha y San Pablo.

Dentro de la Provincia de Imbabura se han realizado diferentes estudios en los lagos de alta montaña; Miño & Rodríguez (2018) explican que en el Lago San Pablo los resultados indican la importancia de adaptar una metodología que permita la obtención de datos durante la época seca en la que existen fuertes corrientes internas que impiden el ingreso adecuado de los equipos a la columna de agua lo que limitó que los parámetros físicos no permitan evaluar el estado trófico del lago por su alta variabilidad, en este caso fueron los parámetros biológicos que evaluaron al lago San Pablo como un ecosistema mesotrófico en un proceso de eutrofización; mientras que Portilla-Caicedo (2015) indica que en el Lago Yahuarcocha es importante destacar que los resultados mostraron que se encuentra en un estado eutrófico con posibilidades de llegar a un nivel hipertrófico, las variables utilizadas para calcular el TSI se midieron en los años de estudio (2013-2015) por separado, donde se indicó que en el lago los niveles de eutrofización están aumentando, y lo más adecuado para su conservación es implementar un seguimiento en estudios de los parámetros físicos, químicos y biológicos en este cuerpo de agua; así como Cabrera (2015) resalta que, en el Lago Yahuarcocha se pudo obtener el estado trófico gracias a los niveles de fósforo medidos, la transparencia y los bajos valores de riqueza y diversidad del zooplancton, colocando a este ecosistema como un Lago eutrófico polimíctico.

En el área de estudio se han realizado varias investigaciones, Gunkel & Beulker (2009) mencionan que en el lago Cuicocha de 3 380 m.s.n.m. la química del agua está influenciada por la emisión de dióxido de carbono (CO₂) y la meteorización de las rocas andesíticas jóvenes en la cuenca hidrográfica, donde se muestra que el lago del cráter se encuentra en un nivel oligotrófico, gracias al aporte de Fósforo (P) y Nitrógeno (N) de la cuenca con suelos jóvenes y a causa del bajo almacenamiento de nutrientes en el sistema lacustre; mientras que en un estudio de la Universidad Central del Ecuador sobre los lagos de Colta y Cuicocha se analizó la calidad fisicoquímica de estos ecosistemas, empleando metodologías como los muestreos *in situ*, realizando mediciones de conductividad eléctrica, pH, sólidos totales disueltos y la temperatura entre los años (2019-2021) con la ayuda de un equipo multiparámetro; demostrando que el lago Cuicocha presenta propiedades fisicoquímicas estables en las distintas zonas del sitio, a lo largo del año y de las estaciones climáticas que se muestran en la región (González et al., 2021).

1.2 Problema de investigación

Cuicocha a pesar de ser un lago protegido, también se muestran algunos problemas, una de las principales afectaciones en todo el mundo y dentro de los ecosistemas lacustres es el cambio climático generando alteraciones en el agua. Caballero & Vázquez (2019) mencionan que los lagos son considerados ecosistemas sensibles a los cambios climáticos, ya que el curso anual de la temperatura controla a la conducta termodinámica dentro de sus columnas de agua. Un estudio ha revelado que el cambio climático está afectando a los cuerpos de agua calentándolos en un promedio de 0,34 °C cada década, donde algunos científicos afirman que es mayor que la tasa de calentamiento de cualquier océano o atmósfera, generando grandes efectos negativos dentro del ecosistema acuático (O'Reilly, 2015).

El ser humano también es causante de generar cambios bruscos y alteraciones dentro de los ecosistemas lacustres, por ejemplo, dentro del lago Cuicocha se ha observado que existen actividad turística como: la Hostería Cuicocha UNORCAC (Unión de Organizaciones Campesinas e Indígenas de Cotacachi), Restaurante El Mirador, espacios de ventas de artesanías y servicios de lanchas, incrementando mayores bienes de consumo y servicios atendiendo a las necesidades de los turistas y población en general, logrando que los índices de contaminación estén activos (Manosalvas, 2017). Por otro lado, existen otro tipo de afectaciones dentro o alrededor del área que pueden generar impactos a lo largo del tiempo, como la presencia de pequeñas basuras en los senderos, destrucción de la vegetación, la intervención humana alrededor o cerca del sitio como actividades de ganadería y cultivos agrícolas, entre otros (Torres-Matovelle, 2017).

En el lago de Cuicocha los estudios científicos y técnicos son escasos, especialmente aquellos relacionados con los aspectos limnológicos, por lo que podría ser un problema a largo plazo ya que no se conoce datos suficientes para poder evaluar el estado trófico del agua. Un problema que muchos lagos y cuerpos de agua están presentando en la actualidad es la eutrofización, Cuicocha al ser un lago con un alto grado de conservación y no presentar muchas problemáticas de contaminación, no tendría un mayor problema de eutrofización, sin embargo, se podría presentar a lo largo del tiempo un aumento de este problema dentro del cuerpo de agua si no se realizan monitores periódicos que generen información necesaria para una gestión integral adecuada (Alarcón, 2019).

1.3 Justificación

El lago Cuicocha al encontrarse dentro de la Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas, es considerado un lago importante dentro del territorio por las especies que alberga de fauna como el cuy de monte (*Cavia porcellus*), zorro andino (*Lycalopex culpaeus*), lechuzas (*Tyto alba*), entre otros y de flora como *Bomarea multiflora*, *Calceolaria crenata*, *Tillandsia lajensis*, entre otras. Sin embargo, los estudios limnológicos dentro del lugar son casi nulos, por lo que es importante realizar este tipo de investigaciones enfocados en procesos de interrelaciones entre el medio acuático y su entorno, teniendo en cuenta la utilización racional del recurso hídrico y la conservación de la biodiversidad del entorno (Crisóstomo-Quillas, 2017).

Con estudios integrales de forma espacio-temporal de los cuerpos de agua se tendría una base de datos que identifique el estado actual y las posibles amenazas que en un futuro puedan repercutir en su conservación y serían la base para otras investigaciones limnológicas. Gracias a estos estudios se podría diseñar planes de manejo, en los cuales es necesario tener la caracterización de los parámetros físicos, que permitan obtener mayor información sobre el estado trófico que se encuentra en el cuerpo de agua y plantear posibles soluciones o estrategias de monitoreo y control, a nivel nacional poder incluir la aplicación y cumplimiento del objetivo once del Plan Nacional “Creando Oportunidades” que es: “Conservar, restaurar, proteger y hacer un uso sostenible de los recursos naturales” (Secretaría Nacional de Planificación [SNP], 2021) y los objetivos que tiene el proyecto de investigación de la Universidad Técnica del Norte: “Manejo Sostenible de Lagos en el Norte del Ecuador, bajo la Creciente Actividad Económica y el Cambio Climático” enfocada en obtener información del estado trófico del lago para posibles soluciones y estrategias.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento de los parámetros físico-químicos del agua para determinar el estado trófico del lago Cuicocha, Ecuador.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar las condiciones climáticas, morfológicas y parámetros físico-químicos *in situ* que rigen el área de estudio en base a un protocolo de monitoreo.

- Determinar el estado trófico del lago Cuicocha en base a los parámetros físico-químicos.
- Diseñar una guía batimétrica como una estrategia de conservación del lago Cuicocha.

1.5 Pregunta directriz de la investigación

- ¿Cuál es el estado trófico en el que se encuentra el lago Cuicocha?
- ¿La guía batimétrica puede ser una estrategia de conservación?

1.6 Hipótesis

Ho: Los parámetros físico-químicos presentan variabilidad en los diferentes puntos a nivel superficial del lago Cuicocha.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Marco teórico referencial

2.1.1 *Conservación de los ecosistemas lacustres*

Existen varias medidas de conservación para los ecosistemas o el entorno natural, uno de ellos es la protección de los hábitats donde se refugia gran variedad de seres vivos, que son afectados porque a menudo existe explotación de los diferentes recursos que ofrece la naturaleza (Portillo, 2020). Un importante factor que afecta con la degradación de estos ecosistemas a lo largo del tiempo es el desarrollo industrial, por ser un medio de transporte de desechos; según Zambrano (2003) menciona que cuando se realiza algún programa de restauración y conservación de un ecosistema lacustre se deben de tomar en cuenta algunos factores como: el régimen hídrico, concentración química del agua, estructura de la red trófica, la erosión de los sedimentos, entre otros.

Según el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) (2021) cuando un ecosistema lacustre no se encuentra en un buen estado es importante para su conservación tener en cuenta algunos usos tecnológicos que ayuden al mantenimiento: limpieza de la superficie del lago, humedales artificiales, aeración del agua, cosecha de la flora acuática, fitorremediación y biorremediación.

2.1.2 *Limnología en lagos*

Gutiérrez (2005) explica que la Limnología, está encargada de estudiar los cuerpos de agua dulce continentales, lagos, humedales, ríos, embalses y arroyos como sistemas, es multidisciplinar ya que implica muchas ciencias que están involucradas en el conocimiento de las aguas naturales (física, química, geología, ciencias biológicas y matemáticas) y al integrar varios conceptos y sucesos de diferentes perspectivas científicas, genera un cuerpo teórico rico y sustancial. Antes que esto fuera así, en 1936, se formó la Sociedad Limnológica Americana (LSA por sus siglas en inglés), donde los diferentes miembros del grupo provenían de disciplinas marinas y de agua dulce, y en 1948 la Sociedad Oceanográfica del Pacífico y LSA se fusionaron para formar la Sociedad Estadounidense de Limnología y Oceanografía (Ricardo, 2020).

La limnología integra procesos en aguas continentales con ecosistemas terrestres considerando los efectos del drenaje, la entrada de materia y energía de la cuenca. Asimismo, tiene en cuenta el intercambio que se produce entre el cuerpo de agua y la atmósfera (Gómez, 2023). Esta ciencia es responsable del análisis y clasificación de los tipos de lagos alrededor del eje oligotrófico-eutrófico, reconociendo los diferentes procesos y acciones que tiene el fósforo en base a la regularización dentro de los procesos de eutrofización, lo que posibilita el análisis y estudio de cerca sobre la organización y el desarrollo de los ecosistemas. Donde se podría considerar como factores o bases de la limnología la delimitación, el volumen y la configuración de aguas epicontinentales; el análisis del agua y determinación de sustancias que lleva en solución; las energías en el agua tanto radiante como mecánica; la ocupación de las aguas continentales y la proyección geográfica y la evolución en lo ecológico, además de la organización, teoría y modelos de los ecosistemas (Colmenar, 2002). Por otro lado, Ruíz et al.,(2012) mencionan que la limnología se basa en los organismos, su autoecología y las comunidades acuáticas, la ecología del fitoplancton, zooplancton, algas, bentos, invertebrados bentónicos, peces, además de vertebrados que se relacionan con estos ecosistemas lacustres, las bacterias y hongos.

2.1.3 Índice de Estado Trófico o Trophic state index (TSI)

Carlson (1977) como se citó en Moreno et al., (2010) propuso este índice, que es uno de los más utilizados. El TSI varía entre 0 y 100 es decir, de oligotrófico a hipertrófico. Se obtiene a través de la transparencia determinada con el disco secchi (DS), por ejemplo, un valor de TSI = 0 corresponde a una profundidad del DS de 64 m y cada incremento de 10 m en el TSI representa una reducción del 50 %. El mismo índice puede determinarse a partir de otros parámetros, como la concentración de clorofila (CHL a) y fósforo total (Pt), cuya relación con la transparencia se ha deducido previamente (Tabla 1).

Tabla 1.*Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua*

| Estado de eutrofia | TSI | D_s (m) | P_t (mg/m³) | CHL a (mg/m³) |
|--|------------|-----------------------------|--|---------------------------------|
| Oligotrófico (TSI < 30) | 0 | 64 | 0.75 | 0.04 |
| | 10 | 32 | 1.5 | 0.12 |
| | 20 | 16 | 3 | 0.34 |
| | 30 | 8 | 6 | 0.94 |
| Mesotrófico (30 < TSI < 60) | 40 | 4 | 12 | 2.6 |
| | 50 | 2 | 24 | 6.4 |
| | 60 | 1 | 48 | 20 |
| Eutrófico (60 < TSI < 90) | 70 | 0.5 | 96 | 56 |
| | 80 | 0.25 | 192 | 154 |
| | 90 | 0.12 | 384 | 427 |
| Hipertrófico (90 < TSI < 100) | 100 | 0.06 | 768 | 1183 |
| Relación de los parámetros de eutrofización | | $\frac{TSI_{DS}}{2}$ | $2 \times TSI_{PT}$ | $\sqrt{7,8 TSI_{Clofa}}$ |

Nota: Modificado de Carlson (1977)

2.1.4 Características físicas y químicas de los ecosistemas lacustres

Las principales características fisicoquímicas consideradas en el estudio de los lagos son las que hacen referencia a la naturaleza de movimientos que afectan a las aguas lacustres. Éstas son: la temperatura, pH, conductividad, la turbidez, oxígeno (disuelto y porcentual), concentración de nutrientes (fósforo y nitrógeno), sólidos totales y el color.

a) *Temperatura*

El agua tiene un calor específico alto, por lo que se necesita mucha energía para cambiar la temperatura del agua. La temperatura de las aguas naturales se ve afectada por el clima, las corrientes y la profundidad. Los sedimentos absorben el calor del ambiente, las temperaturas subirán y toda la vida acuática tendrá un rango ideal cuando se vayan, y las especies pueden desaparecer y ser reemplazadas por otras adaptadas a la nueva temperatura. La temperatura cambia la solubilidad de las sustancias, aumenta la solubilidad de los sólidos disueltos y disminuye la solubilidad de los gases. Los aumentos inusuales en la temperatura del agua (debido a causas no climáticas) a menudo resultan de las descargas de agua utilizada en los procesos industriales de intercambio de calor (Webber, 2009).

b) *Turbiedad*

Es una medida de la cantidad de partículas suspendidas en el agua, cuyo exceso puede afectar negativamente a los organismos acuáticos, como obstruir las branquias de los peces, asfixiar los huevos de los peces e incluso a los grandes invertebrados. La turbidez está asociada con la erosión y el exceso de nutrientes que contribuyen al crecimiento de algas, y la turbidez aumenta durante la temporada de lluvias (Franco, 2011)..

c) *Color*

La decoloración del agua suele ocurrir debido a la presencia de iones metálicos naturales hierro y magnesio coloidal en solución, desechos orgánicos descompuestos, taninos, ácidos húmicos y residuos industriales, que pueden causar diferentes decoloraciones en el agua. Las diferentes especies de plantas y el plancton del zoológico pueden aportar distintos colores al agua. El color visible del agua es el resultado de diferentes longitudes de onda no absorbidas por el agua o absorbidas por materia disuelta y particulada presente en el agua (tanto en solución como en suspensión) (Webber, 2009).

d) *Conductividad eléctrica*

Es una expresión numérica de la capacidad del agua para transportar una corriente eléctrica, expresada en micro-Siemens ($\mu\text{S}/\text{cm}$), la cual está relacionada con la presencia, concentración, movilidad y estado de valencia de los iones presentes. (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y HCO_3^-) y temperatura. Las soluciones de compuestos orgánicos que no se disocian conducen muy mal, mientras que las soluciones de compuestos inorgánicos conducen relativamente bien. Combret & Pérez (2017) mencionan que la conductividad eléctrica en el agua se relaciona con la salinidad y cuando la conductividad es elevada indica la existencia de una cantidad importante de iones en el medio, lo que está en correspondencia con el origen mineral del lago. El agua de lluvia tiene una conductividad muy baja, el agua subterránea contiene más minerales disueltos y el drenaje agrícola y los desechos municipales aumentan la conductividad del agua. El agua dulce natural normalmente tiene una conductividad entre 100 y 2 000 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$ y el agua destilada tiene una conductividad entre 0,5 y 3,0 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$ (Webber, 2009).

e) Sólidos totales

Están dados por la suma de los sólidos suspendidos y los sólidos decantados (Aznar, 2000). Cuando existen cantidades altas en los sólidos totales en suspensión afecta a la turbidez, disminuye el oxígeno disuelto (OD) y la temperatura suele a aumentar, perjudicando directamente a los organismos acuáticos por la absorción rápida de las partículas de calor y el agotamiento de oxígeno en el agua (Silva et al., 2015).

f) Alcalinidad

Es la capacidad del agua para neutralizar los ácidos de iones de hidrógeno. En aguas naturales, la alcalinidad depende de la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos (Carvajal, 2014).

g) Cloruros

El ion cloruro es muy importante en el agua, el cloruro varía mucho en el agua natural, en el agua de mar constituye el anión principal, en el agua superficial su concentración es menor que la del bicarbonato y el sulfato (Calderón, 2011).

h) Fosfatos

El fósforo existe en el agua en dos formas: junto con el nitrógeno, que son componentes característicos de los organismos vivos y se liberan a través de la descomposición celular, los residuos orgánicos son la principal fuente de fósforo y las formas inorgánicas provienen de los detergentes y se convierten en agua en ortofosfato, que Altas concentraciones de constituyentes pueden conducir a aumentos descontrolados en la biomasa acuática (eutrofización) (UP, 2010). El fósforo se adhiere a rocas y sedimentos, por lo que la erosión puede ser una fuente importante de fósforo en las aguas naturales (Webber, 2009).

i) Nitrógeno

El nitrógeno total consiste en nitrógeno orgánico, nitrato, nitrito y amonio. La mayor parte del nitrógeno orgánico proviene de material vegetal en concentraciones por debajo de 1 mg/L, y su presencia indica procesos biológicos activos en el agua a medida que se convierte en nitrato, que suele estar presente en concentraciones insignificantes en las aguas superficiales. Las altas concentraciones de amonio son tóxicas para la vida acuática. La oxidación aeróbica de amoníaco y/o compuestos nitrogenados conduce a

la formación de nitrito y posteriormente nitrato, por lo que un alto contenido de nitrato y al mismo tiempo bajo contenido de amonio indica que se trata de agua crónicamente contaminada (Aznar, 2000).

j) pH

El pH representa el equilibrio entre los ácidos y las bases del agua. En las aguas naturales, el pH está relacionado con la geología del terreno y la presencia de minerales como el calcio o el magnesio, que neutralizan las sustancias ácidas o alcalinas. Debido a los cambios en el dióxido de carbono, los procesos biológicos, la turbulencia y la aireación pueden afectar el pH, solo el agua destilada tiene un pH de 7, el agua natural tiene un rango de pH de 6,5 a 8,5, el agua extremadamente ácida o alcalina puede ser dañina para los peces y otros organismos acuáticos. vida venenosa. El pH afecta la toxicidad de otras sustancias como el mercurio disuelto. Un pH bajo (6) afecta la toxicidad de otras sustancias como el mercurio, por encima de (8,5) el amonio es más tóxico (Aznar, 2000).

k) Gases disueltos

Los gases más comunes son oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y metano. La solubilidad depende de la temperatura, la presión atmosférica y la salinidad; es probable que las aguas superficiales contengan cantidades casi saturadas, mientras que las aguas profundas contienen menos oxígeno (Salas, 2004).

l) Oxígeno disuelto

Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar biológicamente la materia orgánica, y este parámetro depende de la presión, salinidad, temperatura y altitud. (Salas, 2004). Todos los organismos necesitan oxígeno disuelto para sobrevivir, algunos en mayor proporción que otros, y la falta o aumento de oxígeno puede provocar cambios de especies en el agua. Cuando la temperatura aumenta, la capacidad del cuerpo de agua para obtener oxígeno disminuye y viceversa, la acción de las bacterias en descomposición reduce el oxígeno disuelto (OD) y la presencia de materia orgánica reduce el OD. Las algas producen oxígeno durante el día (fotosíntesis) y lo utilizan durante la respiración nocturna, con fluctuaciones en el oxígeno disuelto durante el día y la noche dependiendo de la temperatura y la presencia de algas. El rango de DO aceptable para la protección de la flora y la fauna es de 6-8 mg/ (Peña, 2007).

2.1.5 Estratificación de los lagos

Gómez (2005) menciona que las diferencias de densidad en las aguas de los lagos resultan del gradiente térmico, e influyen sobre la circulación vertical de las aguas a lo largo del año. La circulación general depende de la temperatura y, por consiguiente, va ligada al clima de la región. Los tipos fundamentales son los siguientes:

- **Lagos fríos monomícticos.** La temperatura de las aguas profundas y superficiales nunca superará los 4°C. La circulación vertical ocurre en verano cuando el agua superficial alcanza los 4°C, lo que hace que el agua se mezcle.
- **Lagos templados dimícticos.** En lagos templados suficientemente profundos se producen ciclos estacionales que alteran la estratificación de las aguas.

En verano, la temperatura del agua superior es más alta que la temperatura del agua inferior. La diferencia de temperatura entre las aguas superiores y las más profundas crea una región intermedia llamada termoclina, que separa las dos capas de agua bien diferenciadas:

- a. La capa por encima de la termoclina se denomina capa hidrotermal, con agua caliente y agua circulante.
- b. La capa profunda debajo de la termoclina se llama capa subacuática y contiene agua fría que no circula.

En otoño, la temperatura de la capa superior desciende hasta ser la misma que la de la capa inferior.

En invierno, la estratificación ocurre cuando el agua superficial se congela mientras que el agua subyacente permanece a 4°C.

En primavera, la temperatura del agua en la capa de hielo aumenta, el hielo se derrite, el agua se vuelve más densa y pesada y desciende hacia el fondo, lo que hace que el agua profunda suba.

Así, al arrastrar los nutrientes en suspensión, se establece una circulación general del cuerpo de agua y posteriormente se fertilizan las capas superiores.

- **Lagos templados y subtropicales monomícticos.** La temperatura del agua superficial de estos lagos nunca desciende por debajo de los 4°C y no se congela en invierno. La mezcla vertical de agua solo puede ocurrir en la estación fría.

Lagos tropicales oligomícticos. La temperatura del agua superficial oscila entre 20° - 30°C, manteniéndose casi constante durante todo el año.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

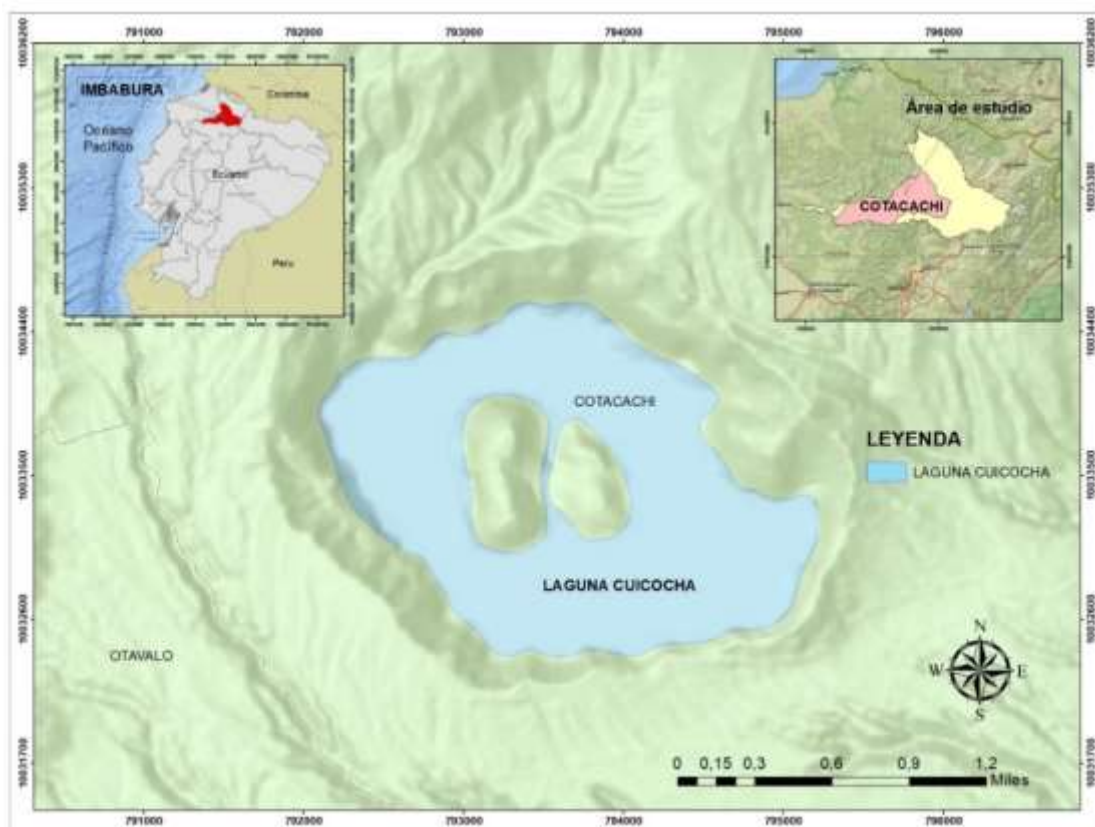
3.1 Descripción del área de estudio

El lago Cuicocha o también llamada “Lago de los Dioses”, forma parte del Parque Nacional Cotacachi-Cayapas que se encuentra dentro de las provincias de Imbabura y Esmeraldas, está ubicado 12 km al Suroeste de Cotacachi, con coordenadas de 0,368° N; 78,347° W y una altitud de 3 068 msnm (GAD - Municipal Santa Ana de Cotacachi, 2023).

Se trata de un lago que fue formado por un antiguo cráter al pie del Volcán Cotacachi dando nacimiento a una denominada caldera volcánica, donde el cuerpo de agua cuenta con 4 Km de largo por 3 km de ancho (Figura 1), destacando sobre él dos islotes que llevan los nombres de Teodoro Wolf y José María Yerovi (Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional, 2023).

Figura 1.

Mapa de ubicación del lago Cuicocha



3.2 Métodos

La selección metodológica se desarrolló en base al tema principal de la investigación, los objetivos a seguir y la pregunta directriz:

3.2.1 Método para determinar las condiciones climáticas, morfológicas y parámetros físico-químicos in situ que rigen el área de estudio, basados en el protocolo de muestreo

a) Condiciones climáticas

Se determinó las condiciones climáticas del área del estudio, en base a una recopilación de datos meteorológicos de la ciudad de Cotacachi y del Parque Nacional Cotacachi Cayapas de varios años, tomando en cuenta la estación meteorológica INGUINCHO que está más cerca al área de estudio con datos de precipitación (mm) y temperatura (°C). Se utilizó el diagrama ombrotérmico del clima de la ciudad de Cotacachi, síntesis de varios años de registros meteorológicos para observar los meses secos y lluviosos, para elaborar un climograma del periodo de estudio.

b) Condiciones morfológicas del lago Cuicocha

Se obtuvo las condiciones morfológicas del lago a través del estudio batimétrico. Para el estudio se necesitaron diferentes materiales y equipos como el bote Sea Eagle con todas sus partes, motor de dos tiempos, batería, computador portátil con su cargador, convertidor, antena de ecosonda, receptor de señal, Ecosonda Garmin GPS Map 526s y una estructura para dichos equipos. En el área de estudio se armó el bote para la colocación de los equipos y materiales, luego se hizo un recorrido horizontal y vertical con una distancia de 25 m entre cada línea de recorrido para generar el buffer de intersección; el horario adecuado fue de 6h00am a 10h00; el registro de los puntos se realizó en el software Dr. Depth en formato *csv*. La información se procesó en el programa de Sistemas de Información Geográfica ArcGIS 10.8, con Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) Zona 17 S. Datum Horizontal World Geodetic Survey 1984 (WGS84) y se generó un mapa batimétrico de la cubeta del lago Cuicocha con los cortes de amplitud y longitud máxima.

c) Parámetros físico-químicos in situ, basados en el protocolo de muestreo

Siguiendo el protocolo de muestreo del proyecto de investigación “Manejo Sostenible de los Lagos en el Norte de Ecuador bajo la Creciente de Actividades Económicas y el Cambio Climático” de la Universidad Técnica del Norte y VLIR-UOS Bélgica, en la primera salida se identificó los puntos de muestreo, para obtener los diferentes parámetros necesarios con ayuda de una ficha de campo.

La georreferenciación y elaboración del mapa de ubicación de puntos de muestreo se realizó en el programa de Sistemas de Interpretación Geográfica ArcGIS 10.8. Los puntos que se

muestrearon fueron los siguientes: punto 1 (más profundo) – con dirección al mirador Las Orquídeas, punto 2 – con dirección al mirador El Arrayán, punto 3 – con dirección al mirador Glorieta 1, punto 4 – en medio de los islotes, punto 5 – con dirección al mirador Ugshapungo, punto 6 – junto al islote Teodoro Wolf y punto 7 – cerca de la zona del muelle; Se elaboró un mapa base de muestreo, posteriormente se guardó las coordenadas de los puntos en el GPS Garmin del Laboratorio de Investigaciones Ambientales LABINAM.

Se midió los diferentes parámetros necesarios utilizando el Sensor Sumergible Multimétrico de marca Yellow Springs Instruments (YSI) dentro de los puntos del espejo de agua y a nivel de la zona fótica por la dificultad presentada en el anclaje.

- Oxígeno disuelto (%)
- Oxígeno disuelto (mg/l)
- pH
- Temperatura (°C)

Así mismo, se midió otros parámetros como la zona fótica con el disco secchi (m) de 50 cm de diámetro y la clorofila que se hizo a través de la extracción en el laboratorio con 500 ml de muestra filtrada.

Se tomó muestras dentro del espejo de agua, donde:

- Se calibró los equipos que se utilizaron.
- Se dirigió con el bote inflable a cada punto según el orden de numeración con ayuda del GPS.
- En cada punto se sumergió las botellas *Van Dorm* a una profundidad de 2 metros para recolectar las muestras en botellas ámbar.
- Se utilizó el Sensor Sumergible Multimétrico YSI a nivel de la zona fótica, donde se anotaron los datos de los parámetros en una hoja de campo.
- Se guardó las muestras en una hielera con la etiquetación adecuada junto con los refrigerantes.
- Con el disco secchi de diámetro 50 cm, se sumergió del lado sombreado del bote, se registró la profundidad cuando deja de ser visible y cuando vuelve a ser visible, el promedio de estos dos datos es el que se necesita en el estudio; se registró como aguas claras si son iguales o mayores a un metro cosa contrario aguas oscuras.

- Finalmente se guardó los equipos adecuadamente.

Se realizó un cálculo de la zona fótica y afótica del lago en diferentes puntos para determinar la profundidad con ayuda del disco secchi. El cálculo de las zonas biológicas del lago se llevó a cabo en base a la fórmula planteada según la ley de Beer's expuesta por Chin (2013) como se citó en Portilla-Caicedo (2015).

$$d_e = 2,6 * SD$$

Donde:

SD = profundidad promedio del disco secchi

3.2.2 Método para determinar el estado trófico del lago Cuicocha en base a los parámetros físico-químicos

a) Cálculo del TSI

Para el cálculo del Índice de Estado Trófico se usó el TSI de Carlson (1977), utilizando datos promedios de profundidad secchi (SD), clorofila a (CHL a) y fósforo total (TP), estos resultados fueron usados en fórmulas establecidas para cada parámetro Chin (2013), las fórmulas que se emplearon en el cálculo del TSI son:

Fórmulas individuales de TSI:

$$TSI_{SD} = 60 - 14,43 \ln (SD)$$

$$TSI_{CHL a} = 30,56 - 9,81 \ln (CHL a)$$

$$TSI_{TP} = 4,14 - 14,43 \ln (TP)$$

Donde:

SD= Disco secchi (m)

CHL a= Concentración de la clorofila a en ug/L

TP= Concentración de fósforo total en ug/L

Fórmula general del TSI:

$$TSI_T = (TSI_{SD} + TSI_{CHL a} + TSI_{TP})/3$$

Con el resultado final del TSI se realizó una comparación de los niveles tróficos, usando los rangos del TSI establecidos por Carlson, 1977.

b) *Clasificación general del estado trófico*

En el análisis y comparación de resultados se utilizó rangos de los valores de la Clasificación General de Estado Trófico de la OECD (1982), según O'Sullivan (2005) en donde se usó el promedio general del fósforo total (TP), el nitrógeno total (TN), la clorofila a (CHL a), también el promedio de la profundidad del disco secchi (SD), además se adicionó una fila con los rangos del TSI según Carlson, 1977. Por último, se elaboró algunos gráficos comparativos del estado trófico del lago con los datos que se obtuvieron.

3.2.3 *Método para diseñar una guía batimétrica como una estrategia de conservación del lago Cuicocha*

En este último método de la investigación se desarrolló las estrategias de monitoreo que integre la participación de actores locales con enfoque al estado trófico del lago. La guía tuvo como base el trabajo realizado en campo y laboratorio, con una descripción de materiales, equipos y suministros; el paso a paso desde el registro de puntos hasta el procesamiento de datos para la realización del mapa batimétrico del lago Cuicocha. El objetivo fue contar con un documento técnico que será entregado al Parque Nacional Cotacachi Cayapas, el cuál puedan utilizar en charlas de conservación y monitoreo participativo enfocado al estado trófico del lago, que promueva el involucramiento de las personas de las comunidades, gobiernos locales, guardaparques, entre otros.

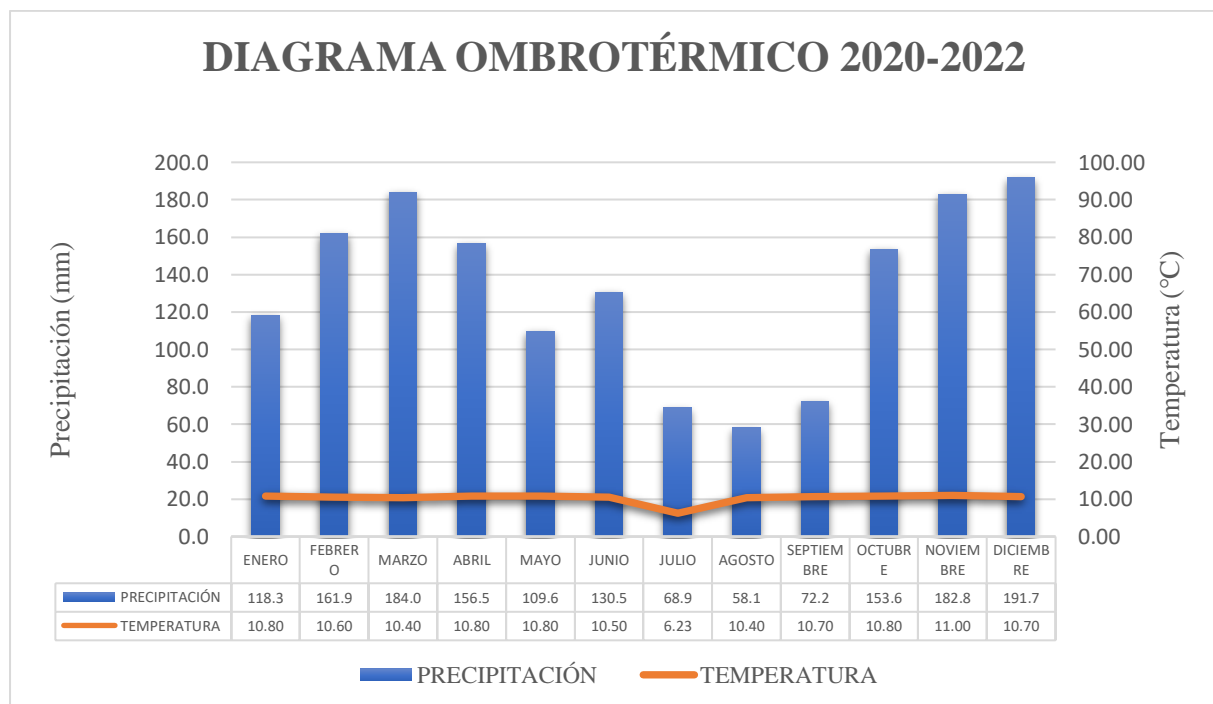
CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Analizar las condiciones climáticas, morfológicas y parámetros físico-químicos *in situ* que rigen el área de estudio en base a un protocolo de monitoreo.

El diagrama ombrotérmico del promedio entre el periodo del 2020 al 2022, muestra una temperatura promedio de 10,7 °C entre estos años, demostrando que el mes de noviembre tiene una de las temperaturas más altas con un promedio de 11 °C, mientras que los meses de marzo, julio y agosto presentan temperaturas bajas a comparación de los otros meses con un promedio de 10,4 °C. Por otra parte, se puede demostrar que tres meses son secos: julio, agosto y septiembre, con promedios de precipitación de 58,1 mm a 68,9 mm, mientras que los demás presentan meses lluviosos con promedios de precipitación de 109,6 mm a 191,7 mm. Donde el mes con menos precipitación fue agosto con 58,1 mm y el mes con mayor precipitación fue diciembre con 191,7 mm (Figura 2). Gómez et al. (2020) mencionan que Cuicocha se encuentra en un punto alto de los pisos climáticos del Ecuador, donde se dan climas fríos, los cuales oscilan entre los 13 °C en el día y los 2 °C en la noche, recalcando que en el invierno las temperaturas pueden bajar entre los 5 °C en el día y los -10 °C en la noche.

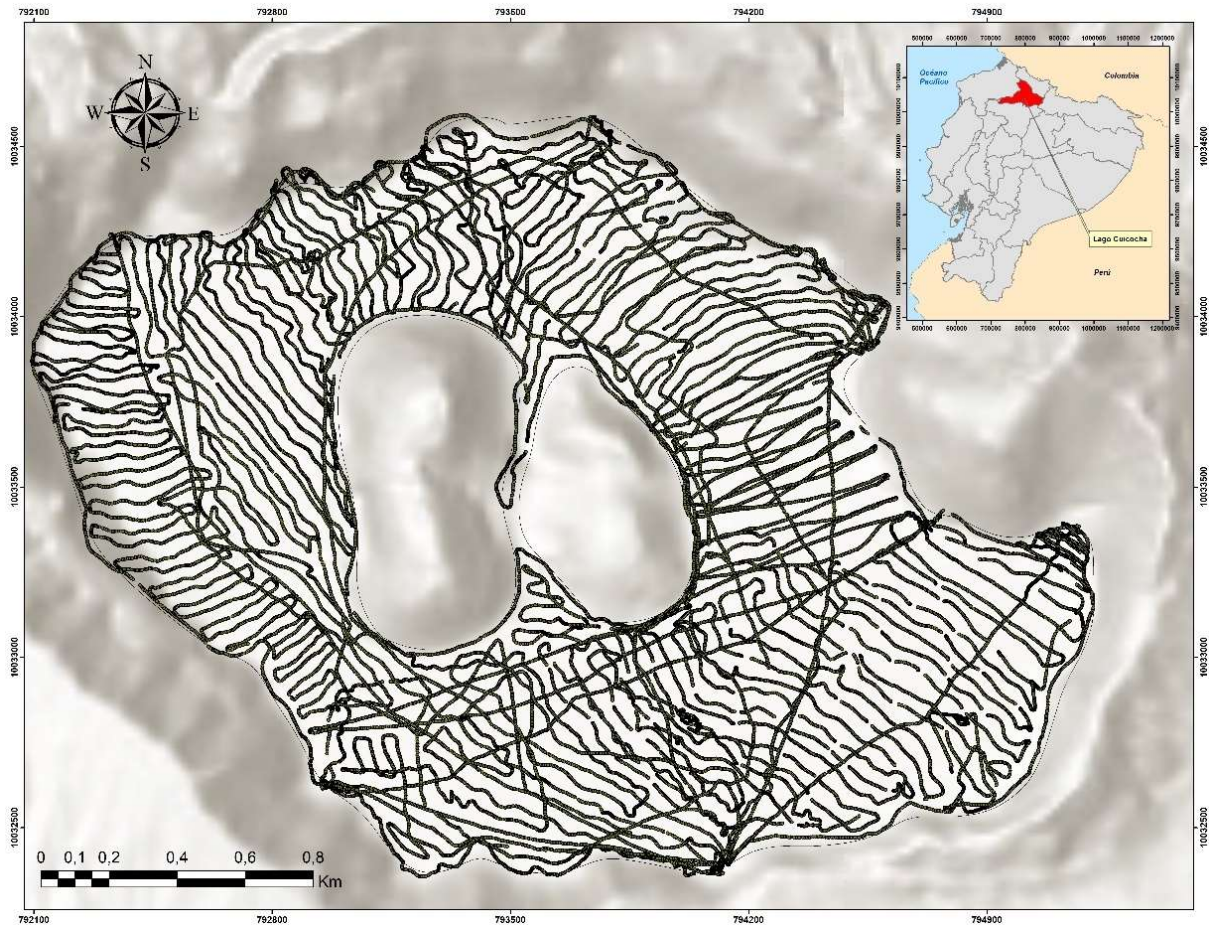
Figura 2.
Diagrama ombrotérmico de temperatura y precipitación del lago Cuicocha (2020 al 2022)



En el estudio batimétrico del lago Cuicocha el total de puntos registrados por la sonda de profundidad fueron 40 275 cubriendo la totalidad del lago (Figura 3).

Figura 3.

Mapa de los puntos registrados por la sonda de profundidad

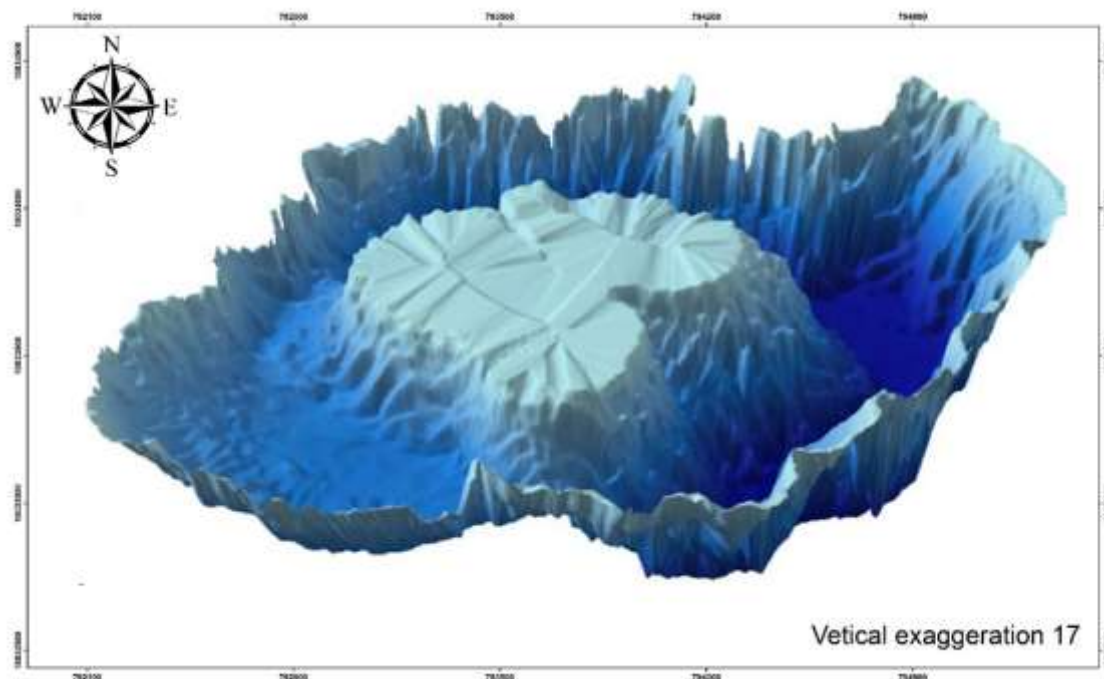


La morfología del lago Cuicocha se detalla por la diferencia de profundidades de cotas, establecidas a partir de 10 metros, los datos obtenidos en campo utilizando la sonda de profundidad señalaron que la profundidad máxima fue de 160 m en el periodo de estudio de octubre de 2023 a enero de 2024. El mapa muestra una escala de colores que representa las diferentes profundidades, donde el color azul oscuro representa las zonas de mayor profundidad, el color azul claro las zonas medianamente profundas y el color celeste representa las zonas menos profundas o someras del lago Cuicocha.

Para mejor observación de la cubeta lacustre se utilizó una herramienta de ArcGIS llamado ArcScene, aplicando una exageración vertical de 17, donde se muestra con mejor amplitud en 3D de cómo es la cubeta del lago Cuicocha con sus diferentes profundidades y así poder calcular los parámetros morfológicos con mayor precisión (Figura 4).

Figura 4.

Mapa batimétrico del lago Cuicocha con herramienta ArcScene (3D)



El lago cuenta con un volumen de 306 011 007,83 m³ (306,01 hm³), un área de 393,11 ha, un perímetro de 13,36 km, una profundidad máxima de 160,3 m, una altitud a nivel superficial de 3 068 msnm. Estas características determinan que es uno de los lagos más profundos de la región. Los datos de volumen, diámetro y profundidad difieren al estudio de Gunkel & Beulker (2009) debido a la precisión de la batimetría desarrollada en el presente estudio (Tabla 2).

Tabla 2.

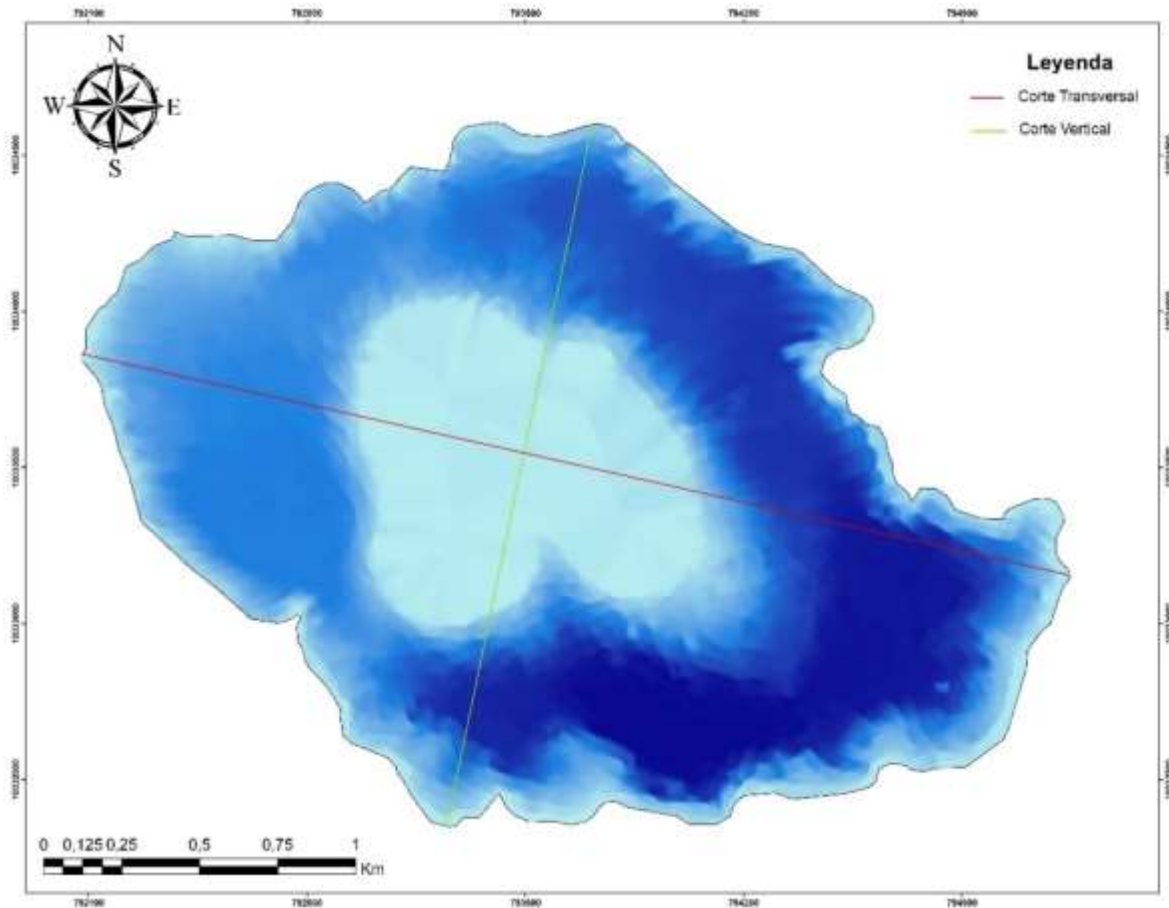
Tabla de registro de parámetros morfológicos

| Parámetros morfológicos | | | |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------------|--|
| | 2024 | Gunkel & Beulker (2009) | |
| Latitud (N) | 00°18'10.575" | 00°18'10.575" | |
| Longitud (W) | 78°21'47.398" | 78°21'47.398" | |
| Altitud | 3 068 msnm | 3 072 msnm | |
| Longitud máxima | 3,21 km | 3,23 km | |
| Amplitud máxima | 2,27 km | 2,23 km | |
| Profundidad máxima | 160,3 m | 148 m | |
| Profundidad media | 67 m | 72 m | |
| Volumen | 306,01 hm ³ | 208 hm ³ | |
| Área | 393,11 ha | 378 ha | |
| Perímetro | 13,36 km | | |

Las gráficas de cortes vertical y transversal de la cubeta lacustre del lago Cuicocha determinaron la tendencia de sedimentación de norte a sur y de este a oeste; así como sus profundidades a diferentes distancias tomando en cuenta los islotes presentes en el centro del lago (Figura 5).

Figura 5.

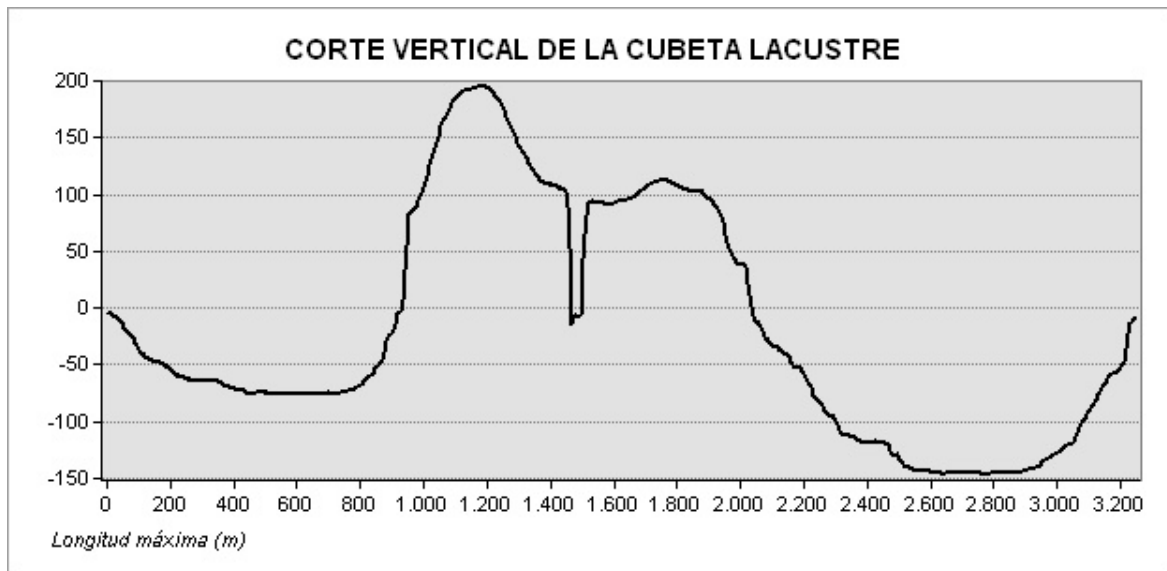
Corte vertical y transversal de la cubeta lacustre del lago Cuicocha



a) Corte vertical de la cubeta lacustre

El gráfico del corte vertical mostró que existe mayor sedimentación en la parte derecha que se encuentra en las partes más profundas del lago, mientras que en la parte izquierda muestra menor acumulación de sedimentos (Figura 6). También se puede observar las profundidades de cada lado y como sobresalen los islotes. A comparación de un lago de menor profundidad como es Yahuarcocha, Portilla-Caicedo (2015), menciona que la sedimentación presenta mayor énfasis en la entrada como lo es el canal Tahuando.

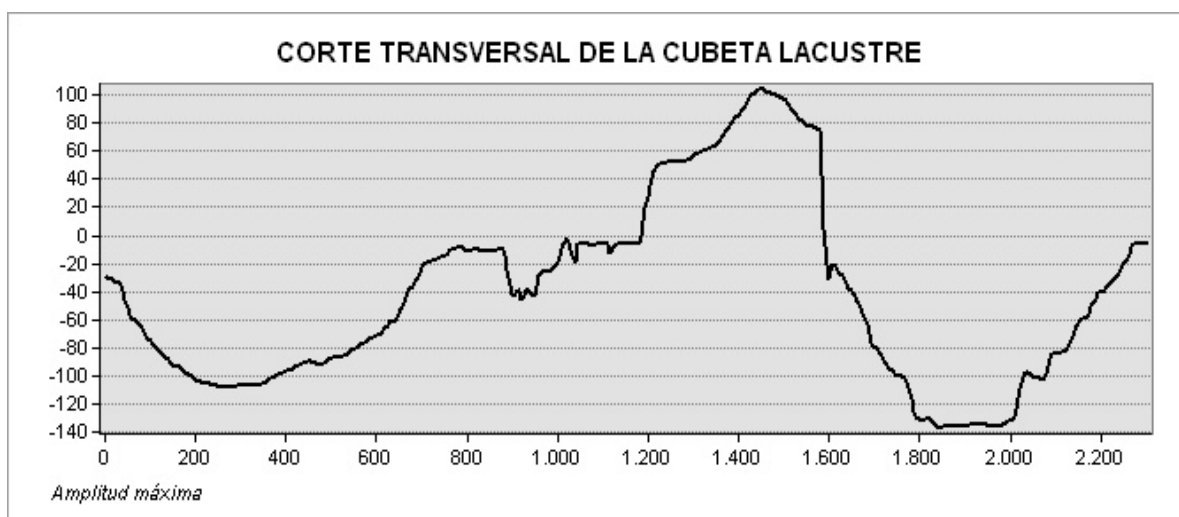
Figura 6.
Gráfica del corte vertical de la cubeta lacustre



b) Corte transversal de la cubeta lacustre

El gráfico del corte transversal mostró que en la parte derecha existe mayor sedimentación, mientras que en la parte izquierda se puede observar menor acumulación de sedimentos (Figura 7). Y mientras que en la profundidad se puede observar cómo varía en parte derecha e izquierda a medida que existe más distancia, a comparación de la laguna Puruhanta, donde (Coral, 2024) indica que su punto más profundo reflejada en su gráfica se encuentra en el centro de la laguna con una profundidad aproximada de 67 m.

Figura 7.
Gráfica del corte transversal de la cubeta lacustre



4.1.3 Parámetros físico-químicos *in situ* que rigen el área de estudio en base a un protocolo de monitoreo.

En el mapa se puede observar los diferentes puntos de muestreo, donde se realizó los parámetros físico químicos, detallando donde se encuentra el punto más profundo dentro del lago Cuicocha y una escala de colores de azul para las diferentes profundidades (Figura 8).

Se registró 7 puntos de muestreo en una tabla donde se detalla sus coordenadas mediante longitud, latitud, profundidad y referencia descriptiva; fueron seleccionados en base a los *in put*, *out put*, punto profundo y actividad volcánica en los islotes (Tabla 3).

Figura 8.
Mapa batimétrico del lago Cuicocha

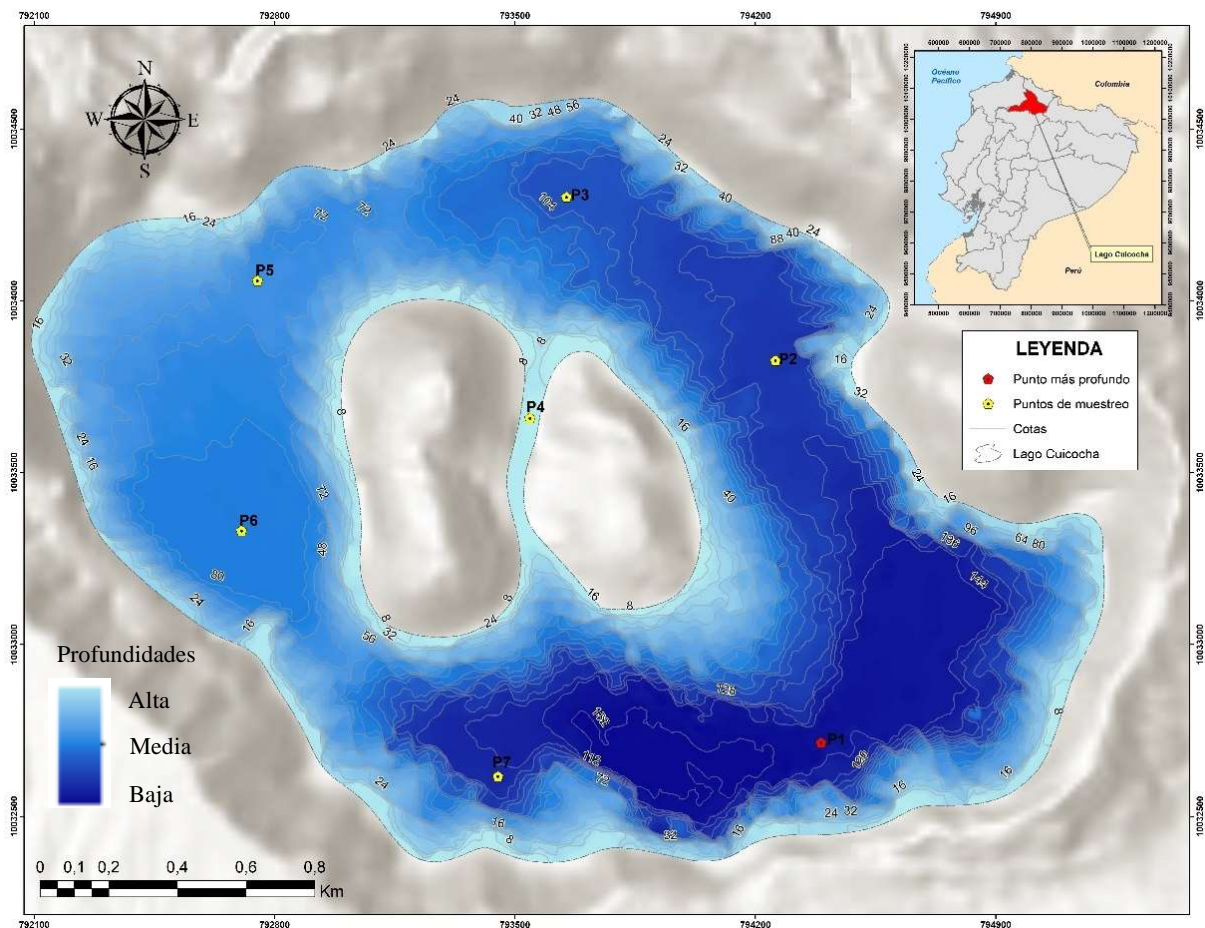


Tabla 3.*Tabla de datos en los diferentes puntos de muestreo*

| Puntos de muestreo | Latitud Y | Longitud X | Profundidad (m) | Referencia |
|---------------------------|------------------|-------------------|------------------------|------------------------------|
| P1 | 0,295667 | -78,355285 | 160,3 | Punto Profundo |
| P2 | 0,305595 | -78,356525 | 125,3 | Junto al Mirador El Arrayán |
| P3 | 0,309927 | -78,361379 | 106,3 | Junto al Mirador Glorieta 1 |
| P4 | 0,303083 | -78,363188 | 25,3 | Medio de los islotes |
| P5 | 0,307799 | -78,370169 | 67,3 | Junto al Mirador Ugshapungo |
| P6 | 0,301838 | -78,370538 | 81,3 | Junto al Islote Teodoro Wolf |
| P7 | 0,295884 | -78,365027 | 134,3 | Cerca de la zona del muelle |

Para el cálculo de los diferentes parámetros se comenzó en cada punto con un nivel superficial de 3 m que sería la primera y la profundidad máxima a la que se midió fue 10 m. Tomando en cuenta que el disco secchi tiene una diferente metodología para su medición. Se realizó una tabla con los promedios de los parámetros tomados en cada punto (Tabla 4).

Tabla 4.*Parámetros físicos y químicos de los diferentes puntos de muestreo*

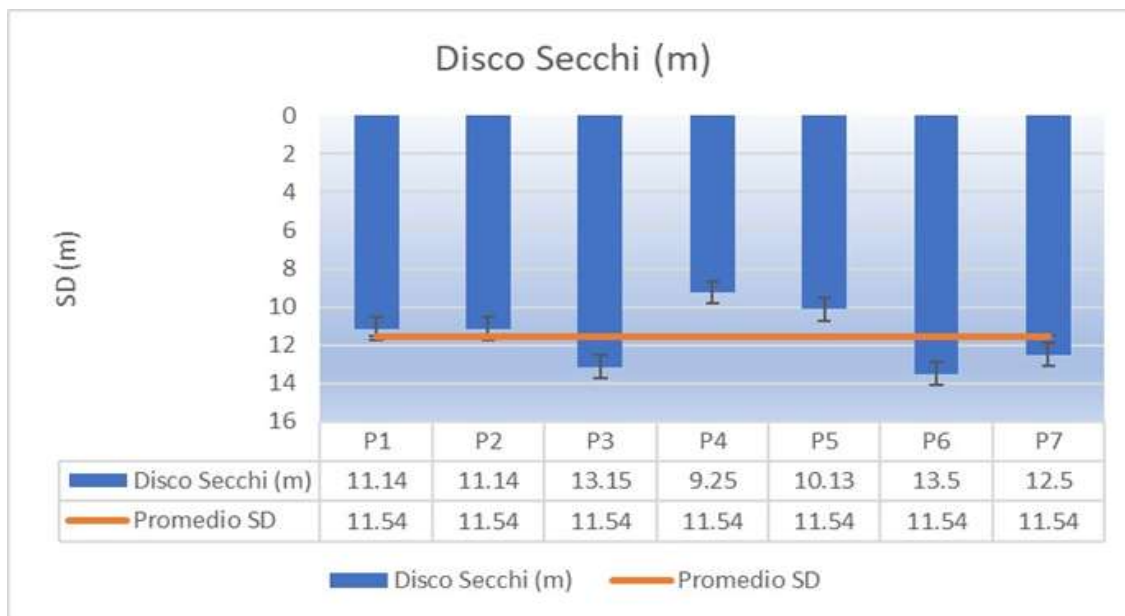
| Punto | D. secchi (m) | O.D (mg/L) | O.D (%) | Temperatura (°C) | Presión Barométrica (mmHg) |
|--------------|----------------------|-------------------|----------------|-------------------------|-----------------------------------|
| P1 | 11,1 | 8,9 | 86,1 | 17,1 | 708 |
| P2 | 11,1 | 7,8 | 79,1 | 17,1 | 708,2 |
| P3 | 13,1 | 6,9 | 79,6 | 17,1 | 708,2 |
| P4 | 9,2 | 6,6 | 77,3 | 17,1 | 707,9 |
| P5 | 10,1 | 6,6 | 76,2 | 17,1 | 707,5 |
| P6 | 13,5 | 7,6 | 79,4 | 17,1 | 707,2 |
| P7 | 12,5 | 7,5 | 77,8 | 17,1 | 707,1 |
| PROM | 11,5 | 7,4 | 79,3 | 17,1 | 707,7 |

a) Disco secchi (m)

Se presentó una variación en los diferentes puntos de muestreo en el punto 6 el disco secchi fue de 13,5 m indicando una mayor transparencia, mientras que en el punto 4 fue de 9,25 m de profundidad indicando una menor transparencia en el agua (Figura 9). El promedio general del disco secchi fue de 11,54 m; una característica de lagos oligotróficos (Carlson, 1977).

Figura 9.

Diagrama de comparación entre los valores y el promedio del D. secchi (m)

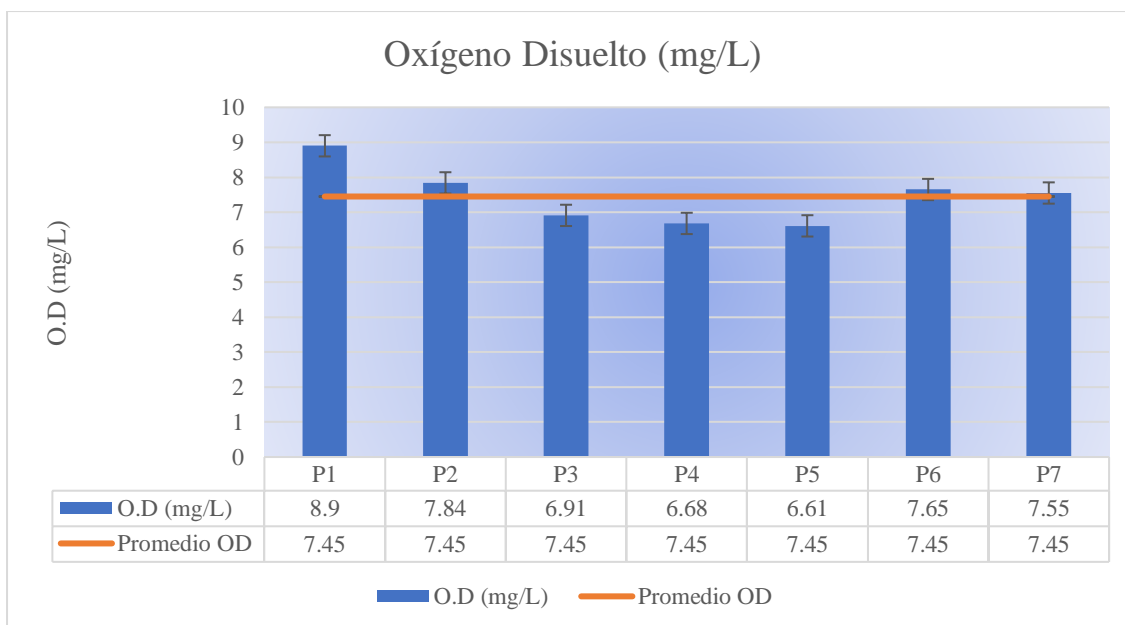


b) Oxígeno disuelto (mg/L)

En todos los puntos la concentración de oxígeno sobre pasa los 5 mg/L llegando hasta los 8,9 mg/L, dando como resultado niveles óptimos para el funcionamiento adecuado de algunos procesos ecológicos de un lago (Figura 10). Y el promedio general es de 7,45 mg/L indicando una buena oxigenación en el agua y se le considera saludable.

Figura 10.

Diagrama de comparación entre los valores y el promedio del Oxígeno. disuelto (mg/L)

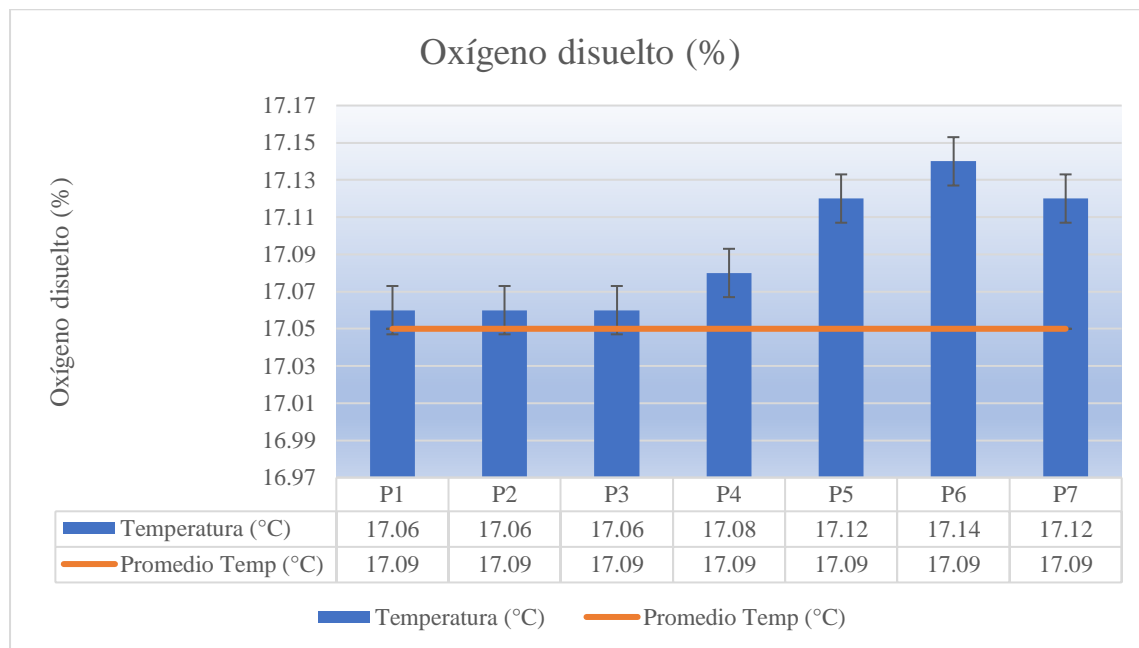


c) Oxígeno Disuelto (%)

El promedio general en el lago Cuicocha de saturación de oxígeno se encuentra en 79,4 % entrando a los niveles óptimos para permitir un funcionamiento adecuado de los procesos ecológicos en el lago, indicando que el agua tiene un nivel óptimo de oxigenación (Figura 11). Según Puente (2021) menciona que, el contenido de O.D. depende de varios factores como la concentración y estabilidad de la materia orgánica, presencia de plantas acuáticas, presión y también estación del año, pero guardando una estrecha relación con la temperatura, en este caso se considera que el O.D adecuado para este tipo de ecosistemas de agua dulce es de 92%.

Figura 11.

Diagrama de comparación entre los valores y el promedio del O. Disuelto (%)

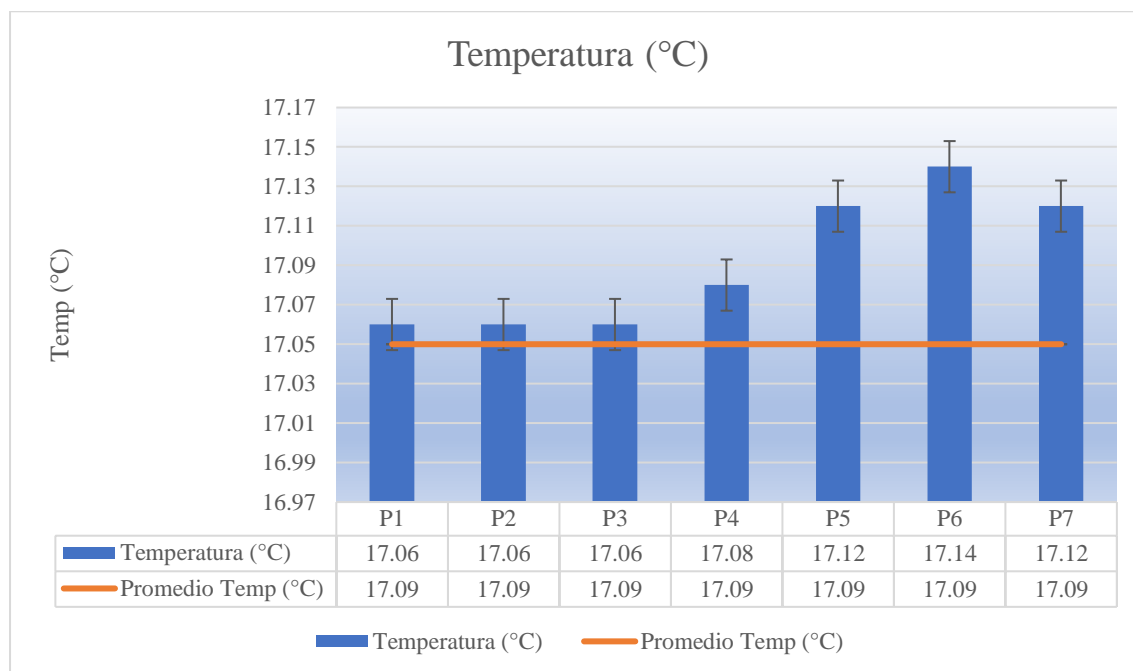


d) Temperatura (°C)

En este periodo de estudio se mostró que el lago Cuicocha se encuentra a una temperatura de 17,09 °C, teniendo en cuenta que Según INAMHI (2011) menciona que, la temperatura promedio del Lago es de 16°C (Figura 12). Existen algunas causas principales del aumento de temperatura en el Lago, la principal es por el cambio climático que se ha ido notando a través de los años y es un problema que afecta directamente a estos ecosistemas lacustres. La segunda causa se debe a que el cráter del Lago se encuentra activo y esto podría estar causando el aumento de la temperatura en las aguas internas de la cubeta lacustre.

Figura 12.

Diagrama de comparación entre los valores y el promedio de la Temperatura (°C)



f) Presión Barométrica (mmHg)

La presión barométrica no existió mucha variabilidad en los diferentes puntos tomados dando como un promedio general en el lago Cuicocha de 707,75 mmHg, sin embargo, Casallas & Gunkel (1999) mencionan que existen algunos factores que podrían causar su variación, como la altitud, los cambios de temperatura, la humedad atmosférica y los sistemas meteorológicos. Un ejemplo es cuando hay días calurosos y despejados, la presión barométrica tiende a subir, mientras que cuando hay días lluviosos y fríos, tiende a bajar.

g) Clorofila (CHL a)

Para la medición de clorofila se tomó en cuenta puntos importantes en el lago como el punto 1 que es el punto más profundo, el punto 4 que se encuentra en el medio de los islotes y el punto 7 que se encuentra cerca del muelle. Se recolectaron muestras y se midió la clorofila en el fluorímetro 4 veces por cada punto, esto sumado a un control con la medición de agua destilada, se utilizó la fórmula general de la clorofila para sacar el promedio total del lago Cuicocha obteniendo una concentración de 0,7 ug/L (Tabla 5). Se utilizó 10 ml de metanol y se filtró la clorofila con 500 ml de la muestra.

Tabla 5.*Promedios obtenidos con la fórmula general de la clorofila*

| Punto 1 | Punto 4 | Punto 7 | Control | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| 1,10 | 0,96 | 0,97 | 0,25 | |
| 1,09 | 0,96 | 0,97 | 0,25 | |
| 1,09 | 0,97 | 0,96 | 0,25 | |
| 1,09 | 0,96 | 0,96 | 0,25 | |
| 1,09 | 0,96 | 0,96 | 0,25 | Promedio |
| 0,84 | 0,71 | 0,71 | 0,75 | Total |

Promedio -c

4.2 Estado trófico del lago Cuicocha en base a los parámetros físico-químicos

Para el cálculo del índice de estado trófico (TSI) según Carlson (1977), fue necesario emplear el promedio general del disco secchi (m), la clorofila a (CHL a) y el fósforo total (PT), los resultados de los parámetros se relacionaron con el cuadro de la clasificación general del estado trófico según la OECD 1982 (Tabla 6). Finalmente se llegó a determinar en qué estado se encuentra el estado trófico del lago Cuicocha.

Tabla 6.*Promedios generales de los parámetros para evaluar el TSI*

| Parámetro | Valor |
|----------------------------|------------|
| Disco Secchi (SD) | 11,54 m |
| Fósforo total (PT) | 16,32 µg/L |
| Clorofila a (CHL a) | 0,76 µg/L |

$$TSI_{SD} = 60 - 14,43 \ln (11,54) = 24,71$$

$$TSI_{PT} = 4,14 + 14,43 \ln (16,32) = 44,43$$

$$TSI_{CHL a} = 30,56 + 9,81 \ln (0,76) = 27,87$$

$$TSI_T = (TSI_{SD} + TSI_{CHL a} + TSI_{PT})/3 = \mathbf{32,33}$$

En lo que corresponde al valor del índice de estado trófico del disco secchi (TSISD) el resultado fue de 24,71; el índice de estado trófico del fósforo total (TSIPT) fue de 44,43 y finalmente el valor del índice de estado trófico de la clorofila a (TSI_{CHL a}) fue de 27,87. El resultado total del índice de estado trófico (TSIT) del lago Cuicocha con la fórmula general es de 32,33.

4.2.1 Clasificación general del TSI

Basándose en el cuadro del valor general de la clasificación del estado trófico de la OSCD (1982), se ubicó los promedios de los parámetros usados en dicha clasificación, de igual forma se aumentó una columna con los rangos de TSI de Carlson 1977 (Tabla 7).

Tabla 7.

Clasificación general del Estado Trófico de la OECD (1982) y TSI Carlson (1977)

| | | Oligotrófico | Mesotrófico | Eutrófico | Hipertrófico | Cuicocha |
|--|----------------|--------------|-------------|-----------|--------------|------------|
| Concentración de fósforo total (µg/L) | Promedio | 8 | 26,7 | 84,4 | - | 16,32 µg/L |
| | Rango | 3 – 17,7 | 10,9 – 95,6 | 16 - 386 | 750 – 1 200 | |
| Concentración de clorofila a (µg/L) | Promedio | 1,7 | 4,7 | 14,3 | - | 0,76 µg/L |
| | Rango | 0,3 – 4,5 | 3,0 - 11 | 3,0 - 78 | 100 - 150 | |
| Disco secchi (m) | Promedio | 9,9 | 4,2 | 2,45 | - | 11,54 m |
| | Rango | 5,4 – 28,3 | 1,5 – 8,1 | 0,8 – 7,0 | 0,4 – 0,5 | |
| Índice de Estado Trófico | Carlson (1977) | <40 | 35 - 45 | >45 | | 32,33 |

Nota: Modificado de Carlson (1977) y de la OECD (1982)

El resultado de la concentración de fósforo total fue de 16,32 µg/L mostrando que el Lago se encuentra en un estado oligotrófico, la concentración de clorofila de 0,76 µg/L demostró que está en un estado oligotrófico y el disco secchi con 11,54 m mostró también un estado oligotrófico del lago Cuicocha mientras que en un estudio de la Universidad Católica del Ecuador, mostró un promedio del disco secchi de 7,23 m, y un índice de estado trófico de Carlson de 16,4 indicando una buena transparencia en el agua, lo que generalmente se asocia con una mejor calidad de agua y un menor contenido de material en suspensión (Puente, 2021). El resultado de TSI final según Carlson (1977) fue 32,33 el mismo que representa nivel oligotrófico que tiene un valor de <40, clasificando a Cuicocha como un Lago oligotrófico

tomando en cuenta que con los años podría cambiar a mesotrófico si existen variaciones en los diferentes parámetros físicos y químicos del agua por las diferentes actividades antrópicas, a comparación de la laguna Huarmicocha en un estudio realizado por la Universidad Central del Ecuador, indica un promedio del índice de estado trófico de 25,86 teniendo un estado de eutrofización oligotrófico, ya que no presenta actividades antrópicas que podrían afectar su condición natural por ser una laguna pantanosa (Oña & Tonato, 2017)

4.3 Diseñar una guía batimétrica como una estrategia de conservación del lago Cuicocha.

Dentro de la guía batimétrica se pueden detallar los pasos para realizar un estudio batimétrico, en campo y los pasos para el procesamiento de datos para obtener el mapa batimétrico del Lago.



4.3.1 Pasos a seguir para la batimetría en campo.

- a) Revisión y preparación de materiales y equipos

Los materiales y equipos se deben revisar en el laboratorio antes de la salida de campo con ayuda de una lista de materiales, los equipos se deben calibrar antes de salir para el buen funcionamiento en campo, a continuación, se detallan los diferentes materiales (Tabla 8).

Tabla 8.

Materiales y equipos de laboratorio

| | |
|---|--|
| <p>1. Bote Sea Eagle con todas sus piezas y estructuras necesarias, además se debe tomar en cuenta que esté libre de daños para su buen funcionamiento</p> | <p>2. Remos, necesarias para el manejo del bote en caso de estar apagado el motor</p> |
|  |  |
| <p>3. Inflador para el bote</p> | <p>4. Caneca y manguera para pasar el combustible</p> |



5. Motor de dos tiempos



6. Batería de 12 voltios



7. Computadora portátil y cargador



8. Convertidor con sus respectivos fusibles



9. Antena de ecosonda Garmin



10. Receptor de señal o GPS para la toma de puntos



11. Ecosonda Garmin GPS Map 526s



12. Nivel



13. Amarras plásticas



14. Palos de escoba para estructura



15. Sonar de mano

16. Herramientas



b) Preparación de materiales y equipos en campo, y reconocimiento del área de estudio
Colocar el bote en algún lugar donde se pueda armarlo



Colocar en el bote las estructuras del bote



Inflar el bote por todos sus lados



Colocar el motor y el tanque de gasolina conectado con la manguera



Armar la estructura para los equipos usando el nivel y conectar los diferentes equipos para la batimetría



Encender todos los equipos para poder revisar que estén funcionando correctamente



Primer recorrido en bote para el reconocimiento del área y observar el buen funcionamiento de los equipos y del software Dr Depth con el fin de ver si los datos se toman y se guardan correctamente

c) Uso del software Dr Depth para el registro de puntos

Figura 13.

Conexión del programa con el sistema de posición global

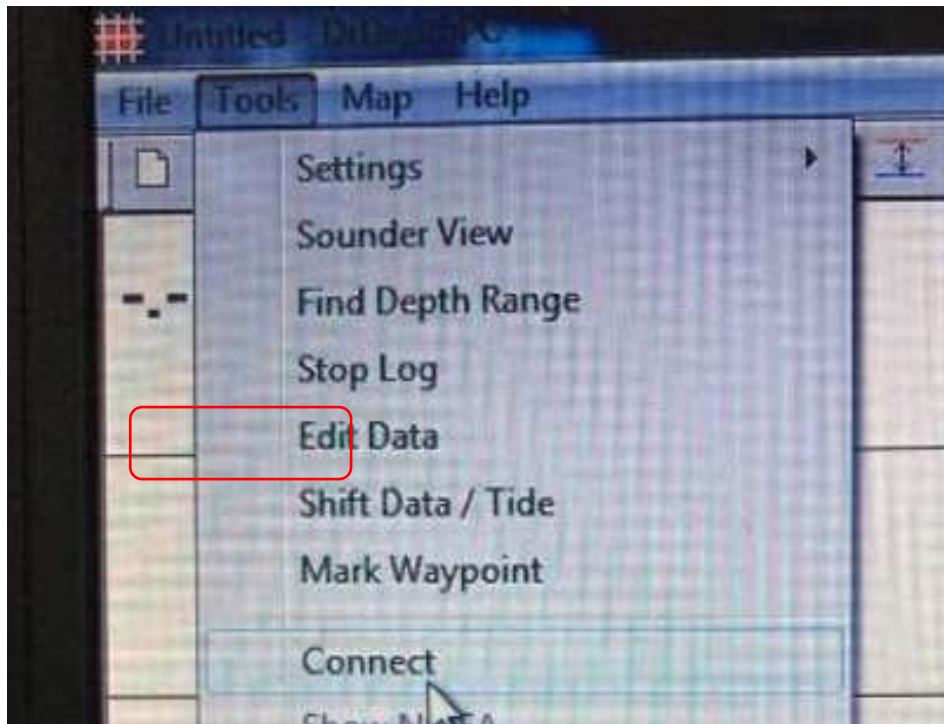


Figura 14.

Configuración del rango de dimensión y tamaño del mapa

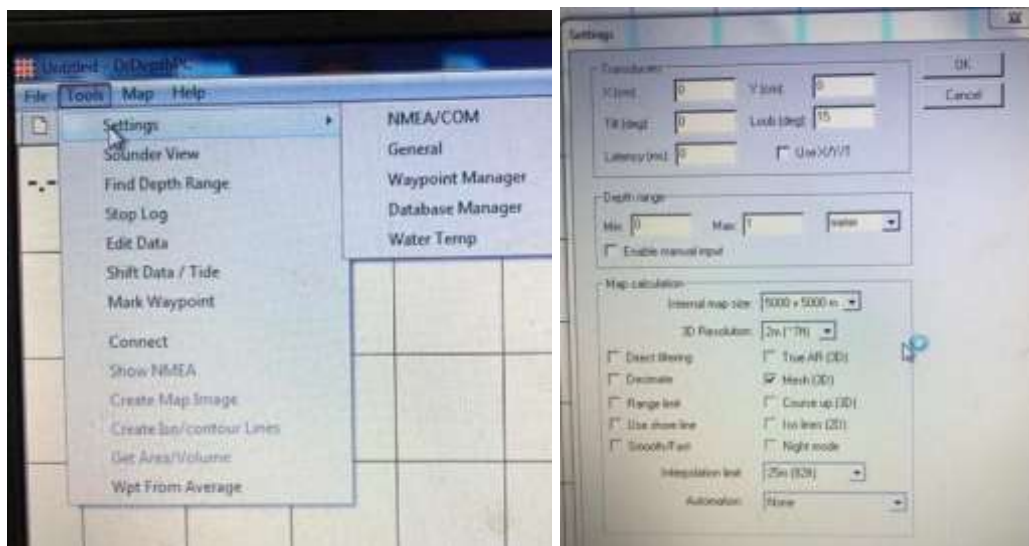
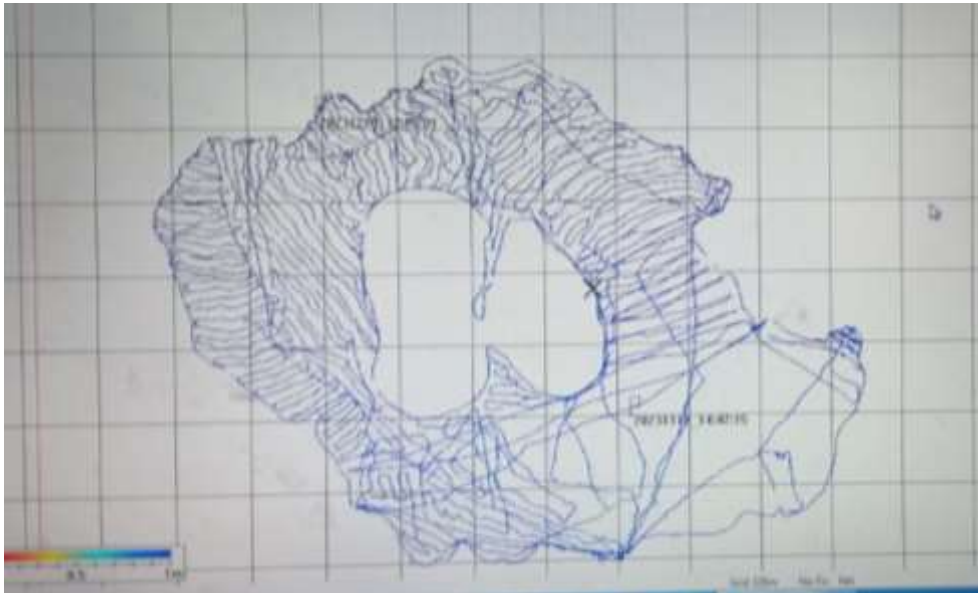


Figura 15.

Recorrido y registro de puntos de la cubeta lacustre



Para este tipo de estudio se recomienda que el recorrido con el bote para el registro de puntos se lo haga de manera en zigzag tratando de cubrir la mayor zona posible para obtener un mapa batimétrico válido.

4.3.2 Pasos del procesamiento de datos para obtener el mapa batimétrico

Verificar que los datos de latitud, altitud y profundidad estén correctamente registrados para el buen funcionamiento en el software ArcMap.

Figura 16.

Verificación de datos de latitud, altitud y profundidad

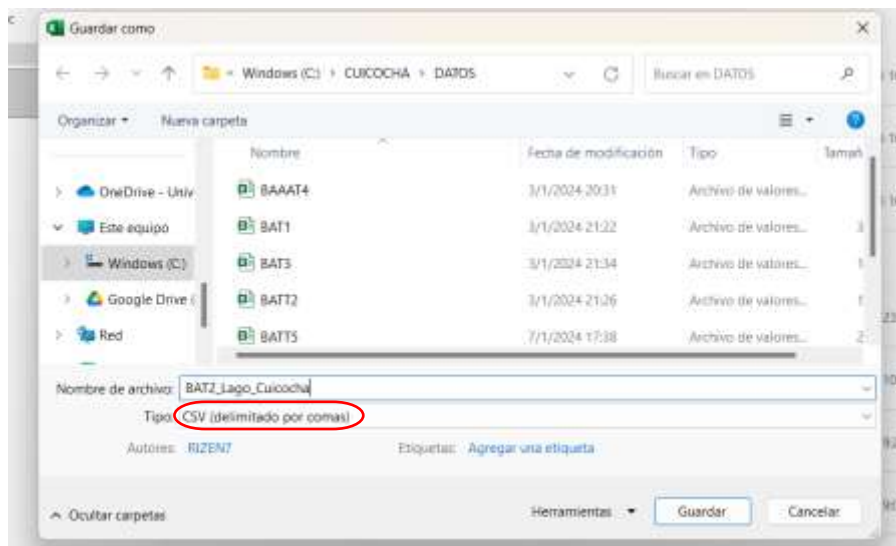
| | A | B | C | D | E |
|----|-------------|-----------------|--------------|---|---|
| 1 | LATITUD (Y) | PROFUNDIDAD (Z) | LONGITUD (X) | | |
| 2 | 0.306463 | -69.03 | -78.372378 | | |
| 3 | 0.306509 | -69.03 | -78.372367 | | |
| 4 | 0.306553 | -67.82 | -78.372354 | | |
| 5 | 0.306581 | -69.72 | -78.372353 | | |
| 6 | 0.306625 | -66.96 | -78.372354 | | |
| 7 | 0.306658 | -66.45 | -78.372357 | | |
| 8 | 0.306689 | -66.1 | -78.372362 | | |
| 9 | 0.306716 | -65.93 | -78.372369 | | |
| 10 | 0.306744 | -65.93 | -78.372382 | | |
| 11 | 0.306773 | -65.93 | -78.372394 | | |
| 12 | 0.306802 | -65.93 | -78.372408 | | |
| 13 | 0.30683 | -65.59 | -78.372426 | | |
| 14 | 0.305852 | -64.21 | -78.372444 | | |
| 15 | 0.306872 | -63.87 | -78.372466 | | |
| 16 | 0.306887 | -63.52 | -78.372488 | | |
| 17 | 0.306902 | -63.52 | -78.372511 | | |
| 18 | 0.306921 | -63.35 | -78.372534 | | |
| 19 | 0.306942 | -63.35 | -78.372555 | | |
| 20 | 0.306965 | -63.35 | -78.372573 | | |
| 21 | 0.30699 | -62.83 | -78.372587 | | |
| 22 | 0.307019 | -62.49 | -78.372601 | | |
| 23 | 0.307051 | -62.14 | -78.372609 | | |
| 24 | 0.307101 | -61.18 | -78.372618 | | |

Hay que tomar en cuenta que para la profundidad debe tener un valor negativo por lo que se multiplica todo por -1, mientras que la longitud debe tener un valor decimal por lo que los valores se dividen para un millón

Una vez que se registró los puntos se procede a transformarlos en formato .csv delimitado por comas, de lo contrario no podría funcionar en ArcMap.

Figura 17.

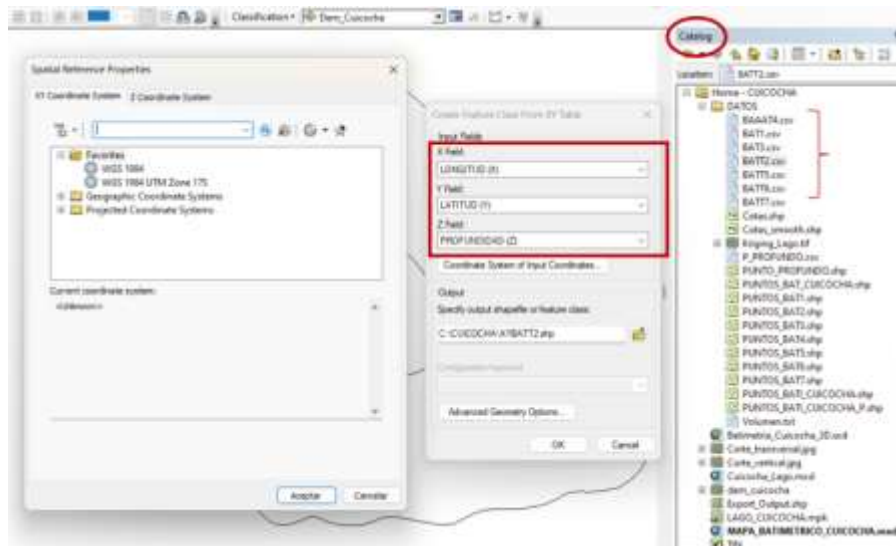
Archivos en formato csv delimitado por comas



Se abre el software ArcGIS donde se subirán los datos desde el *Catalog*, luego de esto se procese a abrir la herramienta de *Create Feature Class* donde se colocará la Longitud (X), la Latitud (Y) y la Profundidad (Z) y por último se coloca el sistema de coordenadas correcto que es WGS 1984.

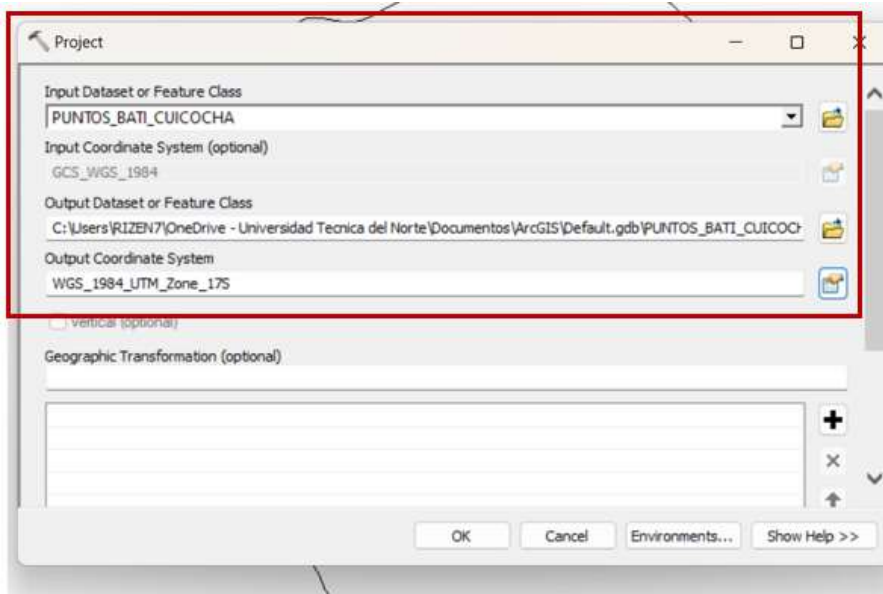
Figura 18.

Datos subidos al software



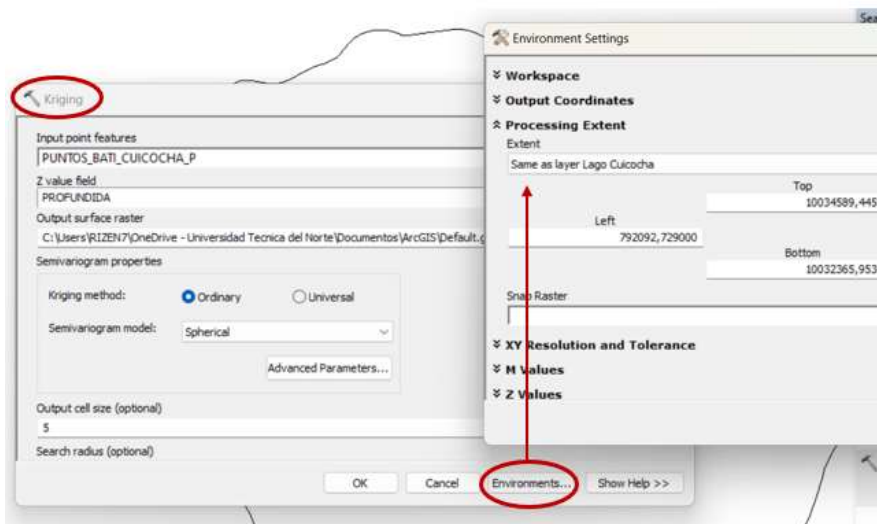
Se usa la herramienta de *Project* para la proyección del shape anterior a la zona de Ecuador que es WGS 1984 UTM Zone 17S.

Figura 19.
Proyección de coordenadas



Se utiliza la herramienta de *Kriging* para la interpolación espacial de un raster, es decir interpola valores desconocidos en ubicaciones específicas dentro de un área geográfica utilizando datos conocidos de ubicaciones circundantes.

Figura 20.
Interpolación de datos con Kriging



Se realiza un corte a la interpolación con la herramienta Extract by Mask.

Figura 21.

Corte de raster con perfil de la cubeta

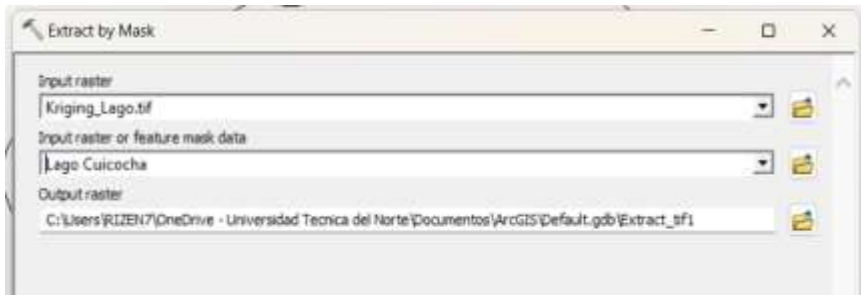
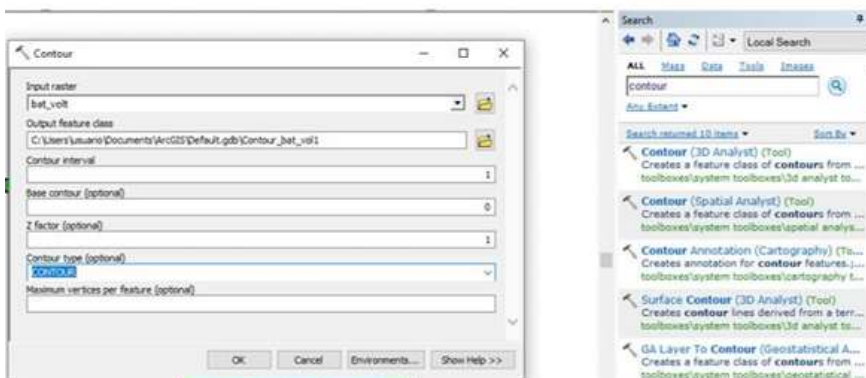


Figura 22.

Realización de curvas de nivel



Se modifica la escala de colores a la que nosotros queramos.

Figura 23.

Escala de colores del mapa

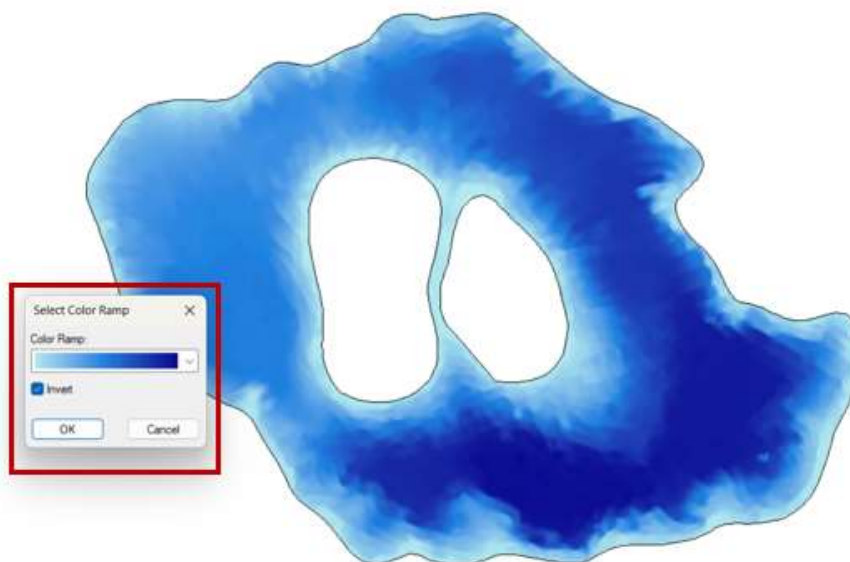
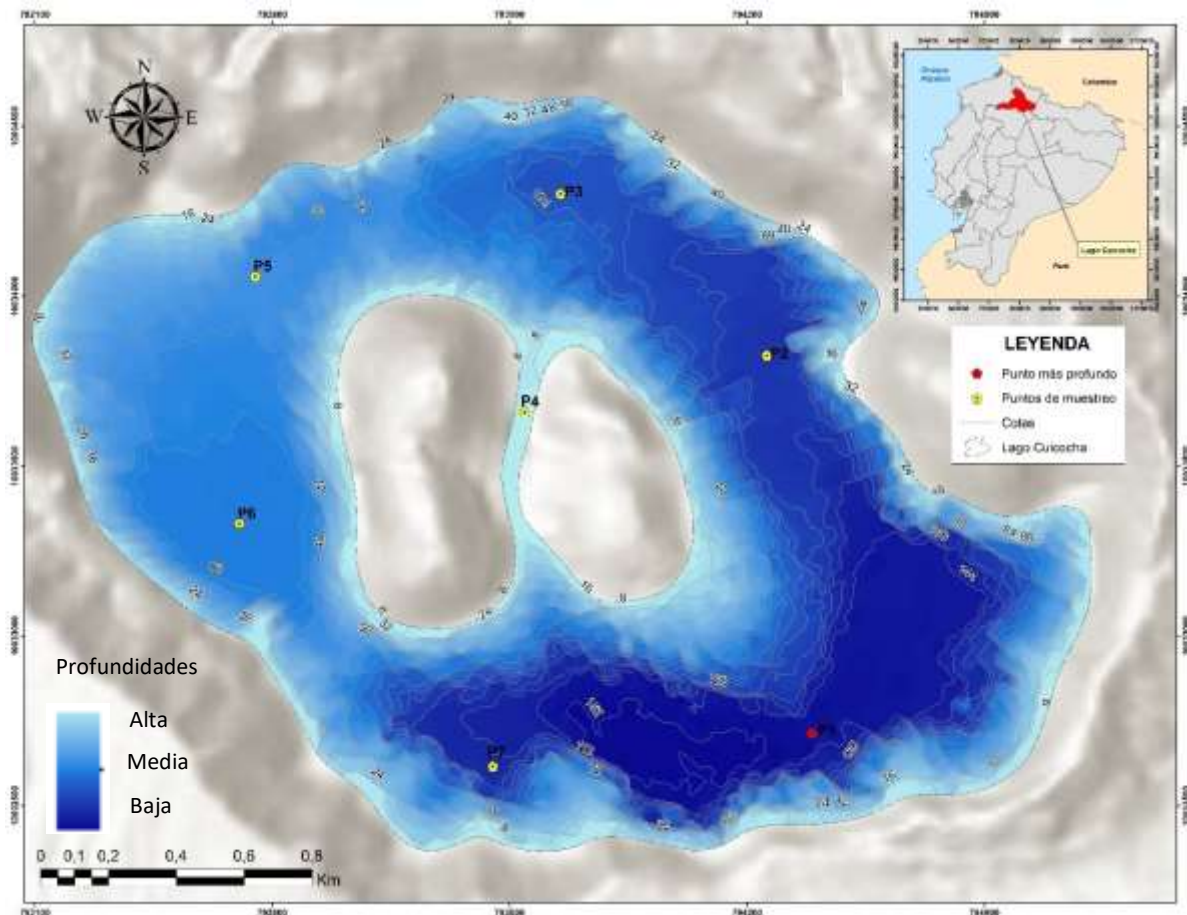


Figura 24.
Mapa final de batimetría del lago Cuicocha



Para una mejor visualización de las profundidades de la cubeta lacustre usamos la herramienta de ArcScene con el fin de crear un mapa con visualización en 3D, colocamos la exageración vertical según la profundidad que hemos obtenido en los datos registrados en este caso fue de 17.

Figura 25.
Uso de herramienta ArcScene

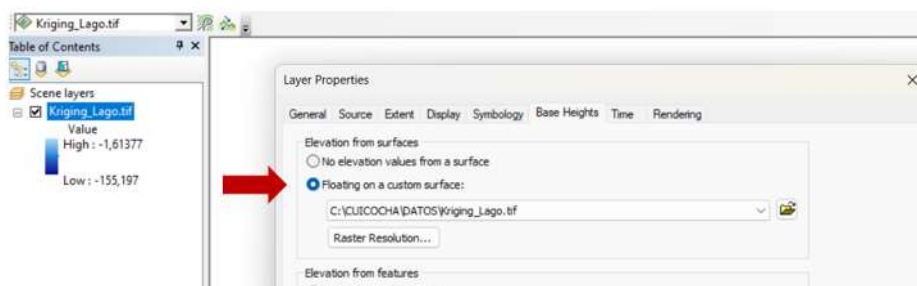
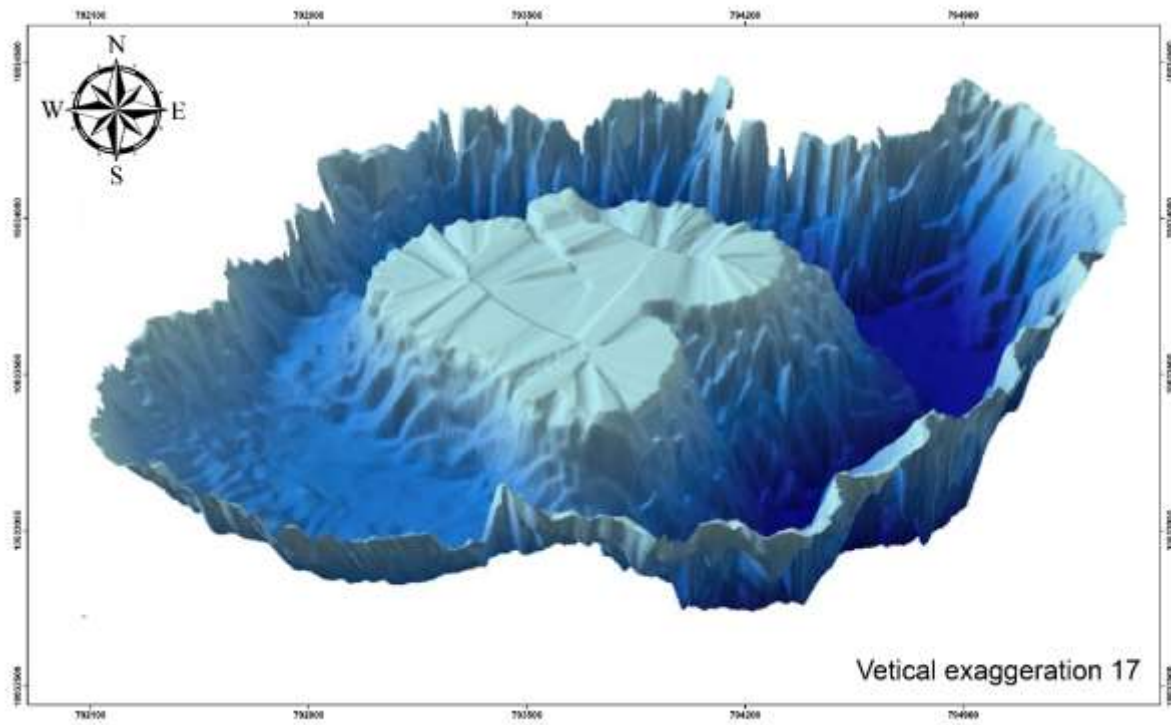


Figura 26.
Mapa de la cubeta del lago Cuicocha en 3D



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Las condiciones morfológicas determinaron que el lago Cuicocha es un lago profundo de origen volcánico que presenta un diagrama ombrotémico bimodal con 2 épocas lluviosas y una época seca.
- Los parámetros físico-químicos no presentan variación a nivel espacial en la zona fótica de 11,54 m.
- El cálculo del índice de estado trófico dio como resultado que el lago Cuicocha se encuentra en un nivel oligotrófico, con un contenido de fósforo alto en la caracterización de este periodo de estudio.
- El diseño de una guía batimétrica es un apoyo no solo para el área protegida, sino para próximas investigaciones, proyectos, navegación o incluso como divulgaciones científicas y académicas en el área de limnología.

5.2 Recomendaciones

- Al ser un lago de origen volcánico activo se recomienda para próximos estudios limnológicos realizar un estudio multitemporal para ver los cambios o variaciones que ocurren en diferentes épocas o en diferentes meses del año.
- Establecer anclas fijas en los puntos establecidos dentro de esta investigación para analizar los parámetros a diferentes profundidades.
- Aplicar la guía batimétrica presente en el documento para estudios posteriores o académicas, o capacitar al personal técnico del Parque Nacional Cotacachi Cayapas en tema de batimetría, con el objetivo de preparación y obtener conocimiento en caso de realizarse un estudio o proyecto en campo en el lago Cuicocha.

Referencias Bibliográficas

- Alarcón, D. (2019). *Microbiota bacteriana de la laguna de Cuicocha y sus aplicaciones biotecnológicas*. <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/596ff65d-8527-4d1f-8169-5235c90c5cd9/content>
- Anta, A. (2019). *CONTAMINACIÓN de LAGOS y RÍOS_ Causas, Consecuencias y Cómo evitarla*. <https://www.ecologiaverde.com/contaminacion-de-lagos-y-rios-causas-consecuencias-y-como-evitarla-1936.html>
- Caballero, M., & Vázquez, G. (2019). Lagos como sensores de cambio climático: el caso de La Alberca de Tacámbaro, Michoacán, México. *TIP. Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 22. <https://doi.org/10.22201/FESZ.23958723E.2019.0.193>
- Carlson, E. (1977). CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE YAMBO MEDIANTE ANÁLISIS DE FÓSFORO. *InfoANALÍTICA*, 8(1), 99–111. <https://doi.org/10.26807/ia.v8i1.119>
- Casallas, J. E., & Gunkel, G. (1999). *Algunos aspectos limnológicos de un lago altoandino: el lago San Pablo, Ecuador*.
- Colmenar, E. (2002). *La Limnología estudia los fenómenos físicos y biológicos relativos a las aguas continentales*.
- Combret, S., & Pérez, N. (2017). *Algunos parámetros químico-físicos de las aguas del Lago Azul del poblado El Cobre*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212017000300010#:~:text=La%20conductividad%20el%C3%A9ctrica%20en%20agua,el%20origen%20mineral%20del%20lago.
- Coral, M. (2024). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA BATIMETRÍA Y MORFOMETRÍA DE LOS LAGOS PURUHANTA, EL VOLADERO Y EL SALADO DE LAS PROVINCIAS DE IMBABURA Y CARCHI*.
- Crisóstomo - Quillas, B.-B. (2017). *Limnología - MHN*. <https://museohn.unmsm.edu.pe/limnologia.html>
- Durán, V. (2019). *Los lagos y el cambio climático: un aporte a la COP25-Fundación Aequae* <https://www.fundacionaquae.org/los-lagos-y-el-cambio-climatico-un-aporte-a-la-cop25/> 2/4. <https://www.fundacionaquae.org/los-lagos-y-el-cambio-climatico-un-aporte-a-la-cop25/>
- GAD Municipal Santa Ana de Cotacachi. (2023). *Laguna de Cuicocha – GAD Municipal Santa Ana de Cotacachi*. <https://cotacachi.gob.ec/destino/laguna-de-cuicocha/>
- García-Miranda, F. G., & Miranda-Rosales, V. (2017). *EUTROFIZACIÓN, UNA AMENAZA PARA EL RECURSO HÍDRICO*. http://ru.iiec.unam.mx/4269/1/2-Vol2_Parte1_Eje3_Cap5-177-Garc%C3%ADa-Miranda.pdf
- Gómez, E., Arteños, R., & Zavala, M. (2020). *Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas En Su Diversidad Climática*.
- Gomez, V. (2023). *Limnología_ qué es, historia, qué estudia, ramas*.
- González, M., Vásquez, P., Alarcón, D., Araque, J., Viteri, F., Villacis, L., Pinto, G., Escobar, S., Medina, G., & Andueza, F. (2021). Calidad fisicoquímica de los lagos Colta y Cuicocha ubicados

- en la alta montaña del Ecuador. Physicochemical quality of lakes Colta and Cuicocha located in the high mountains of Ecuador. / *Rev Fac Farm*, 63(2), 27–33.
- Gunkel, G., & Beulker, C. (2009). Limnology of the crater lake cuicocha, ecuador, a cold water tropical lake. *International Review of Hydrobiology*, 94(1), 103–125. <https://doi.org/10.1002/iroh.200811071>
- Gutiérrez, R. (2005). *La Limnología, una ciencia de síntesis: Conceptos y Breve historia de la*. <http://aslo.org/>,
- Instituto Geofísico, E. P. N. (2023). *COTACACHI-CUICOCHA*. <https://www.igepn.edu.ec/cuicocha>
- López, M., & Madroñero, S. (2015, October 12). *ESTADO TRÓFICO DE UN LAGO TROPICAL DE ALTA MONTAÑA: CASO LAGUNA DE LA COCHA*. <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v25n2/v25n2a02.pdf>
- MAATE. (2021). *Se fortalecen las acciones para la preservación de la Laguna de Yahuarcocha-Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*. <https://www.ambiente.gob.ec/se-fortalecen-las-acciones-para-la-preservacion-de-la-laguna-de-yahuarcocha/>
- Manosalvas, D. (2017). *EVALUACION DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR LAS ACTIVIDADES TURÍSTICAS Y AGRÍCOLAS LOCALIZADAS EN LAS RIVERAS DEL LAGO SAN PABLO*.
- Miño Arias, C. A., & Rodríguez Fuelantala, J. A. (2018). *EVALUACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO EN RELACIÓN AL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y BIOLÓGICOS DEL LAGO SAN PABLO, ECUADOR*. 89.
- Morales, A. (2017). *Libro Raices Imbabura*. https://www.pucesi.edu.ec/webs2/wp-content/uploads/2020/10/Libro-Raices-Imbabura-1_compressed.pdf
- Moreno, D., Quintero, J., & López, A. (2010). *Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia*. <http://lakewatch.ifas.ufl.edu/>
- Oña, J., & Tonato, C. (2017). *DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LAS LAGUNAS DE MOJANDA A TRAVÉS DE LA CUANTIFICACIÓN DE CLOROFILA “A.”*
- O’Reilly, C. (2015, December 21). *¿Qué impacto tiene el cambio climático sobre los lagos de todo el mundo? | iAgua*. <https://www.iagua.es/noticias/ep/15/12/21/que-impacto-tiene-cambio-climatico-re-lagos-todo-mundo>
- O’Sullivan, P. (2005). *Diagnosis and classification of chronic low back pain disorders: Maladaptive movement and motor control impairments as underlying mechanism*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1356689X05001104>
- Portilla-Caicedo, M. K. (2015). *EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS DEL AGUA, PARA DETERMINAR EL ESTADO TRÓFICO DEL LAGO YAHUARCOCHA, PROVINCIA IMBABURA*.
- Portillo, S. (2020). *Cómo cuidar el ecosistema*. <https://www.ecologiaverde.com/como-cuidar-el-ecosistema-3107.html>
- Puente, I. (2021). *Evaluación de la calidad del agua de la Laguna de Cuicocha mediante el uso de la herramienta ICA*.
- Ricardo, R. (2020). *¿Qué es la limnología?- Definición, alcance e historia*. <https://estudiando.com/que-es-la-limnologia-definicion-alcance-e-historia/>

- Ruíz, G., Rosales, F., & Reyes, C. (2012). *Apuntes de Limnología*.
- Sánchez, J. (2021). *Importancia de los ríos y lagos*. <https://www.ecologiaverde.com/por-que-son-importantes-los-rios-y-lagos-1329.html>
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). *Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025*. https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/plan/files/Plan-de-Creacion-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado_compressed.pdf
- Silva, W., Castillo, F., & Severiche, C. (2015). EVALUACION DE LA PRECISIÓN Y EXACTITUD PARA LA DETERMINACIÓN GRAVIMETRICA DE SOLIDOS DISUELTOS TOTALES EN AGUAS EVALUATION OF PRECISION AND ACCURACY FOR DETERMINING TOTAL DISSOLVED SOLIDS GRAVIMETRIC WATERS. *Julio-Diciembre, 2*.
- SMA. (2016). *Eutrofización_ efectos de contaminación de agua y tratamientos*. <https://www.smasa.net/eutrofizacion/>
- Torres - Matovelle, A.-P. (2017). *Indicadores para un sistema de monitoreo de impactos del turismo mediante Límites de Cambio Aceptable en la laguna de Quilotoa, Reserva Ecológica Ilinizas*.
- Zambrano, L. (2003). *Restauración de Lagos y Ríos*.

6. ANEXOS

Anexo 1



Anexo 2



Anexo 3

1 Revisión y preparación de materiales y equipos



Bote Sea Eagle



Remos



Inflador



Caneca para combustible



Motor de 2 tiempos



Batería 12 voltios



Computadora



Convertidor

Anexo 4



Antena de ecosonda Garmin



Receptor de señal



Ecosonda Garmin GPS Map 526s



Nivel



Amarras plásticas



Palos de escoba



Sonar de mano



Herramientas

Anexo 5



Anexo 6

Montaje de equipos en campo

- Colocar el bote en algún lugar seguro, armar e inflar
- Armar la estructura para los equipos y conectar los diferentes equipos para la batimetría
- Recorrido en bote para el reconocimiento del área y observar el buen funcionamiento de los equipos

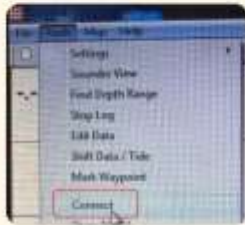
Two photographs showing the process of inflating and setting up the boat. The first photo shows a person using a pump to inflate the boat. The second photo shows a person working on the structure of the boat.

Two photographs showing the boat being used on the water. The first photo shows a group of people in the boat on a lake. The second photo shows a close-up of the boat's structure and equipment.

Anexo 7

3 Uso del software Dr Depth para registro de puntos

- Conexión del programa con el sistema de posición global



- Configuración del rango de dimensión y tamaño del mapa



- Recorrido y registro de puntos de la cubeta lacustre



En zigzag cubriendo la mayor zona posible

Anexo 8

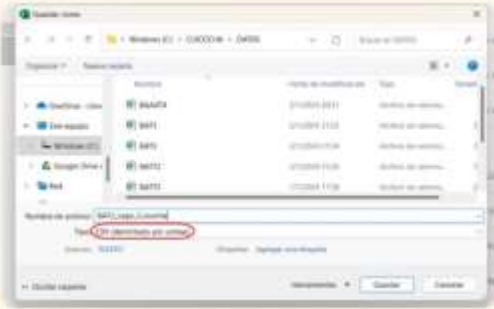
4 Procesamiento de datos y obtención del mapa batimétrico

- Verificar que los datos de latitud, altitud y profundidad estén correctamente registrados para el buen funcionamiento en el software ArcMap

| | A | B | C | D | E |
|----|-------------|-----------------|--------------|---|---|
| 1 | LATITUD (Y) | PROFUNDIDAD (Z) | LONGITUD (X) | | |
| 2 | 0.306463 | -60.03 | -76.373378 | | |
| 3 | 0.306509 | -60.04 | -76.373367 | | |
| 4 | 0.306553 | -67.82 | -76.372354 | | |
| 5 | 0.306581 | -66.73 | -76.372353 | | |
| 6 | 0.306625 | -66.99 | -76.372354 | | |
| 7 | 0.306656 | -66.41 | -76.372357 | | |
| 8 | 0.306689 | -66.1 | -76.372362 | | |
| 9 | 0.306716 | -65.93 | -76.372369 | | |
| 10 | 0.306744 | -65.83 | -76.372382 | | |
| 11 | 0.306772 | -65.93 | -76.372394 | | |
| 12 | 0.306802 | -65.93 | -76.372408 | | |
| 13 | 0.30683 | -65.99 | -76.372426 | | |
| 14 | 0.306852 | -64.21 | -76.372444 | | |
| 15 | 0.306872 | -64.87 | -76.372464 | | |
| 16 | 0.306897 | -63.52 | -76.372488 | | |
| 17 | 0.306902 | -63.52 | -76.372511 | | |
| 18 | 0.306921 | -63.95 | -76.372534 | | |
| 19 | 0.306942 | -63.35 | -76.372555 | | |
| 20 | 0.306965 | -63.85 | -76.372573 | | |
| 21 | 0.30699 | -62.83 | -76.372587 | | |
| 22 | 0.307019 | -62.49 | -76.372601 | | |
| 23 | 0.307051 | -62.14 | -76.372609 | | |
| 24 | 0.307082 | -61.98 | -76.372619 | | |


Hay que tomar en cuenta que para la profundidad debe tener un valor negativo por lo que se multiplica todo por -1, mientras que la longitud debe tener un valor decimal por lo que los valores se dividen para un millón

Anexo 9



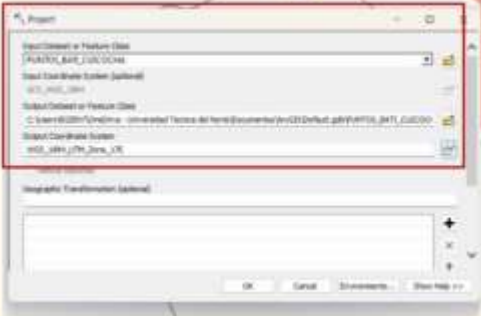
- Transformar en formato .csv delimitado por comas, de lo contrario no podría funcionar en ArcMap.

- Subir los datos desde el Catalog
- Abrir la herramienta de Create Feature Class y colocar la Longitud (X), la Latitud (Y) y la Profundidad (Z)
- Colocar el sistema de coordenadas correcto que es WGS 1984




Anexo 10

- Usar la herramienta Project para la proyección del shape anterior a la zona de Ecuador que es WGS 1984 UTM Zone 17S



- Utilizar la herramienta de Kriging para la interpolación espacial de un raster



Anexo 11

- Realizar un corte a la interpolación con la herramienta Extract by Mask.



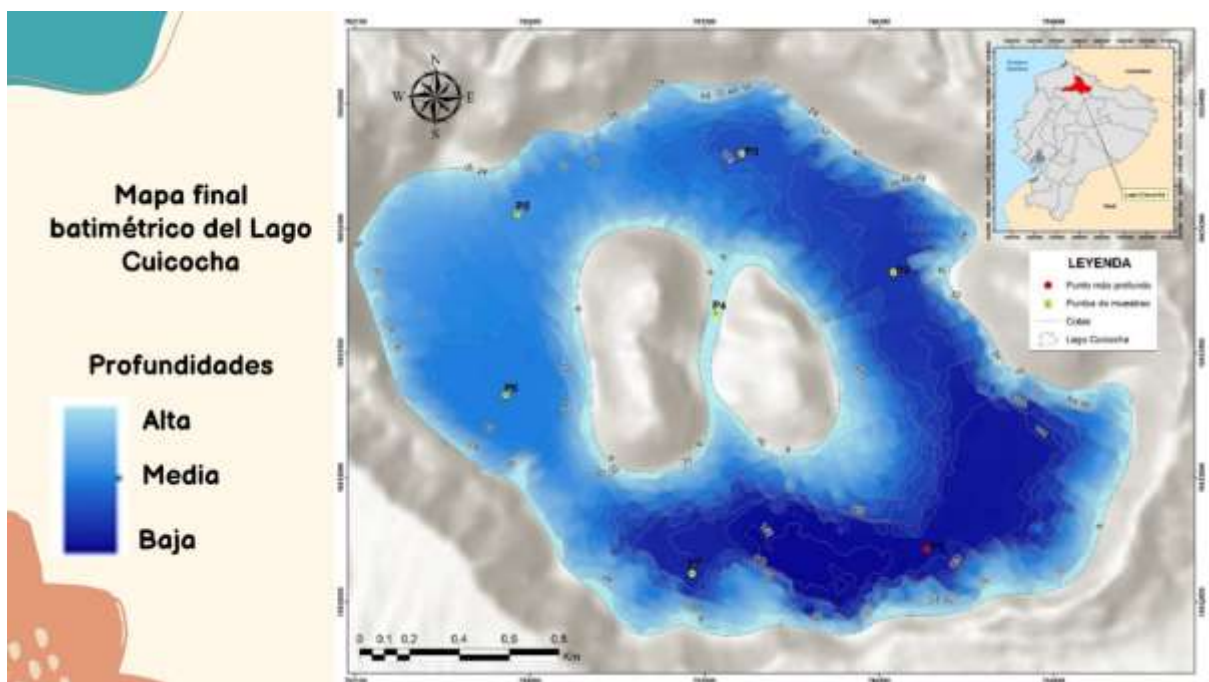
- Realizar las curvas de nivel



- Modificar la escala de colores a la que nosotros queramos.

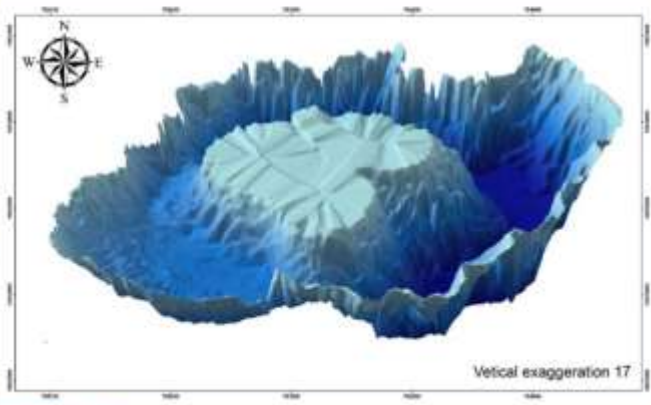



Anexo 12




Anexo 13

- Usar la herramienta de ArcScene con el fin de crear un mapa con visualización en 3D



Mapa de la cubeta del Lago Cuicocha en 3D



Anexo 14



Anexo 15

Datos de precipitación y temperatura (2020 - 2022) de la estación INGUNCHO

| MESES | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul |
|---------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| P (mm) | 118,3 | 161,9 | 184 | 156,5 | 109,6 | 130,5 | 68,9 |
| T (°C) | 10,8 | 10,6 | 10,4 | 10,8 | 10,8 | 10,5 | 10,4 |

| Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Promedio | Total |
|-------------|------|-------|-------|-------|----------|---------|
| 58,1 | 72,2 | 153,6 | 182,8 | 191,7 | 132,3 | 1 588,1 |
| 10,4 | 10,7 | 10,8 | 11 | 10,7 | 10,6 | 127,9 |

Anexo 16

Tabla 9.

Medición general de clorofila y control con el fluorímetro

| Punto 1 | Punto 4 | Punto 7 | Control |
|--------------|---------|---------|---------|
| 47,78 | 41,99 | 42,36 | 10,96 |
| 47,47 | 41,62 | 42,04 | 10,98 |
| 47,29 | 42,12 | 41,73 | 11,03 |
| 47,37 | 41,66 | 41,86 | 11,10 |

Anexo 17

Toma de parámetros con el multiparámetro YSI



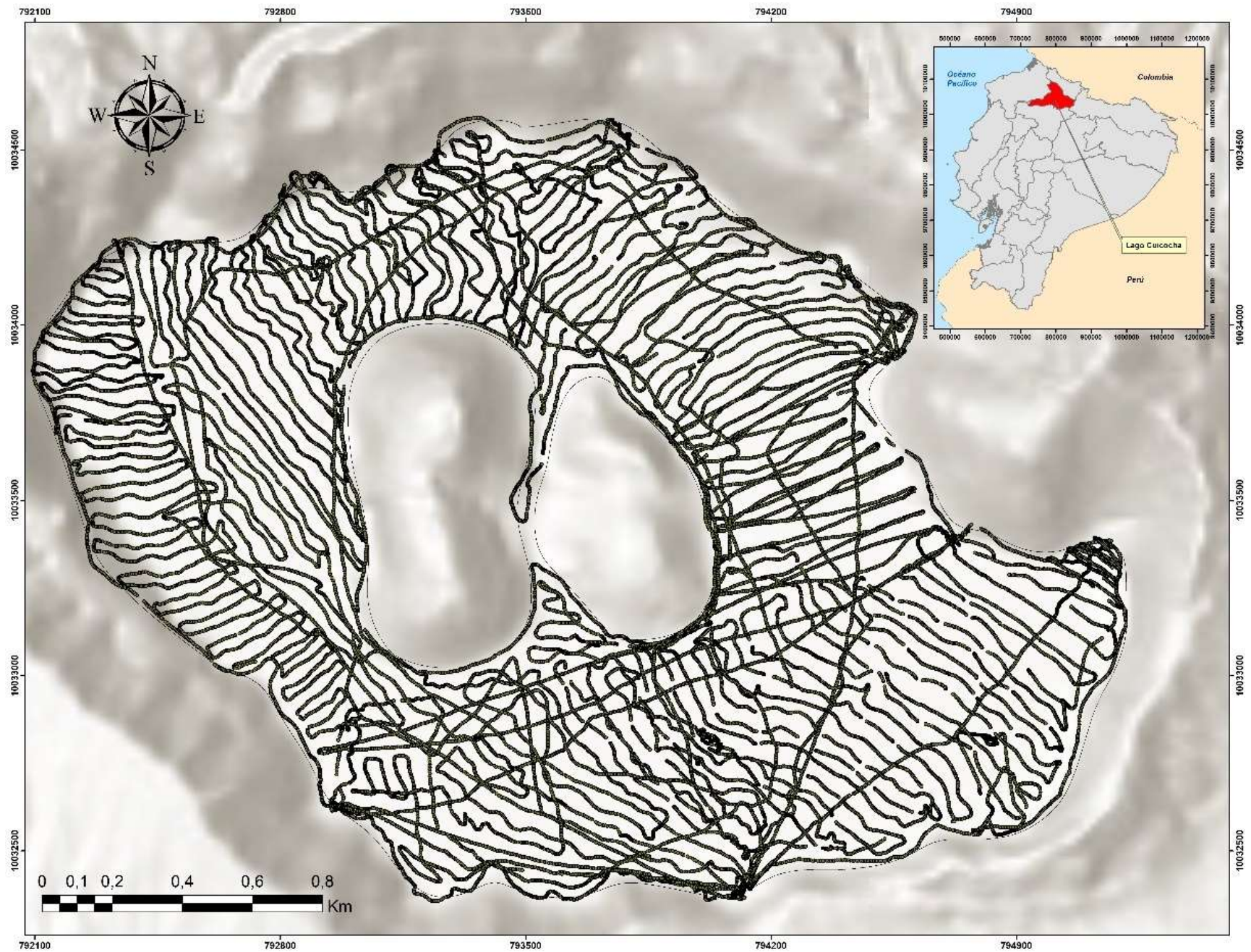
Anexo 18

Datos tomados en campo

| Fecha | Punto | Profundidad | D. Secchi (m) | Oxígeno disuelto (mg/l) | Oxígeno disuelto (%) | Temp (°C) | Hora | Observaciones |
|------------|-------|-------------|---------------|-------------------------|----------------------|-----------|-------|---------------|
| 23/04/2024 | 1 | 160 m | 11,14 | 8,94 | 92,7 | 17,1 | 09:00 | 3 m |
| 23/04/2024 | 1 | 160 m | 11,14 | 8,82 | 93,4 | 17,1 | 09:02 | 4 m |
| 23/04/2024 | 1 | 160 m | 11,14 | 9,03 | 83,2 | 17,1 | 09:05 | 6 m |
| 23/04/2024 | 1 | 160 m | 11,14 | 8,93 | 83,2 | 17 | 09:06 | 8 m |
| 23/04/2024 | 1 | 160 m | 11,14 | 8,77 | 83,1 | 17 | 09:07 | 10 m |
| 23/04/2024 | 2 | 125 m | 11,14 | 7,55 | 78,3 | 17,1 | 10:11 | 3 m |
| 23/04/2024 | 2 | 125 m | 11,14 | 7,38 | 76,4 | 17,1 | 10:12 | 4 m |
| 23/04/2024 | 2 | 125 m | 11,14 | 8,39 | 86,9 | 17,1 | 10:13 | 6 m |
| 23/04/2024 | 2 | 125 m | 11,14 | 8,46 | 77,2 | 17 | 10:14 | 8 m |
| 23/04/2024 | 2 | 125 m | 11,14 | 7,43 | 76,9 | 17 | 10:15 | 10 m |
| 23/04/2024 | 3 | 106 m | 13,15 | 7,83 | 116,4 | 17,1 | 13:39 | 3 m |
| 23/04/2024 | 3 | 106 m | 13,15 | 6,96 | 72,1 | 17,1 | 10:36 | 4 m |
| 23/04/2024 | 3 | 106 m | 13,15 | 5,11 | 53 | 17,1 | 10:38 | 6 m |
| 23/04/2024 | 3 | 106 m | 13,15 | 6,89 | 71,4 | 17 | 10:39 | 8 m |
| 23/04/2024 | 3 | 106 m | 13,15 | 7,75 | 80,2 | 17 | 10:40 | 10 m |
| 23/04/2024 | 4 | 7 m | 9-9,5 | 6,33 | 65,7 | 17,1 | 11:37 | 3 m |
| 23/04/2024 | 4 | 7 m | 9-9,5 | 7,31 | 75,9 | 17,1 | 11:38 | 4 m |
| 23/04/2024 | 4 | 7 m | 9-9,5 | 7,36 | 76,4 | 17,1 | 11:38 | 6 m |
| 23/04/2024 | 4 | 7 m | 9-9,5 | 6,47 | 65,9 | 17,1 | 11:39 | 8 m |
| 23/04/2024 | 4 | 7 m | 9-9,5 | 5,93 | 61,4 | 17 | 11:40 | 10 m |
| 23/04/2024 | 5 | 67 m | 10,13 | 6,91 | 72,1 | 17,2 | 12:16 | 3 m |
| 23/04/2024 | 5 | 67 m | 10,13 | 7,21 | 74,8 | 17,1 | 12:17 | 4 m |
| 23/04/2024 | 5 | 67 m | 10,13 | 6,71 | 69,5 | 17,1 | 12:17 | 6 m |
| 23/04/2024 | 5 | 67 m | 10,13 | 6,51 | 67,9 | 17,1 | 12:18 | 8 m |
| 23/04/2024 | 5 | 67 m | 10,13 | 5,7 | 59,1 | 17,1 | 12:20 | 10 m |
| 23/04/2024 | 6 | 81 m | 13-14 | 7,72 | 80,2 | 17,2 | 12:42 | 3 m |
| 23/04/2024 | 6 | 81 m | 13-14 | 7,8 | 81 | 17,2 | 12:42 | 4 m |
| 23/04/2024 | 6 | 81 m | 13-14 | 7,32 | 76 | 17,1 | 12:43 | 6 m |
| 23/04/2024 | 6 | 81 m | 13-14 | 7,65 | 79,4 | 17,1 | 12:43 | 8 m |
| 23/04/2024 | 6 | 81 m | 13-14 | 7,78 | 80,4 | 17,1 | 12:45 | 10 m |
| 23/04/2024 | 7 | 134 m | 12 | 7,85 | 81,4 | 17,2 | 13:12 | 3 m |
| 23/04/2024 | 7 | 134 m | 12 | 7,82 | 81,2 | 17,1 | 13:13 | 4 m |
| 23/04/2024 | 7 | 134 m | 12 | 7,65 | 79,4 | 17,1 | 13:14 | 6 m |
| 23/04/2024 | 7 | 134 m | 12 | 6,7 | 69,5 | 17,1 | 13:15 | 8 m |
| 23/04/2024 | 7 | 134 m | 12 | 7,75 | 69,5 | 17,1 | 13:18 | 10 m |

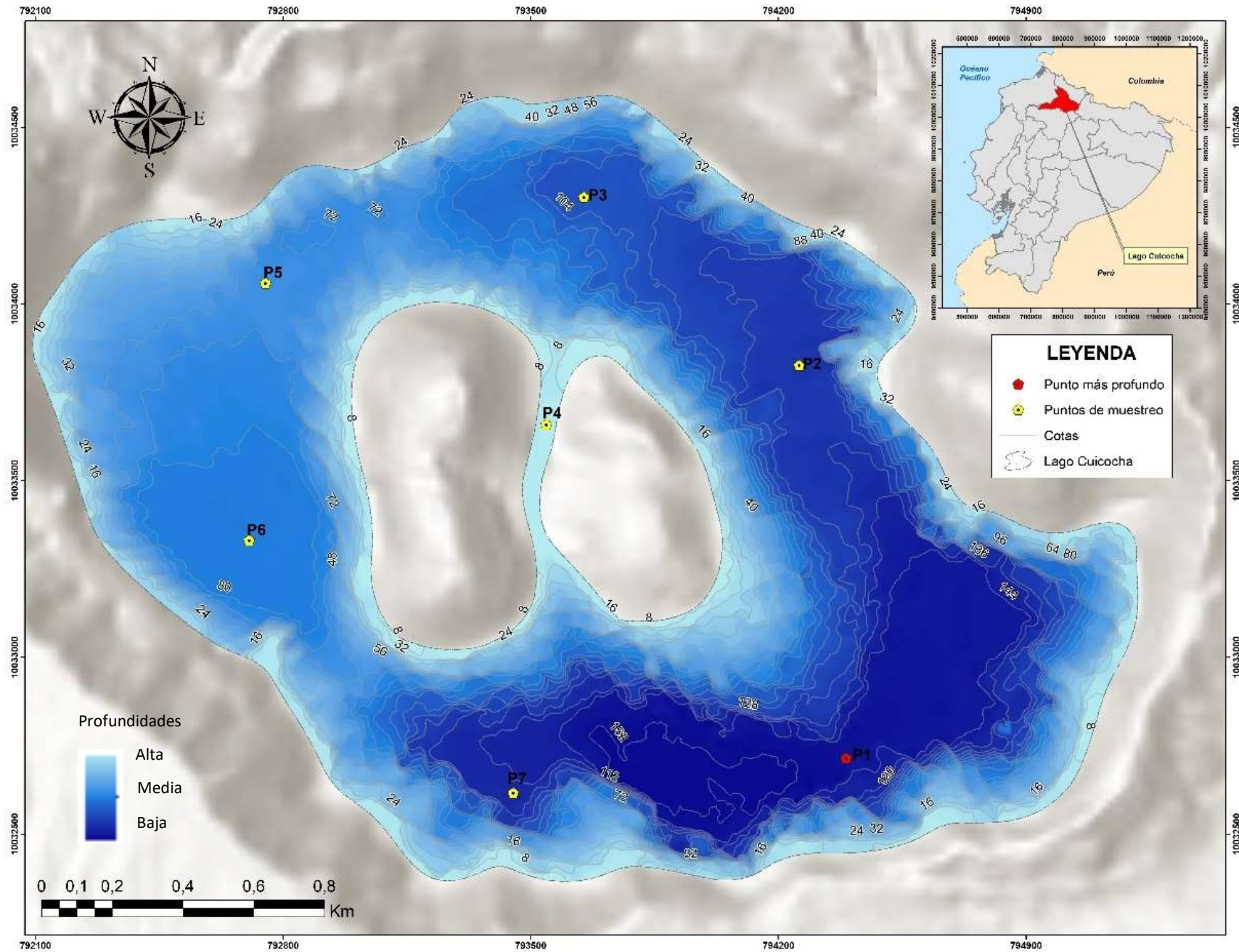
Anexo 19

Mapa de los puntos registrados por la sonda de profundidad



Anexo 20

Mapa batimétrico del lago Cuicocha



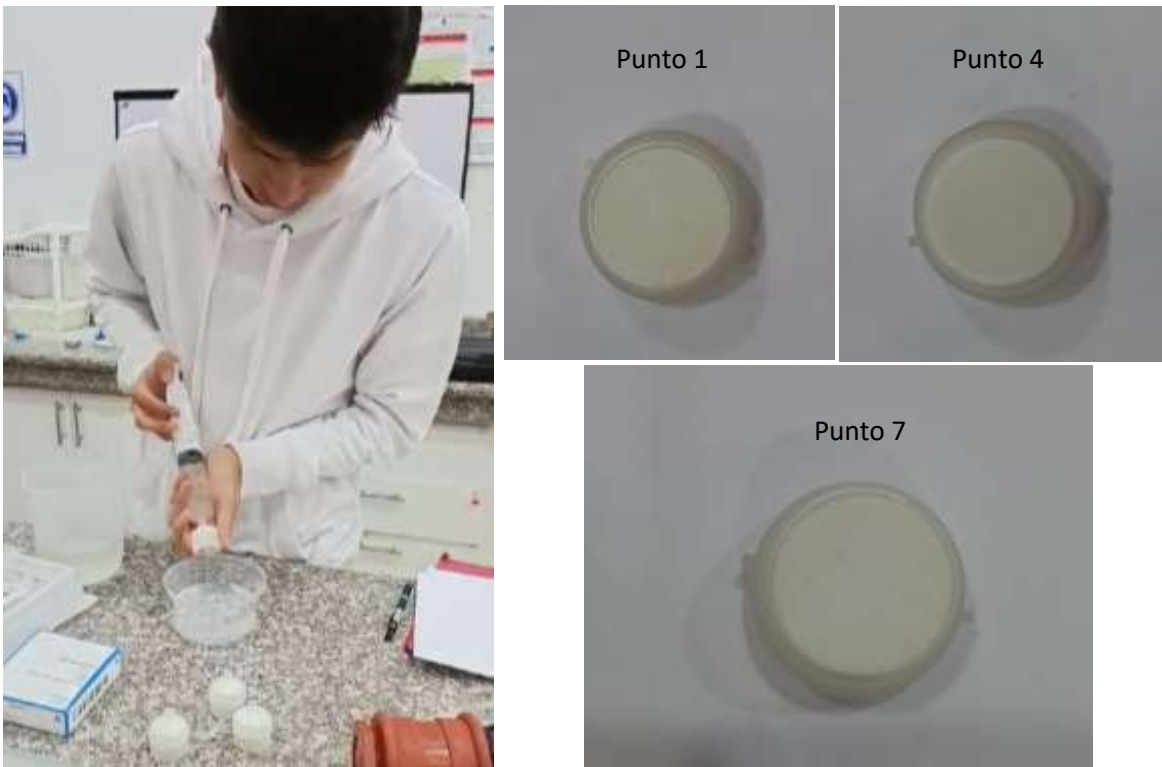
Anexo 21

Medición del Disco Secchi



Anexo 22

Proceso de extracción de clorofila en el laboratorio



Anexo 23

Colocación de metanol a la clorofila, etiquetado y almacenamiento



Anexo 24

Análisis de la clorofila en el fluorímetro y toma de datos



Medición de clorofila (chl_a)

| Punto 1 | Punto 4 | Punto 7 | AGUA DESTILADA |
|---------|---------|---------|----------------|
| 47.78 | 41.93 | 42.36 | 10.96 |
| 47.47 | 41.62 | 42.04 | 10.98 |
| 47.29 | 42.12 | 41.73 | 11.03 |
| 47.37 | 41.66 | 41.86 | 11.10 |