

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE
LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN
EL PERIODO 2015-2017”**

Realizado por:

PATRICIO ANDRÉS RODRÍGUEZ MONTAÑO

Director del proyecto:

Miguel Martínez-Fresneda Mestre Ph.D.

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Quito, 27 de julio de 2017

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, PATRICIO ANDRÉS RODRÍGUEZ MONTAÑO, con cédula de identidad # 1716782550, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado de calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



1716782550

FIRMA Y CÉDULA

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE
LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDRQUÍMICOS
EN EL PERIODO 2015-2017”**

Realizado por:

PATRICIO ANDRÉS RODRIGUEZ MONTAÑO

Como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERO AMBIENTAL

ha sido dirigido por el profesor

MIGUEL MARTÍNEZ-FRESNEDA MESTRE

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

FABIO VILLALBA

JUAN CARLOS NAVARRO


Después de revisar el trabajo presentado,

Lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador



FIRMA



FIRMA

Quito, 27 de JULIO de 2017

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos. Son mi inspiración y ejemplo para luchar por mis metas.

AGRADECIMIENTO

A Miguel Martínez-Fresneda, por su apoyo, dedicación y tiempo durante el periodo de realización de esta investigación.

A Juan Carlos Navarro, por su gran ayuda en la escritura y elaboración de este proyecto.

A Fabio Villalba, por transmitir sus amplios conocimientos sobre la laguna sujeto de estudio.

A la Universidad Internacional SEK, por el inmenso apoyo al financiar este proyecto de investigación.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

Resumen

La eutrofización es un fenómeno natural característico de lagunas de poca profundidad que se puede suscitar a lo largo de decenas de años. La eutrofización antrópica se refiere a la aceleración de dicho proceso. La laguna de Limoncocha se encuentra influenciada por diversas actividades antrópicas que tienen un impacto negativo sobre el recurso, donde se ven comprometidos varios servicios ambientales que estos ecosistemas pueden proveer. Entre noviembre del 2015 y marzo del 2017 se recopiló información a partir de la composición físicoquímica de los siguientes cuerpos hídricos de la Reserva Biológica Limoncocha: laguna de Limoncocha, río Pishira, río Playayacu y río Napo, con la finalidad de determinar el estado trófico de la laguna e identificar los parámetros más significativos para explicar la variabilidad del quimismo del agua. Para este fin, se utilizaron diferentes índices de estado trófico que determinaron que la laguna ha pasado de ser un cuerpo de agua en estado de meso-eutrofia a un estado eutrófico y viceversa. Se llevó a cabo un análisis multivariado a partir de una matriz de correlación y un análisis de componentes principales (ACP). Se halló una correlación positiva entre el potencial hidrógeno y las variables oxígeno disuelto (0,89), temperatura (0,80) y potencial redox (0,86) en el punto más representativo de la laguna, la Zona Profunda. Los primeros componentes del ACP de los parámetros medidos in-situ y ex situ, explicaron un 79,27 y 43,81% de la varianza respectivamente. Adicionalmente, el ACP demostró una asociación entre el punto de muestreo llamado Muelle y el nitrógeno amoniacal; señal de descomposición de urea, contenida en aguas residuales domésticas, además de las asociaciones entre altos niveles de sales y los puntos de muestreo llamados Caño y Zona Profunda. Las mayores concentraciones de fosfatos se registraron en la época lluviosa, fenómeno atribuido al arrastre de material alóctono hacia la laguna. Los resultados obtenidos ponen en evidencia el avanzado estado trófico del agua de la laguna, lo que determina que se precisa de una gestión urgente de los caudales de aporte a este cuerpo hídrico.

Palabras clave: *Limoncocha, humedales, eutrofización, análisis de componentes principales, físicoquímico.*

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
2015-2017

Abstract

Eutrophication is a natural phenomenon typical of shallow lakes that can occur within tens of years. Anthropogenic eutrophication refers to the acceleration of this process. The Limoncocha lake is influenced by several anthropic activities that have a negative impact to this resource, where several environmental services that these ecosystems can provide are compromised. Between November 2015 and March 2017, data was gathered from the physicochemical composition of the following water bodies of the Limoncocha Biological Reserve: Limoncocha lake, Pishira river, Playayacu river and Napo river, in order to determine the lake's trophic estate in addition to identify the most significant parameters to explain the variability of the water's chemistry. For this purpose, different trophic state indexes were used, which determined that the lake has gone from being a waterbody in a meso-eutrophic to a eutrophic state and vice versa. A multivariate analysis was performed using a correlation matrix and a principal component analysis (PCA). A positive correlation was found between the hydrogen potential and the following variables: dissolved oxygen (0.89), temperature (0.80) and redox potential (0.86) in the most representative point of the lake, the "Zona Profunda". The first PCA components resulting from the parameters measured in-situ and ex situ, explained 79.27 and 43.81% of the variance respectively. Furthermore, the PCA demonstrated an association between the sampling point "Muelle" and the ammoniacal nitrogen; signal of decomposition of urea, contained in domestic wastewater, in addition to the associations between high salt levels and the sampling points "Caño" and "Zona Profunda". The highest concentrations of phosphates were recorded in the rainy season, a phenomenon attributed to the dragging of allochthonous material into the lake. The results obtained indicated the advanced trophic state of the water in the lake, which determines that an urgent management of the tributaries of this waterbody is required.

Key words: *Limoncocha, wetlands, eutrophication, principal components analysis, physicochemical.*

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

Introducción

Recientemente, los humedales se consideraban terrenos inservibles e insalubres, fuente de vectores de enfermedades, y, por lo tanto, espacios de terreno que debían ser eliminados para transformarlos en algo “útil” para el aprovechamiento humano, por ejemplo, expansión urbana o agrícola. Sin embargo, la creciente preocupación ambiental ha sacado a relucir las amplias utilidades que estos ecosistemas son capaces de proveer (Manzano, Borja, & Montes, 2002).

Utilizando terminologías relativamente nuevas, muy utilizadas en materia ambiental, encontramos los tan necesarios “bienes y servicios ambientales”, que los humedales son capaces de proporcionar con el fin de salvaguardar la salud de la naturaleza, la cual se encuentra directamente relacionada con la calidad de vida del ser humano (Manzano, Borja, & Montes, 2002). La provisión de agua y alimentos, fijación de carbono, paisajismo, refugio de fauna, crecimiento de flora y purificación de aire, son algunos de los servicios ambientales que los humedales pueden proveer (GADPRL, 2015).

La Amazonía ecuatoriana alberga una alta diversidad de especies de fauna y flora que coexisten dentro de varios ecosistemas que son muy frágiles ante la presencia y actividad humana. La Reserva Biológica Limoncocha es un ecosistema que alberga uno de los humedales más antiguos de esta Región: la laguna de Limoncocha. Esta laguna es sujeto de una elevada influencia antrópica. En este cuerpo hídrico se depositan aguas residuales domésticas. Adicionalmente, existe contaminación producto de la actividad agrícola en las cabeceras de los ríos que tienen influencia directa con en este humedal (Armas & Lasso, 2011).

La contaminación producida por residuos líquidos domésticos que entran en contacto con los cuerpos hídricos, radica en su elevado aporte de detergentes, heces fecales, y

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

sustancias oleosas; elementos que frecuentemente conforman la mayor parte de dichos fluidos contaminantes (Moreno, Quintero, & López, 2010). En el caso de las lagunas, las aguas residuales ricas en nutrientes contribuyen de gran manera al cambio trófico de éstas, pudiendo causar estados de eutrofia e hipereutrofia (Hernández, 2015).

Particularmente, los fosfatos y nitratos son importantes nutrientes a considerar debido a que ambos favorecen la eutrofia en los cuerpos de agua. A esta problemática se suman los posibles periodos de estratificación y mezcla de la laguna, que influyen de gran manera en el ciclo de nutrientes, que a su vez están sometidos a flujos másicos y energéticos como también a los caminos de la producción primaria y a la descomposición de materia orgánica (NRCS, 1995). Por lo tanto, el proyecto se enfocará en identificar las concentraciones de estos y otros nutrientes en la laguna, y determinar las variables fisicoquímicas responsables de la posible alteración del estado trófico de este cuerpo léntico.

Durante las últimas décadas la intensificación del estudio de los humedales con la intención de mejorar su gestión y conservación tiende a centrarse en el análisis del origen, la estructura y el funcionamiento de los mismos. Como manifiestan Carter et al. (1979), Novitzki (1979), Zoltai y Pollent (1983) el objetivo es obtener conocimientos claros acerca del funcionamiento del humedal sujeto de estudio. Entre todos los factores a investigar, los hidrológicos son los que definen las líneas generales del carácter y el funcionamiento de estos cuerpos de agua (Citado en Manzano, Borja & Montes, 2002).

Por su condición de Reserva Biológica, Sitio Ramsar y Área de Importancia para la Conservación de las Aves (IBA), la Reserva Biológica Limoncocha se presenta como un lugar donde es necesaria la investigación científica para determinar su estado y los factores que lo influyen, y así poder manejar este frágil ecosistema de una manera sostenible. Los humedales son fuentes importantes de recursos debido a la variedad de funciones que desempeñan, relacionadas con procesos o atributos químicos, físicos o biológicos cruciales

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

para la integridad y estabilidad del ecosistema del que forman parte. Estas funciones influyen en la calidad del agua y contribuyen a sostener la cadena alimenticia. El ciclo de nutrientes proporciona una gran cantidad de hábitats para una gran variedad de plantas y animales que sustentan muchas actividades económicas y sociales (Armas & Lasso, 2011).

Sin embargo, el aumento del estado trófico en el agua es un fenómeno que amenaza la vida en la laguna. La eutrofización moderada ocasiona un aumento en la productividad de la comunidad de peces. Por su parte, un estado hipereutrófico, en el que existe una gran cantidad de productores primarios, causa una gran variabilidad del oxígeno disuelto (Wetzel, 2001). La mayoría de peces son muy sensibles a dichas variaciones (Harper, 1992), por lo que se pueden producir mortandades masivas por la falta de oxígeno en el agua y también por la alta concentración de amonio debido a una elevada tasa de descomposición de materia orgánica.

El trasfondo social de la RBL indica que los pobladores en los alrededores de la laguna viven de la pesca, cuya actividad es realizada en la laguna de Limoncocha. La riqueza ictiofaunística de la laguna de Limoncocha constituye la principal fuente de proteínas de la dieta de los nativos y colonos que viven en la zona de amortiguamiento de la RBL (Armas & Lasso, 2011). En el caso de existir episodios de mortandades masivas de peces, muchas personas perderían su fuente principal de proteínas y gran parte de su sustento económico.

Por otra parte, la laguna de Limoncocha posee una elevada diversidad de organismos acuáticos y semiacuáticos que podrían sufrir la pérdida de su hábitat (Armas & Lasso, 2011). Esto podría suceder debido a que humedales como este, sufren procesos de eutrofización naturales que aumentan en gran medida debido a la influencia antrópica. La progresiva pérdida de su espejo de agua, generalmente es causado por el crecimiento desmesurado de plantas acuáticas y pueden llegar a convertirse en ecosistemas terrestres (Wetzel, 2001).

El aporte que el presente estudio generó para un futuro, y que además puede servir como base para futuras investigaciones, fue determinar los iones que explican el mayor

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

porcentaje de la variabilidad del quimismo de la laguna. Asimismo, se conoció el agrupamiento de ciertos iones y parámetros fisicoquímicos con determinados puntos de muestreo. Finalmente, se generaron indicadores de alerta sobre el estado trófico de la laguna que estuvieron basados en las concentraciones de iones mayoritarios encontrados.

Una de las principales formas de caracterizar un sistema acuático es la determinación de su estado trófico (Mazzeo, y otros, s.f.). Éste puede clasificarse como oligotrófico cuando es pobre en nutrientes y productividad biológica, mesotrófico para un estado intermedio, y eutrófico cuando es rico en nutrientes y alta productividad (Goyenola, 2007). El estado trófico de los lagos es un concepto fundamental para su gestión, puesto que describe la relación entre el estado de nutrientes en un lago y el crecimiento de la materia orgánica en el mismo (Moreno, Quintero, & López, 2010).

La eutrofización es un proceso natural de transformación de un estado trófico menor a uno superior como producto de la adición de nutrientes (Moreno, Quintero, & López, 2010). Esta transformación sucede debido a la entrada de nutrientes desde la cuenca, que se produce de manera constante a lo largo del tiempo (Wetzel, 2001). Sin embargo, el fenómeno de la eutrofización antrópica consiste en la aceleración de la eutrofización natural del cuerpo hídrico por actividades como el uso de fertilizantes, detergentes y el vertido de materia orgánica (Goyenola, 2007). Esto se manifiesta en una intensa proliferación y acumulación excesiva de microalgas y plantas superiores (Mazzeo, y otros, s.f.) que son capaces de despojar a los demás organismos de la laguna del oxígeno que necesitan para vivir (Moreno, Quintero, & López, 2010).

Tanto el nitrógeno como el fósforo contribuyen a la eutrofización, pero la clasificación del estado trófico normalmente se basa en el nutriente que presenta una limitación para el crecimiento algal, que en la mayoría de casos, es el fósforo (Moreno, Quintero, & López, 2010). En la identificación del nutriente limitante Reynolds (1992) concluyó que los

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

requerimientos metabólicos del fitoplancton son satisfechos cuando la concentración de fósforo reactivo soluble (SRP) supera los 0,003 mg P/L, y la concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (DIN) supera los 0,08 mg N/L (Citado en Cruz-Pizarro, de Vicente, Moreno-Ostos, & Amores, 2003). Sin embargo, se suelen considerar los niveles límites aproximados de concentración para lagos y embalses de Ryding & Past (1992) para SRP inferiores a 0,05 mg P/L indicarían una posible limitación por fósforo, y concentraciones de nitrógeno biológicamente disponible inferiores a 0,02 mg N/L, una limitación por este nutriente (Citado en Cruz-Pizarro, de Vicente, Moreno-Ostos, & Amores, 2003).

Por su parte, el ion fosfato es soluble y es utilizado por las plantas para su desarrollo, pero de encontrarse en cantidades excesivas puede producir un crecimiento acelerado de algas. Además, altas concentraciones de fosfatos provocan procesos de polución y eutrofización, éstos provienen generalmente de los detergentes y fertilizantes. Al mismo tiempo, cuando los microorganismos descomponen las algas, disminuye el oxígeno disuelto en el agua, lo que causa una limitación en la vida de los demás organismos aerobios del ecosistema (Lavie, Salatino, Bermejillo, Morábito, & Filippini, 2009). Cuando los fosfatos son inferiores a 0,0073 mg/L, el cuerpo de agua se encuentra en un estado de oligotrofia, entre 0,0074 y 0,0013 mg/L en mesotrofia y cuando es mayor a 0,014 mg/L, es eutrófico (Vásquez, Ariza, & Pinilla, 2009).

En el caso de los nitratos, estos pueden estar presentes por el lavado de fertilizantes y tienen la capacidad de aumentar los procesos de eutrofización. Concentraciones en condiciones naturales del ion nitrato infrecuentemente exceden los 0,45 mg/L. Asimismo, concentraciones superiores a 0,9 mg/L en lagos de inundación, favorecen el crecimiento de algas y por lo tanto condiciones de eutrofia. Finalmente, valores mayores a 20 mg/L se interpretan como alerta de afluentes contaminados (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2009).

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

Se han realizado importantes estudios de calidad de agua y estado trófico de cuerpos hídricos en ecosistemas con características similares a las de la laguna de Limoncocha. En el embalse Río Tercero en Argentina, se determinaron indicadores de eutrofización mediante el análisis de: temperatura (T), pH, oxígeno disuelto (OD), transparencia Secchi (DS), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT) y clorofila- α (Cl- α). Se conocía que dicho embalse tenía una alta influencia antrópica por agricultura, manejo pecuario en alta pendiente, descarga de efluentes domésticos sin tratar, entre otros (Ledesma, Bonansea, Rodriguez, & Sánchez, 2013). Se demostró un fuerte decrecimiento en la calidad del agua del embalse en el periodo analizado debido al enriquecimiento de materia orgánica y nutrientes en el embalse como consecuencia de la disposición de los diferentes tipos de efluentes. Dicho embalse sufrió un cambio de la calidad del agua de mesotrófico a eutrófico, hecho que evidenció la necesidad de urgentes medidas de gestión tanto en la cuenca como en el reservorio. La matriz de correlación y el análisis de componentes principales empleados en este estudio mostraron una correlación positiva entre las variables PT, Cl- α y T (Ledesma, Bonansea, Rodriguez, & Sánchez, 2013).

Conjuntamente, el estudio denominado “Descripción del estado trófico de diez humedales del altiplano cundiboyasense” hacía evidente los bajos contenidos de oxígeno en la mayoría de humedales, tomando como principal factor responsable a la descarga de materia orgánica. Al mismo tiempo, los análisis de las siguientes variables físicas y químicas: transparencia Secchi, oxígeno disuelto, temperatura, amonio, nitratos, nitritos y ortofosfatos, permitieron deducir que la mayoría de los humedales sujetos a estudio presentaban condiciones de eutrofia e hipereutrofia (Vásquez, Ariza, & Pinilla, 2009).

La dinámica hídrica de la laguna de Limoncocha presenta varios indicios de eutrofización acelerada. Existe evidencia de contaminación antrópica en las cabeceras de los ríos que drenan en la laguna. Asimismo, la evidencia cartográfica satelital muestra un

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

retroceso del espejo de agua en algunas zonas de la laguna, hecho que podría atribuirse a su eutrofización (Armas & Lasso, 2011). Igualmente, se observa en la laguna un crecimiento desmesurado de lechuguines (*Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes*); especies invasivas que se reproducen de forma acelerada frente a un incremento de nutrientes en el agua (López, 2012).

Por lo tanto, la hipótesis que se planteó para la presente investigación fue que la laguna se encuentre en un estado de hipereutrofia debido a una alta carga de nutrientes en ella, siendo los principales responsables de este estado los altos niveles de los iones fosfato y nitrato provenientes en su mayoría del lavado de fertilizantes que entran en contacto con los ríos, y la descarga de aguas residuales domésticas en los mismos. Se proyectó que los puntos donde desembocan el río Pishira y el río Playayacu tendrían una mayor concentración de estos iones, debido a que estos cauces traen consigo nutrientes que potencialmente son almacenados en los sedimentos de la laguna.

El objetivo planteado para el efecto del estudio fue determinar el estado trófico de la laguna de Limoncocha a través de la determinación de la composición química del agua en el periodo 2015-2017.

Materiales y Métodos

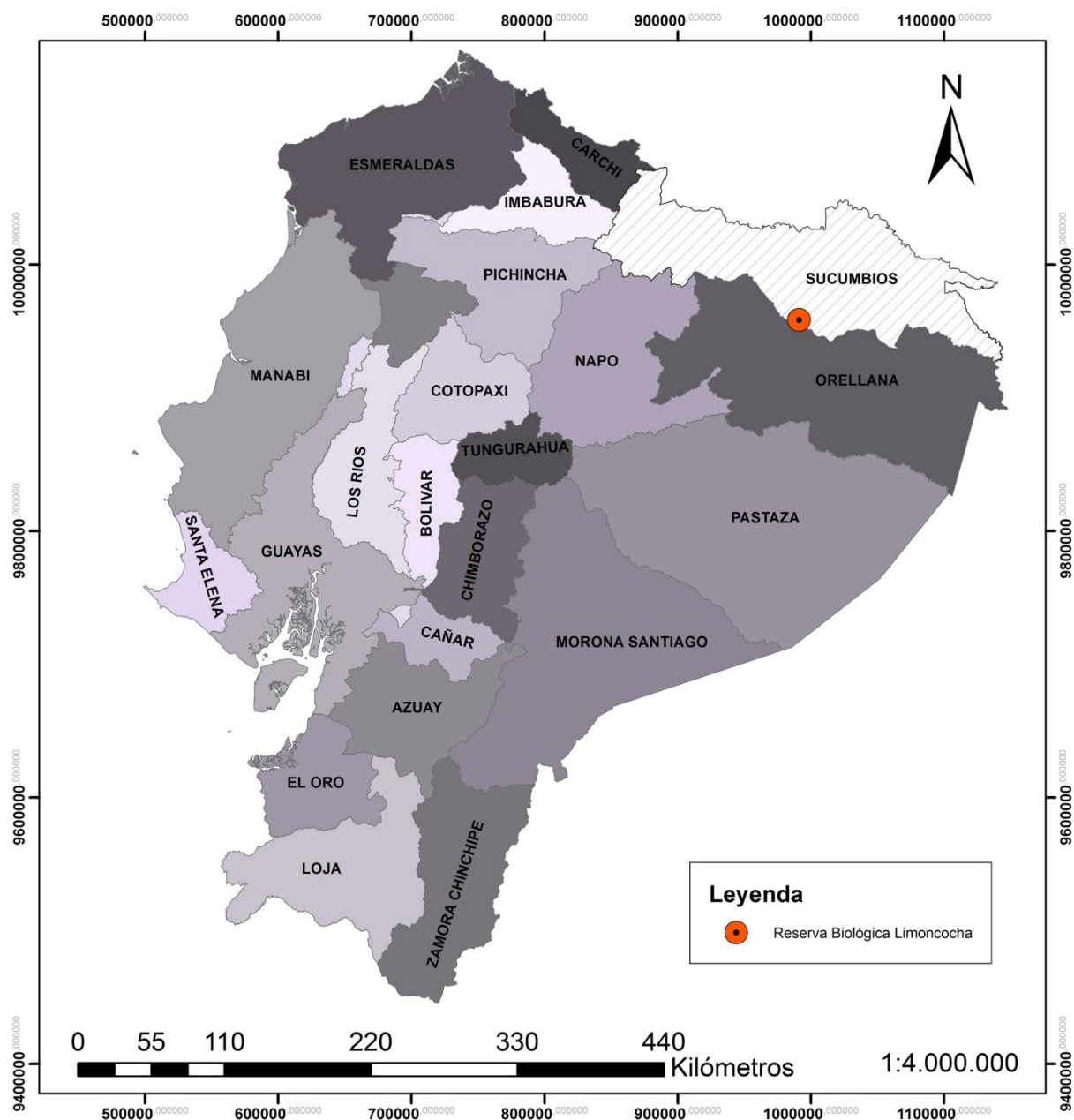
Área de estudio

La laguna de Limoncocha, se encuentra situada en La Reserva Biológica Limoncocha. El área se localiza en la provincia de Sucumbíos, ver Figura I, y cuenta con una extensión de 4613 hectáreas (Armas & Lasso, 2011). El rango altitudinal de esta área protegida oscila entre los 0 y 213 metros sobre el nivel del mar (MAE, 2015). La Reserva resguarda principalmente la laguna de Limoncocha, ver Figura II, pero también se encuentra dentro de ésta, una laguna de menor tamaño conocida como Yanacocha o laguna Negra. Además, otros cuerpos lénticos

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

que preserva la Reserva son algunos humedales, zonas pantanosas y una serie de bosques húmedos tropicales que rodean el área. A su vez, esta área alberga una importante cantidad de especies de aves acuáticas, una de las principales razones por la cual, fue declarada como sitio Ramsar (MAE, 2015).

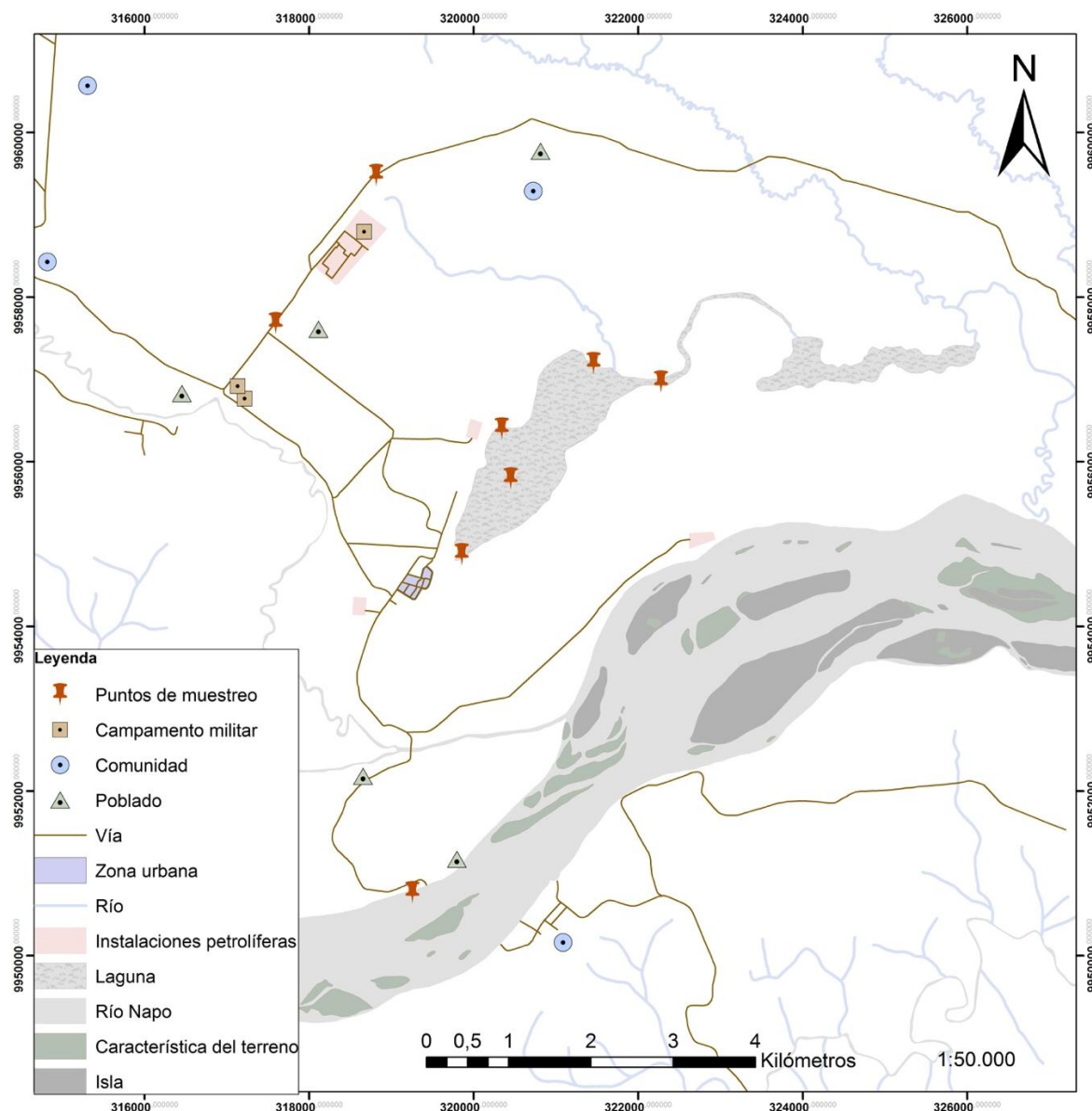
Figura I. Mapa de ubicación de la RBL



Adaptado de: Instituto Geográfico Militar, 2017, Base Nacional escala 1:4.000.000

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

Figura II. Mapa del área de estudio



Adaptado de: Instituto Geográfico Militar, 2017, Base Nacional escala 1:50.000

Diseño muestral

Se determinó la composición química del agua y el estado trófico de la laguna de Limoncocha con base en el análisis comparativo de cinco puntos situados dentro de la laguna y tres ríos que tienen influencia directa con la misma. Para los puntos internos de la laguna se analizaron muestras de perfiles a diferentes profundidades mientras que para los ríos se analizaron sólo muestras superficiales. Los análisis de las muestras de agua recogidas en la

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

laguna de Limoncocha se realizaron en el Laboratorio de Procesos de la Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales de la Universidad Internacional SEK Ecuador, para el periodo de noviembre del 2015 a marzo del 2017, tomando muestras en los diferentes puntos con una frecuencia mensual.

Los puntos de muestreo, se seleccionaron con base en estudios previos realizados por estudiantes y docentes de la Universidad Internacional SEK Ecuador. Dichos puntos atienden a una configuración espacial con suficiente separación para poder realizar análisis comparativos entre ellos. Esta configuración espacial se encuentra atravesando la laguna mediante una extensión transversal que está constituida por tres puntos de muestreo. El primero llamado “Muelle”, un segundo llamado “Zona Profunda” situado en el centro de la laguna, y un tercero llamado “Caño” que es un punto de salida de agua de la laguna hacia el lado oeste donde se encuentra la laguna Negra. Dos de los puntos seleccionados son las desembocaduras de ríos en la laguna que tienen influencia antropogénica comprobada (Armas & Lasso, 2011). El primero nombrado “Desembocadura Pishira” y el segundo denominado “Desembocadura Playayacu”. Los ríos seleccionados para muestreo, por tener relación directa con la laguna fueron: el río Pishira, río Playayacu y río Napo, el último de éstos, se seleccionó debido a que la laguna de Limoncocha es un meandro abandonado de este río, y además, cuando su nivel sube mucho en épocas lluviosas, éste suele causar episodios de inundación en el sector de la laguna (Carrera, 2014). Los sitios fueron posicionados mediante el uso del GPS (Ordóñez, 2013).

Muestreo en campo, almacenamiento y transporte de muestras

Análisis de parámetros medidos in situ. Los parámetros medidos fueron los siguientes: pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y potencial redox. Para todos ellos se utilizó una sonda multiparámetros marca HACH. Éstos se midieron desde la superficie y cada 20 cm de profundidad hasta llegar al sedimento.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

Análisis de parámetros medidos ex situ. Las muestras de agua fueron recolectadas utilizando el equipo Van Dorn. El agua recolectada en la botella horizontal de este equipo se trasladó a envases plásticos de 250 mL llenados completamente y almacenados a 4 °C. Este proceso se realizó desde la parte superficial de la laguna, es decir, 0 cm, continuando cada 40 cm hasta llegar al sedimento. Dichas muestras se utilizaron posteriormente para el análisis en laboratorio de iones mayoritarios. El procedimiento fue el mismo para el análisis de cationes, con la diferencia que a las muestras recogidas se les añadió una solución de ácido nítrico al 1% para su conservación.

Métodos de laboratorio

El análisis de los cationes Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Sodio (Na^+) y Potasio (K^+), se ejecutó mediante el método de Absorción Atómica de llama en el equipo Perkin Elmers, donde se mide la concentración del catión en mg/L en las muestras mediante la Ley de Beer-Lambert-Bouguer, la misma que relaciona la concentración con la absorbancia de la energía electromagnética de los elementos (Plummer, 2005).

Los aniones Cloruro (Cl^-), Fosfato (PO_4^{3-}), Nitrato (NO_3^-), Nitrito (NO_2^-), Nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3 - \text{N}$), Sulfato (SO_4^{2-}), se analizaron utilizando el espectrofotómetro marca HACH modelo DR/4000 con los métodos 8113, 8048, 8171, 8153, 8038, 8051, respectivamente (StandardMethods, 2012).

Métodos estadísticos

Para identificar las variables que determinan la variabilidad en la calidad del agua en la laguna de Limoncocha, se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo multivariado utilizando el software PAST. También se elaboró una matriz de correlación para hallar la covariación de cada par de variables. Se empleó el coeficiente de correlación de Pearson, que mide la magnitud de la asociación lineal entre dos variables que no depende de las unidades

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

de medida de las variables originales. Se consideraron como asociaciones significativas aquellas variables con coeficientes de correlación $r > 0.5$ (Helena et al., 2000).

A la par, se efectuó un análisis de componentes principales (ACP) para demostrar el agrupamiento de los diferentes sitios de muestreo según los parámetros fisicoquímicos medidos para facilitar la comprensión del estado trófico de la laguna de Limoncocha.

Métodos adicionales, Índices e indicadores de eutrofización

Se utilizó la aproximación desarrollada por Carlson en 1977 que calcula un índice numérico de estado trófico (IET) en una escala de 0 a 100, el cual se estimó a partir de los valores de transparencia del agua (profundidad de visión del disco Secchi) (SD) (Citado en Cruz-Pizarro, de Vicente, Moreno-Ostos, & Amores, 2003). Simultáneamente, se recurrió al índice de estado trófico modificado (IETm) propuesto por Toledo Jr. en 1985, que resulta más adecuado para humedales de zonas tropicales como el del presente estudio (Santos & Florencio, 2001). Se utilizaron los dos índices con el fin de realizar una comparación entre los mismos.

Se utilizó también, como parte de la clasificación del estado trófico, el Programa Internacional para la Organización, Cooperación y Desarrollo Económico de aguas interiores (OCDE, 1982).

Por último, se empleó la clasificación de Thienemann con el fin de corroborar por tres métodos el estado trófico de la laguna.

Resultados

Correlaciones lineales de Pearson

Las correlaciones de los parámetros fisicoquímicos medidos in situ se muestran en el Anexo A (Tabla V). Para los puntos de muestreo Caño, Zona Profunda, Muelle y Desembocadura Píshira, se observa una correlación positiva entre los siguientes parámetros:

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

potencial hidrógeno, potencial redox, temperatura y oxígeno disuelto. Esto significa que partiendo desde la superficie de la laguna y continuando hacia la zona béntica de la misma, dichos parámetros fisicoquímicos reducen sus valores independientemente de las unidades de los mismos, es decir, el pH en este punto de la laguna se mantiene alcalino pero conforme se llega a la zona anóxica de la columna de agua, éste se aproxima a la neutralidad.

Por otra parte, el eH se mantiene positivo en la mayoría de la columna de agua, sin embargo, las mediciones cercanas al sedimento de la laguna indican que existen condiciones reductoras, ver Anexos (Tabla IV), mostrando valores negativos de eH producto de la falta de oxígeno en dichos perfiles. Los valores negativos de eH podrían también estar asociados a la presencia de sulfuro de hidrógeno (Arpi, 2004).

Los fenómenos de oxidación-reducción son capaces de modificar el quimismo del agua, por ejemplo, poniendo en solución ciertos iones o precipitándolos. El ion nitrato, sujeto de estudio en la presente investigación, es afectado por los procesos de óxido-reducción, debido a que puede ser reducido a N_2 o NH_4^+ , y el ion amonio puede ser oxidado a N_2 y NO_3^- (Custodio & Llamas, 1996). Esto explicaría en parte la alta variabilidad de los datos obtenidos del ion nitrato, ya que las condiciones redox en la laguna son muy fluctuantes.

De igual manera, la conductividad, que está directamente relacionada al contenido de sales disueltas en el agua, aumenta de la mano con la profundidad. Los procesos de sedimentación y precipitación conllevan un aumento de las sales y sólidos disueltos cercanos a los sedimentos de la laguna, lo que explicaría el aumento de la conductividad en el fondo, sobre todo en los periodos de estratificación de la columna de agua, ya que, según los muestreos realizados, en los periodos de mezcla, la conductividad tiende a ser la misma a través de la columna de agua.

Un punto interesante a mencionar es la correlación negativa y significativa entre el pH y el oxígeno disuelto que presenta la Desembocadura del río Playayacu, ver Anexos (Tabla

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

V). Esta diferencia de correlaciones entre puntos es explicable mediante los resultados obtenidos durante las campañas de muestreo. El pH en la Desembocadura del río Playayacu demostró tener estabilidad entre 8,5 y 9. Los valores alcalinos altos son atribuibles a una baja tasa de descomposición anaerobia en el fondo de este punto de muestreo debido a la mezcla y oxigenación que genera el río afluente, lo que reduciría significativamente la producción de gas sulfhídrico y metano como productos de la descomposición de materia orgánica y fitoplancton precipitado.

Finalmente, los valores de correlación obtenidos en puntos como el Caño y Muelle, serán respaldados por el análisis de componentes principales.

Análisis de Componentes Principales (Parámetros fisicoquímicos medidos in situ)

Como se muestra en la Figura III, se realizó un diagrama de componentes principales de los parámetros fisicoquímicos medidos in situ en la laguna. Se utilizaron los dos primeros componentes principales donde el CP1 explicó el 79,27% de la variabilidad de los datos y el CP2 el 12,61%. Como se muestra en la Tabla I, las cargas factoriales positivas más significativas en el componente 1 corresponden al pH, eH, T y OD, mientras que la conductividad posee una carga factorial negativa muy alta. Esto evidencia una correlación negativa de la conductividad con respecto a los demás parámetros ya que la conductividad tiende a aumentar conforme aumenta la profundidad a diferencia del resto de variables. Por otro lado, el eH explica el mayor porcentaje de la variabilidad en el componente 2, ya que es el único parámetro con una carga factorial importante. Por su parte, el eH influye de gran manera en la conversión de fósforo unido a fósforo libre soluble (Haritash, Dutta, & Sharma, 2017).

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
 2015-2017

Tabla I. Cargas factoriales del ACP generado a partir de parámetros físicoquímicos medidos in-situ

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5
pH	0.95356	-0.23924	-0.11447	0.13508	0.046324
eH	0.69098	0.71799	0.076868	0.018062	0.028185
Temperatura	0.92324	-0.11092	0.35523	0.011804	-0.094805
Conductividad	-0.89567	-0.039968	0.43539	0.053376	0.061376
O2 disuelto	0.9604	-0.2097	0.12291	-0.10869	0.082104

Se puede observar que los parámetros que muestran mayor correlación entre sí, son la temperatura, el oxígeno disuelto y el potencial hidrógeno. El resultado es lógico debido a que, empezando desde la superficie de la laguna, y hacia el fondo, los tres parámetros disminuyen conforme aumenta la profundidad. Con respecto a la temperatura, ésta decrece, puesto que el cuerpo hídrico muestra periodos de estratificación muy marcados, donde la zona fótica alcanza tan sólo unos cuantos centímetros puesto que la turbidez del agua es muy alta (Granizo, 2011), esto se demuestra con valores de transparencia Secchi muy pequeños.

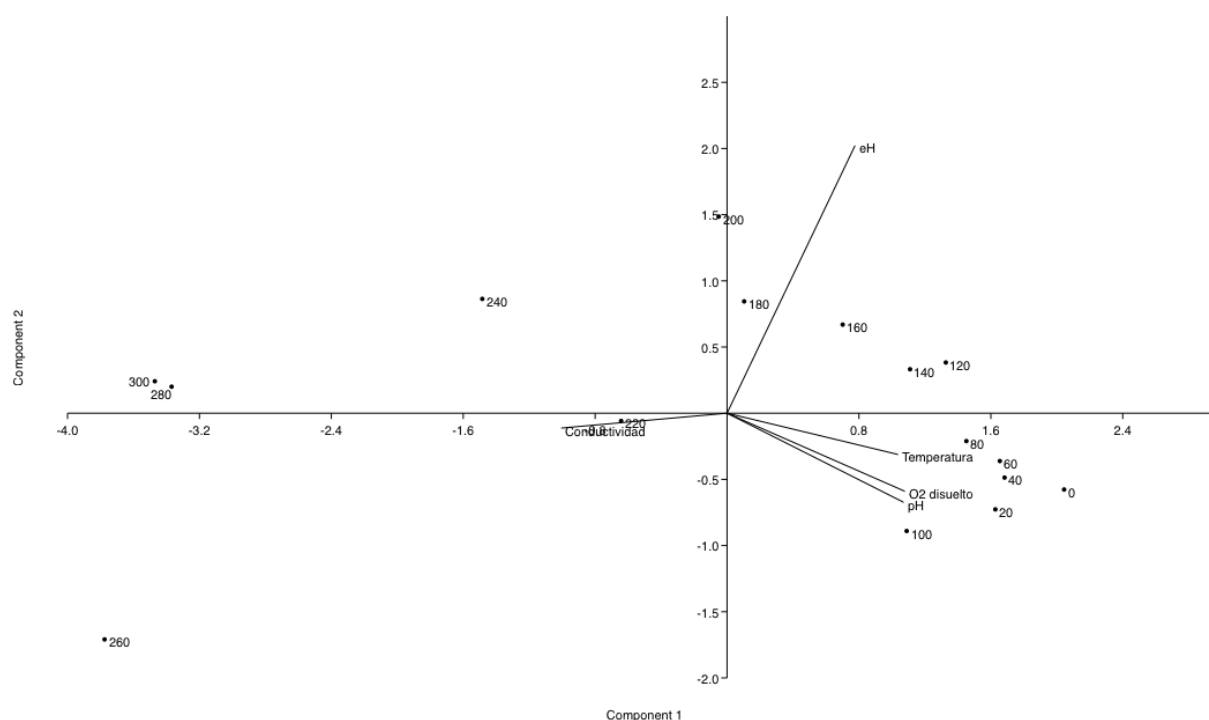
Continuando con el oxígeno disuelto, existe un decrecimiento notable conforme las mediciones se acercan al fondo. La actividad fotosintética del fitoplancton que tiene lugar en la superficie es muy elevada, lo que satura de oxígeno los perfiles superficiales, pero conforme aumenta la profundidad, la actividad de estos microorganismos disminuye, puesto que la penetración de la luz solar es menor (Ortiz, 2012). Adicionalmente, la zona béntica de la laguna ha resultado ser anóxica en la mayoría de las campañas de muestreo, donde gobiernan los procesos de reducción según lo demostrado por las mediciones de eH. La

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

escasa presencia de oxígeno en las profundidades puede deberse al poco oxígeno restante que es consumido por bacterias para descomponer materia orgánica (Hernández, 2015).

Finalmente, el pH en la zona superficial se mostraba frecuentemente en formas alcalinas cercanas a 9, pero disminuía en conjunto con la profundidad hasta llegar a valores neutros, e inclusive, valores ácidos. Este fenómeno puede explicarse de la siguiente manera: el CO_2 que se encuentra disuelto en el agua es rápidamente consumido por los microorganismos autótrofos para realizar fotosíntesis; las algas, en ausencia de este gas que confiere acidez al agua, recurren a la extracción de CO_2 de formas combinadas del carbono (HCO_3^- y CO_2^{-3}), de bicarbonato a carbonato, y de carbonato a iones hidroxilo, que confieren acidez al agua (Hernández, 2015). Conjuntamente, la descomposición anaerobia de materia orgánica que tiene lugar en las profundidades de la laguna propicia un medio ácido a través de la liberación de gases como el metano y el gas sulfhídrico (Arpi, 2004).

Figura III. Biplot. Diagrama de Componentes Principales generado a partir de parámetros fisicoquímicos medidos in-situ (CP1-CP2)



DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

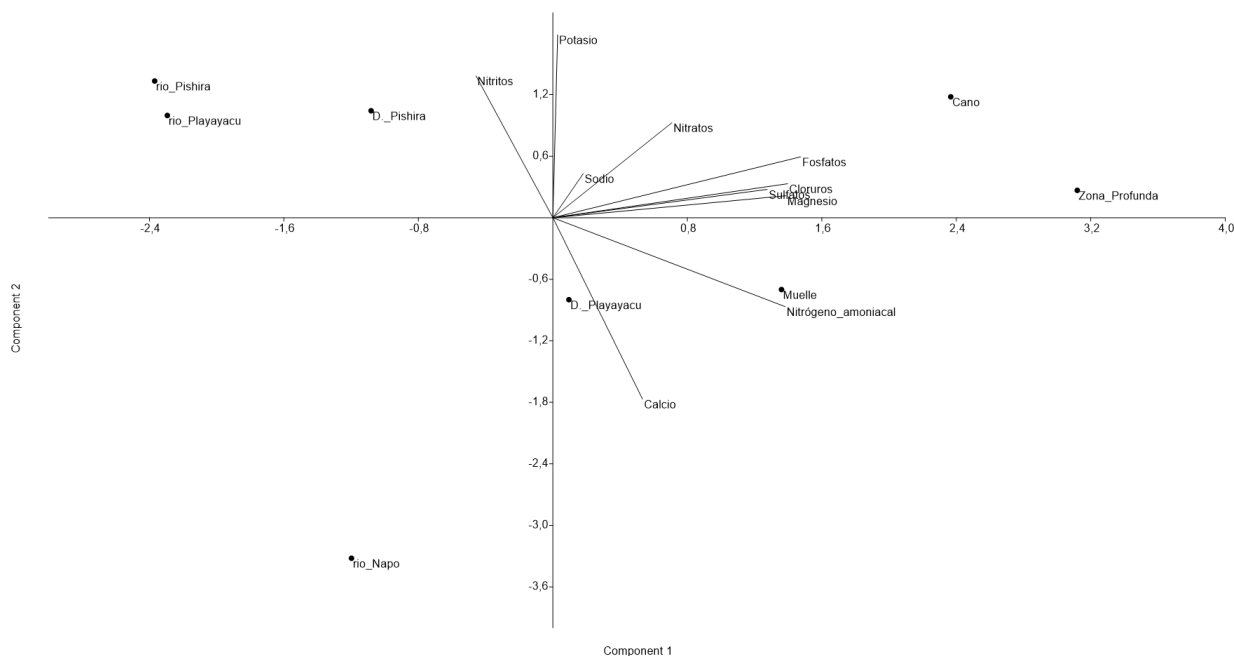
En cuanto a la agrupación correspondiente a las profundidades de 0 a 100 cm con los parámetros: T, OD y pH, es evidente que las mayores variaciones de dichos parámetros fisicoquímicos se dan en estos perfiles, mientras que de 120 a 200 cm se dan mayoritariamente los procesos de óxido-reducción, que de acuerdo a los datos obtenidos en las diferentes campañas de muestreo, son las condiciones de oxidación las que predominan en la superficie y profundidades medias. Sin embargo, la zona béntica ha demostrado, en su gran mayoría, tener condiciones reductoras, ver Anexo A (Tabla IV).

Análisis de Componentes Principales (Parámetros fisicoquímicos medidos ex situ)

Con respecto a la Figura IV, perteneciente al ACP de los parámetros fisicoquímicos medidos ex situ, se han seleccionado los primeros dos componentes que en conjunto explican el 68,78% de la varianza como se puede observar en la Tabla II. El componente 1 agrupa las variables Cl^- , PO_4^{3-} , NO_3^- , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , con cargas factoriales positivas representativas, a excepción del Na^+ , que debido a la corta longitud del vector que se proyectó con respecto a dicha variable, es claro que representa un muy bajo porcentaje de la varianza en dicho eje, ver Tabla III. El componente 1, al agrupar las variables anteriormente mencionadas, se puede relacionar con la concentración salina del agua de la laguna. Además, dicho componente agrupa dos iones que son representativos de este estudio como son el NO_3^- y PO_4^{3-} , que al poseer pesos factoriales representativos, indican que, en efecto, son iones contaminantes que se buscaba, expliquen la varianza del quimismo del agua en la laguna. Sin embargo, esta afirmación es tan sólo válida al poseer valores obtenidos por los análisis en laboratorios de las muestras recogidas en la laguna.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

Figura IV. Biplot. Diagrama de Componentes Principales generado a partir de iones mayoritarios (CP1-CP2)



Al componente 1 se le otorgó el nombre de Componente de sales debido a los iones con pesos significativos en él. El ion cloruro puede proceder de agua lluvia y su concentración en el terreno. Sin embargo, los vertidos urbanos e industriales pueden aportar cantidades importantes.

El ion fosfato, a pesar de ser un ion minoritario, es de gran importancia para esta investigación. Este anión contiene pocas sales solubles y en general se precipita como fosfato de calcio $(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$. Se hidroliza con facilidad y contribuye a la alcalinidad del agua. Además, la presencia de calcio limita su contenido y el CO_2 disuelto lo favorece (Custodio & Llamas, 1996). El pH regula en gran parte la disponibilidad de este ion en sistemas acuáticos. Condiciones ácidas y/o reductoras pueden favorecer la resolubilización de fosfato, haciendo que el cuerpo de agua tienda a la eutrofización. Además, el fosfato acumulado en los sedimentos de la laguna puede ser liberado al hipolimnion bajo las mismas condiciones

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

(Haritash, Dutta, & Sharma, 2017). A estas condiciones se las encuentra frecuentemente en el fondo de la laguna de Limonocha, ver Anexo A (Tabla IV).

El ion nitrato, al ser una sal muy soluble es de muy difícil precipitación. Tiene tendencia a ser estable, inclusive en medios reductores, puede convertirse en N_2 o NH_4^+ y en pocas ocasiones a NO_2^- . Concentraciones elevadas de este anión en agua de bebida pueden causar cianosis en los niños (Custodio & Llamas, 1996), por lo que no se debería beber agua de la laguna de Limoncocha.

El ion magnesio puede proceder de disolución de dolomías y calizas dolomíticas, ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos, y contaminación industrial y minera, donde se descarta la proveniencia de la última industria puesto que no existe actividad minera en la RBL (Custodio & Llamas, 1996).

La procedencia del ion sodio para este caso se podría atribuir a la concentración de este catión que trae consigo el agua lluvia como también a la contaminación urbana e industrial, pero sin descartar localmente la disolución de sal gema o sulfato sódico natural (sales evaporitas) (Custodio & Llamas, 1996).

El ion sulfato es una sal moderadamente soluble. En medios reductores con mucha materia orgánica, puede sufrir una reducción bacteriana a S o S^{2-} . Asimismo, en cantidades elevadas, puede ser perjudicial para la flora. (Custodio & Llamas, 1996).

Por otro lado, en lo que respecta a diferenciación y/o agrupamiento de sistemas hídricos, en primera instancia se puede observar que los ríos Pishira y Playayacu se agrupan debido a que poseen características similares al ser ríos poco profundos y con concentraciones de iones parientes, pero alejados de las altas concentraciones de iones mayoritarios que posee la laguna de Limoncocha al funcionar como un sistema acumulador. De igual forma, se observa al río Napo como un sistema independiente el cual posee un grado de contaminación

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

mayor con respecto a los otros dos ríos de estudio, dicha afirmación se la puede realizar con base en los análisis hechos en laboratorio, ver Anexo A (Tabla IV).

Por otra parte, se observa una asociación del nitrógeno amoniacal al punto Muelle. Además de la urea contenida en las aguas residuales domésticas que son descargadas en la laguna, existe evidencia de gente que orina cerca de este punto de muestreo, hecho que genera un mayor aporte de urea directo, ya que la orina humana posee alrededor de un 3% de urea como contenido en sólidos. La urea es convertida a nitrógeno amoniacal por hidrólisis. A su vez, la hidrólisis de la urea se suscita en mayores proporciones en un medio alcalino que oscila en un pH de 8,2 a 9. Además, dicho proceso aumenta el pH del medio. Es importante mencionar que el amoníaco se encuentra en equilibrio con el ion amonio, como se presenta en la siguiente ecuación: $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$. Por lo tanto, cuando el pH es ácido, el equilibrio tiende a mantenerse a la derecha, en presencia del ion amonio, mientras que cuando el pH es alcalino, como el predominante en la laguna de Limoncocha, el equilibrio tiende a la izquierda, por lo que predomina el amoníaco. La presencia de amoníaco se puede interpretar como un indicio de contaminación reciente. En general, la edad de un agua residual puede ser extraída a través de la medición de amoníaco presente (Fernández, Garrido, Coda, Pujol, & Coma, 2008).

Tabla II. Porcentaje de la varianza que explica cada eje (componente)

PC	Eigenvalue	% variance
1	4,38122	43,812
2	2,49705	24,97
3	1,54684	15,468
4	1,06098	10,61
5	0,387491	3,8749
6	0,119716	1,1972
7	0,0067071	0,067071

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
 2015-2017

Tabla III. Cargas factoriales del ACP generado a partir de parámetros fisicoquímicos medidos ex situ

	CP1	CP2	CP3
Fosfatos	0,4526	0,1824	0,04318
Nitratos	0,2175	0,2846	-0,1031
Nitritos	-0,1405	0,4249	-0,2767
N. amoniacal	0,4243	-0,2662	0,02352
Sulfatos	0,3915	0,08489	-0,3934
Calcio	0,1637	-0,5429	0,2087
Magnesio	0,4255	0,06588	0,07678
Potasio	0,0087	0,5478	0,3402
Sodio	0,05552	0,1323	0,7683
Cloruros	0,4288	0,1019	-0,01026

Índice de Estado Trófico e Índice de Estado Trófico modificado

Observando la Figura V, que presenta variaciones temporales de acuerdo a lo propuesto por Carlson (1977), la laguna de Limoncocha se clasifica como eutrófica. En contraste, la Figura VI se generó a partir del índice de estado trófico modificado donde se manifiestan fluctuaciones del estado de la laguna que van de la eutrofia a la meso-eutrofia y viceversa. Es oportuno mencionar que al inicio de las campañas de muestreo, los puntos Caño, Muelle y Zona profunda, según el (IETm), fueron zonas meso-eutróficas, pasando a ser eutróficas en los meses consecutivos. El aumento en la turbidez puede deberse a descargas de sólidos suspendidos, volátiles o sedimentables, o a la formación de sistemas coloidales o sustancias complejas (López & Madroño, 2015). Asimismo, si las condiciones de muestreo se dieron después de un periodo lluvioso, la disminución en la transparencia del agua también podría ser consecuencia de la interferencia de sólidos suspendidos fijos (inorgánicos) (Pena,

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

Ferreira, & Almeida, 2004). Sin embargo, en el inicio de la investigación, aquellos puntos que empezaron siendo eutróficos, fueron las desembocaduras de los ríos Pishira y Playayacu.

Figura V. Índice de Estado Trófico (Evolución temporal)

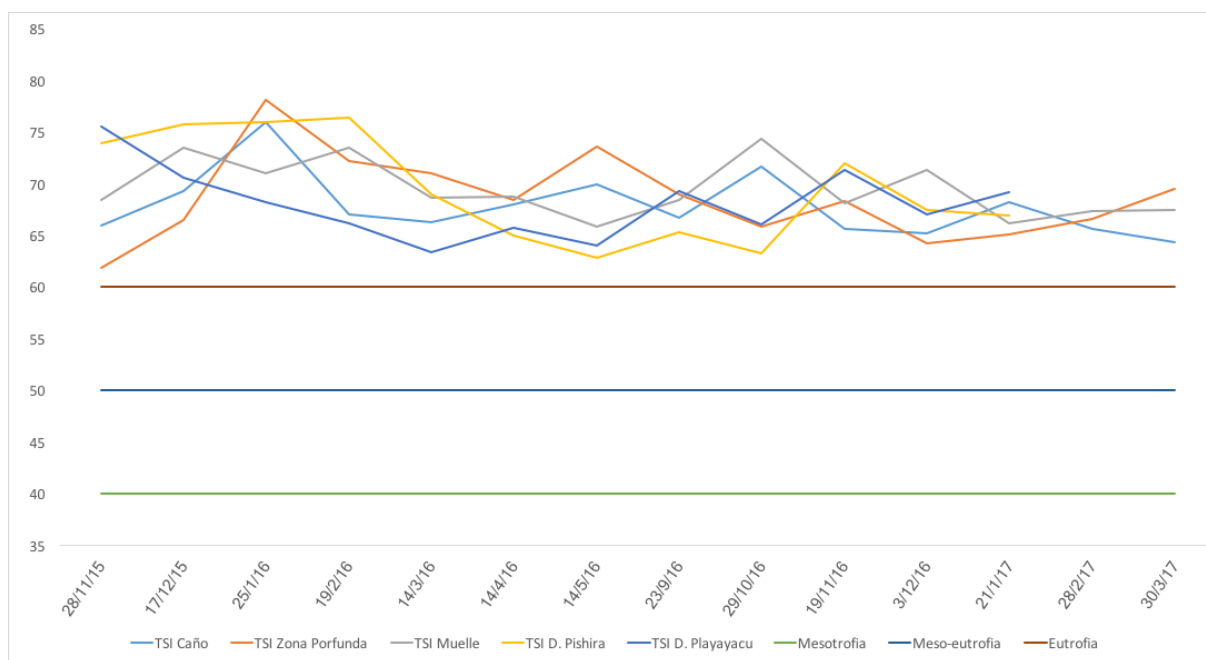
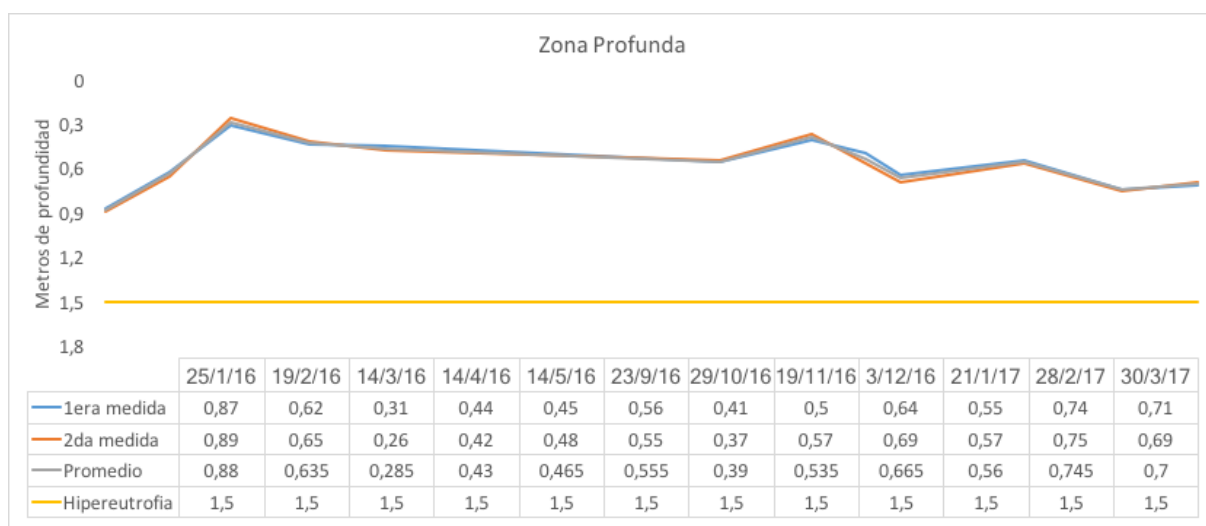


Figura VI. Índice de Estado Trófico modificado (Evolución temporal)



DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

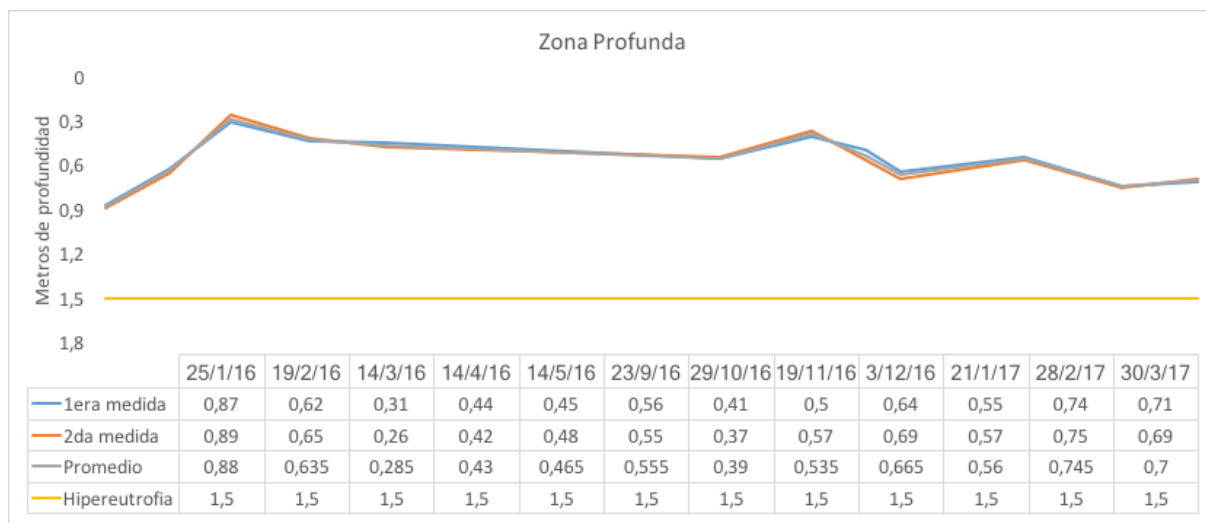
Clasificación de estado trófico propuesto por la OCDE

Se toma al punto de muestreo Zona Profunda puesto que es una zona que tiene un comportamiento como laguna debido a que carece de flujos de aporte o descarga a diferencia del resto de puntos de muestreo en la laguna de Limoncocha. El resultado que arroja la herramienta que creó el Comité de Eutrofización de la Organización, Cooperación y Desarrollo Económico de aguas interiores, podría estar un poco alejado de la realidad, ya que contrasta mucho con los resultados obtenidos del Índice de Estado Trófico modificado por Toledo Jr. en 1985, índice que fue adecuado para cuerpos hídricos de zonas tropicales. La clasificación de la OCDE, coloca a la laguna de Limoncocha como un cuerpo de agua en un estado extremadamente deteriorado de hipereutrofia. La interpretación de este gráfico entrega una perspectiva muy preocupante. La laguna de Limoncocha estaría próxima a sufrir el proceso natural de conversión de los humedales de ser un ecosistema acuático a un ecosistema terrestre. Sin embargo, cabe aclarar que la clasificación de la OCDE se generó como resultado de un estudio de lagos ubicados en zonas mucho más frías que la RBL, donde la irradiación solar junto con la temperatura no son factores igual de fuertes para la reproducción de fitoplancton, y por ende una excesiva producción primaria (Jenkins, 2013).

Pese a los esfuerzos del comité de eutrofización de la Organización, Cooperación y Desarrollo Económico de aguas interiores por crear un lenguaje común a través del cual puedan clasificarse los niveles productivos de lagos y embalses mediante la medición de fósforo total, clorofila a y transparencia de la columna de agua medida con el disco Secchi, las tablas fijadas para dicho efecto son mucho más adecuadas para zonas templadas, y en bajo porcentaje para cuerpos de agua de zonas sub-tropicales (Jenkins, 2013). Sin embargo, el presente estudio utiliza la herramienta que proporciona dicha organización para tener varias clasificaciones para apoyar la aceptación o rechazo de la hipótesis planteada.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

Figura VII. Clasificación de estado trófico propuesta por la OCDE



Clasificación de estado trófico propuesto por Thienemann

Una de las primeras clasificaciones de estados tróficos es la realizada por Thienemann en su lugar de estudio de preferencia que fue la región Báltica. Principalmente compuesta por países nórdicos, donde las condiciones climáticas son muy diferentes a las de la presente área de estudio. Como ya se ha escogido antes, la Zona Profunda de la laguna de Limoncocha puede ofrecer resultados contundentes. Para principios de las campañas de muestreo, es decir, en noviembre del 2015, la clasificación de Thienemann basada en perfiles de profundidad de columna de agua, temperatura y oxígeno disuelto, clasifica a la laguna como un cuerpo de agua oligotrófico. Al contrario, en la fecha final de las campañas de muestreo, la Zona Profunda se muestra como un punto eutrófico, a la vez representando las condiciones en la laguna como un todo. Sin embargo, esta clasificación no ampara estados tróficos intermedios, por lo que sería más adecuado escoger un estado de meso-eutrofia, acorde con lo arrojado por el Índice de Estado Trófico modificado.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

Figura XII. Clasificación de Thienemann – inicio de muestreo

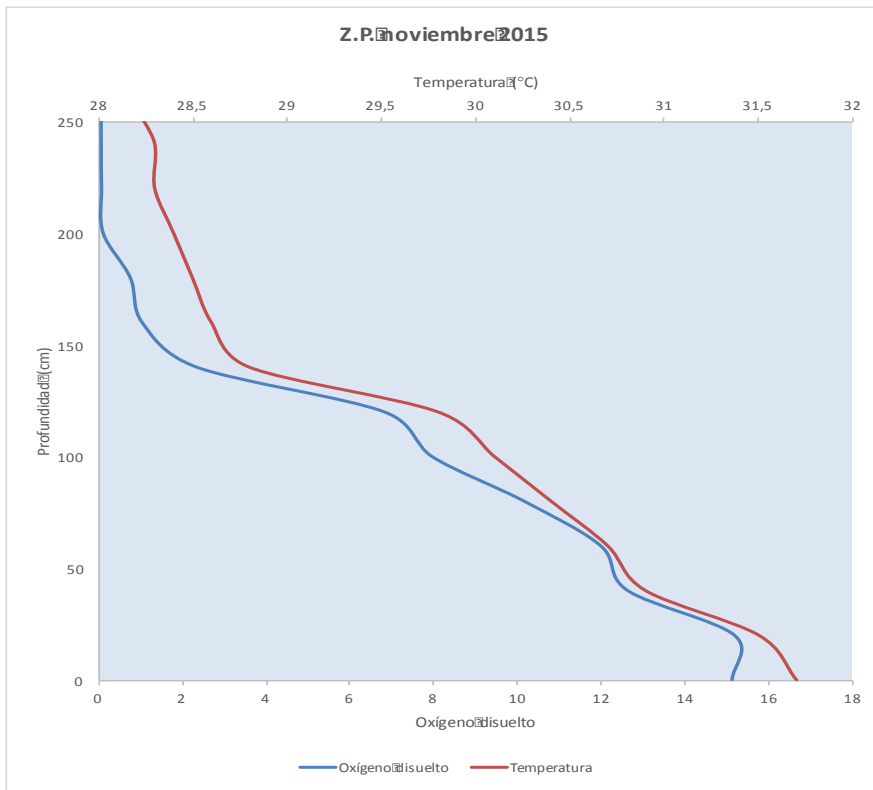
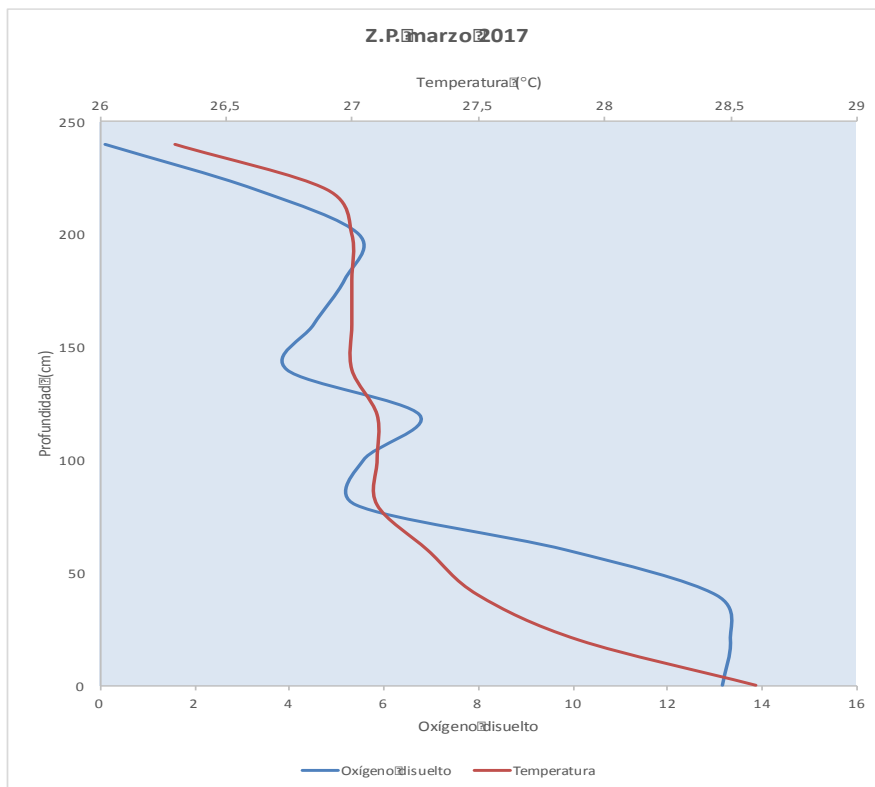


Figura XIII. Clasificación de Thienemann – final de muestreo



DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

Análisis de las concentraciones de fosfatos en época lluviosa

Las mediciones meteorológicas en la Estación Científica Limoncocha, operada por la Universidad Internacional SEK, se implementaron a partir de abril del 2016. A pesar de que la presente investigación inició en noviembre del 2015, es posible realizar un análisis con base en la precipitación y nutrientes de interés. Para este caso, los fosfatos arrojaron interesantes resultados. Como se puede observar en el Anexo A (Tabla VIII) los meses más lluviosos en la laguna de Limoncocha y sus alrededores fueron abril, mayo, junio y diciembre, de los cuales, sólo resultan útiles los primeros dos meses mencionados ya que en los demás meses no fue posible realizar muestreos.

Una vez filtrada la matriz de ordenamiento de datos obtenidos producto del análisis en laboratorio de las muestras recogidas, para así obtener los mayores valores de fosfatos registrados, se pudo extraer una pequeña matriz donde se evidencian niveles de fosfatos del orden de 1 a 5 mg/L (Anexo A – Tabla IX), valores extremadamente altos, sin olvidar que lagunas tropicales de poca profundidad tienen una fuerte tendencia a poseer altas concentraciones de sales (nutrientes), estos valores son mucho más altos que los propuestos por Vásquez, Ariza & Pinilla (2009). Es importante mencionar que dichos valores ocurren en los meses de mayor precipitación. Esto puede ser explicado por un arrastre de material alóctono en los ríos que desembocan en la laguna, como también por un arrastre del mismo material desde las orillas de la laguna (Contreras, Castañeda, Torres-Alvarado, & Gutiérrez, 1996). Por otro lado, existen mayores concentraciones de fosfatos registradas, pertenecientes a diciembre del 2015, enero, febrero, marzo y septiembre del 2016.

Para los primeros cuatro meses mencionados, se registraron los mayores descensos del nivel de agua de la laguna, lo cual se comprobaba con mediciones desde un punto fijo, que fue el muelle que existe para las pequeñas embarcaciones. Las altas concentraciones de fosfatos registradas en dichos meses, donde la fuerte radiación solar jugó un papel

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

fundamental en la evaporación de importantes cantidades de agua de la laguna, hizo que la columna de agua disminuyera significativamente; tanto así, que el aumento de las concentraciones de fosfatos se puede atribuir, en ausencia de producción de escorrentía debido a la falta de lluvia, a los procesos de regeneración de nutrientes, que son llevados a cabo en la interface sedimento-agua a través de actividades bacterianas, donde existe un relación muy estrecha entre el suministro de materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes (Contreras, Castañeda, Torres-Alvarado, & Gutiérrez, 1996). A esto se suma al factor de disposición constante de aguas contaminadas a la laguna, que, al haber tenido un menor volumen de agua, hubo un menor fenómeno de dilución, lo que ocasiona mayores concentraciones.

Las macrófitas flotantes en la laguna de Limoncocha

Este grupo de plantas es muy diverso. En la laguna de Limoncocha se pueden hallar en cantidades exorbitantes de lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) y en menores proporciones el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*). Estas plantas flotantes son utilizadas en la actualidad para el tratamiento de aguas residuales a través de la construcción de humedales artificiales. Entre las funciones positivas de las macrófitas flotantes, destacan su habilidad para asimilar nutrientes, además de crear condiciones favorables para la descomposición de materia orgánica (Martelo & Lara, 2012). De la misma manera, son plantas conocidas por su eficacia en la remoción de varias sustancias orgánicas, nutrientes y metales pesados (Sandoval, Celis, & Junod, 2005). Para ello, emplean una gama de procesos de fito-remediación como: fitoextracción, fitoestabilización, fitovolatilización, fitotransformación, fitodegradación y fitoestimulación, como también la rizofiltración (Sandoval, Celis, & Junod, 2005) (Frers, 2008) (Rahman & Hasegawa, 2011).

Por otro lado, la extracción de contaminantes a través de macrófitas flotantes se efectúa por tres mecanismos. En primer lugar, la filtración y sedimentación de sólidos. En

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

segundo lugar, la incorporación de nutrientes al tejido de las plantas, por lo que se deben cosechar frecuentemente (Martelo & Lara, 2012). En tercer lugar, la degradación de materia orgánica que tiene lugar en las raíces de las plantas debido a que existen microorganismos en ellas que se encargan de dicha labor (Brix, 1997). Por otra parte, los exudados de las raíces, generalmente ácidos orgánicos de bajo peso molecular, carbohidratos y enzimas, favorecen la biodisponibilidad de algunos contaminantes, lo que incrementa su degradación (Rodríguez, 2009) (Haritash, Dutta, & Sharma, 2017).

La laguna de Limoncocha actualmente presenta una cantidad gigantesca de macrófitas flotantes, lo que también genera una desventaja. El tener el espejo de agua cubierto casi en su totalidad por estas plantas limita significativamente el intercambio de gases entre la atmósfera y la columna de agua. Esto disminuye sustancialmente el oxígeno que puede ingresar al agua. Los bajos niveles de oxígeno en el agua restringen la eliminación microbiana aerobia de algunos compuestos. No obstante, la ausencia de oxígeno, acompañada de una pobre penetración de luz solar, reduce elocuentemente la cantidad de algas (fitoplancton), organismos que son indicadores de un avanzado estado trófico en un cuerpo de agua (Martelo & Lara, 2012). Consiguientemente, la periodicidad de la remoción de las macrófitas flotantes en cualquier sistema en el que se empleen, asegura un equilibrio para las condiciones anteriormente mencionadas.

Conclusiones

El ACP permitió identificar los parámetros que tienen mayor incidencia sobre la condición química del agua (Vásquez, Ariza, & Pinilla, 2009). Asimismo, mediante el ACP se logró analizar la variabilidad total de la calidad del agua y asociar las variables medidas temporalmente. De la misma manera, se identificaron tendencias generales y relaciones entre las variables por medio de la construcción de ejes artificiales que permitieron proyectar las

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

observaciones y las variables simultáneamente en un mismo plano. Por último, a través del ACP se observó la interdependencia de variables y se creó una representación gráfica óptima de la variabilidad de los datos (Ledesma, Bonansea, Rodríguez, & Sánchez, 2013).

Las diferencias existentes entre el índice de estado trófico propuesto por Carlson y el índice de estado trófico modificado planteado por Toledo Jr. son muy significativas. El primer índice colocó a la laguna de Limoncocha en un estado eutrófico a lo largo de todo el periodo de investigación. El segundo índice muestra fluctuaciones entre un estado de meso-eutrofia y eutrofia; algo muy importante en términos de la urgencia de gestión y acciones que son necesarias para desacelerar la conversión de este humedal en un ecosistema terrestre. Sin embargo, esto no quiere decir que la gestión que se debe dar a la laguna y/o a los afluentes que favorecen la eutrofia en la laguna puede esperar. Los resultados expuestos en el presente estudio son una muestra real de que existe un problema crítico de acumulación de sales, que en concentraciones excesivas son contaminantes. Dichas sales son mayoritariamente conocidas como nutrientes.

Haritash, Dutta & Sharma (2017) aseguran que la pesca periódica y la recolección constante de plantas macrófitas en un cuerpo de agua bajo restauración resulta en una exportación de nutrientes. Sin embargo, si dichas plantas mueren y se descomponen in situ, esto llevará a una recirculación de nutrientes en el agua. Por lo que las altas concentraciones de fosfato encontradas, se pueden deber, en parte, a la constante recirculación.

Recomendaciones

Con el fin de reducir los costes de investigación para una adecuada gestión de la laguna, el estudio de la misma debería enfocarse en los iones que explicaron la mayor variabilidad del quimismo del agua a través del análisis de componentes principales. Esta reducción en el presupuesto puede ser aprovechada en un estudio de factibilidad técnica y

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

económica para la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales para la Estación Científica operada por la UISEK, la misma que descarga sus aguas contaminadas en la laguna sujeta a estudio.

Por otra parte, se debe considerar una recolección periódica de la macrófita flotante *Pistia stratiotes* en la laguna de Limoncocha con el fin de exportar nutrientes. En conjunto con dicha acción, se debería evaluar el comportamiento del ion fosfato al realizar este procedimiento. Al mismo tiempo, esta planta puede ser aprovechada como materia prima para compostaje como una opción económica de disposición (Haritash, Dutta, & Sharma, 2017).

Una solución óptima sería rellenar con grava tramos de fácil acceso en los ríos Pishira y Playayacu, y sembrar plantas macrófitas emergentes en este nuevo tipo de sedimento, a fin de conformar un substrato óptimo para el crecimiento de microorganismos, donde existirían condiciones de oxidación para la descomposición de materia orgánica. Igualmente, esto resultaría en una translocación de fósforo disponible contenido en el agua hacia los tejidos de las plantas (Haritash, Dutta, & Sharma, 2017).

Referencias

- Armas, M. F., & Lasso, S. (Diciembre de 2011). SUIA. Recuperado el 13 de Marzo de 2017, de Ministerio del Ambiente:
<http://suia.ambiente.gob.ec/documents/783967/890928/Plan+de+manejo+de+la+Reserva+Limoncocha.pdf/bf9eb887-e71f-4d35-bb0a-019fc8ac9432>
- Arpi, J. (Septiembre de 2004). Evaluación del contenido de fósforo en la laguna de Limoncocha y su relación con el estado trófico.
- Carlson, R. E. (1977). *Limnology and Oceanography* (Vol. 22). Minneapolis: Limnological Research Center, University of Minnesota.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
2015-2017

- Carrera, J. (2014). Comportamiento Hídrico de la Laguna de Limoncocha y su Relación con el Río Napo. Quito: Universidad Internacional SEK.
- Contreras, F., Castañeda, O., Torres-Alvarado, R., Gutiérrez, M. (1996). Nutrientes en 39 lagunas costeras mexicanas. *Rev. BioL. Trop.* 44(2), 417-425.
- Cruz-Pizarro, L., de Vicente, E., Moreno-Ostos, V., & Amores, K. E. (2003). Estudio de diagnóstico y viabilidad en el control de la eutrofización de las lagunas de la Albufera de Adra. Instituto del Agua, 135-154.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1996). Hidrología subterránea (Vol. 1). Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- Fernández, E., Garrido, J., Coda, F., Pujol, R., & Coma, S. (Enero-Febrero de 2008). Técnica Industrial España. Recuperado el 22 de Junio de 2017, de Eliminación del nitrógeno amoniacal en aguas residuales urbanas:
<http://www.tecnicaindustrial.es/TIAdmin/Numeros/33/40/a40.pdf>
- Frers, C. (2008). El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. *Observatorio Medioambiental*, 11(224), 301-305.
- GADPRL. (2015). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Shushufindi, Sucumbíos, Ecuador: Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural Limoncocha.
- Goyenola, G. (Junio de 2007). Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos. Obtenido de
http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/2-eutrofizacion.pdf
- Granizo, F. (2011). El estado trófico de la laguna de Limoncocha en el periodo (febrero 2010-enero 2011). Quito: Universidad Internacional SEK.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
2015-2017

- Helena, B. et al. (2000). Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga river, Spain) by principal components analysis. *Water research*, 3(34), p. 807-816.
- Haritash, A., Dutta, S., & Sharma, A. (2017). Phosphate uptake and translocation in a tropical Canna-based constructed wetland. *Ecological Processes*, 6(12), 1-7.
- Hernández, P. (2015). Variaciones Fisicoquímicas Temporales en la laguna de Limoncocha, en el periodo 2012-2013. Quito: Universidad Internacional SEK.
- Instituto Geográfico Militar. (2017). Recuperado el 12 de Junio de 2017, de Geportal IGM: <http://www.geoportalmgm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso/>.
- Jenkins, S. (2013). Eutrophication of Deep Lakes: Proceedings of a Seminar held in Gjøvic, Norway, June 1978 (Vol. II). New York: Elsevier.
- Lavie, E., Salatino, S., Bermejillo, A., Morábito, J., & Filippini, M. (2009). Contaminación por fosfatos en el oasis bajo riego del río Mendoza. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 1(42), 169-184.
- Ledesma, C., Bonansea, M., Rodríguez, C., & Sánchez, A. (Julio de 2013). Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). *Revista Ciência Agronômica*, 44(3), 419-425.
- López, D. (2012). Aprovechamiento del lechuguín "Eichhornia Crassipes" para la generación de abono orgánico mediante la utilización de tres diseños diferentes de biodigestores. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- López, M., & Madroñero, S. (2015). Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: caso laguna de La Cocha. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, II(25), 21-42.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
2015-2017

- MAE. (2015). Ministerio del Ambiente. Recuperado el 13 de Enero de 2017, de Sistema Nacional de Áreas Protegidas: <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/es/areas-protegidas/reserva-biol%C3%B3gica-limoncocha>
- Manzano, M., Borja, F., & Montes, C. (2002). Metodología de tipificación hidrológica de los humedales españoles con vistas a su valoración funcional y a su gestión. Aplicación a los humedales de Doñana. *Boletín Geológico y Minero*, 3(113), 313-330.
- Martelo, J., & Lara, J. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 221-243.
- Mazzeo, N., Clemente, J., García-Rodríguez, F., Gorga, J., Kruk, C., Larrea, D., . . . Scasso, F. (s.f.). Eutrofización: Causas, consecuencias y manejo. Grupo de Ecología y Rehabilitación de Sistemas Acuáticos Someros, 40-55. Obtenido de <http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/pasantias/eutrofizacion.pdf>
- Moreno, D., Quintero, J., & López, A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco.
- NRCS. (1995). Wetlands. Recuperado el 14 de Marzo de 2017, de ProQuest ebrary: <http://site.ebrary.com/bibliotecavirtual.udla.edu.ec/lib/udlateca/reader.action?docID=10055330>
- OCDE. (1982). Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, Cooperative Programmers on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control). Paris: Environment Directorate.
- Ordóñez, C. (2013). Caracterización Geoquímica de sedimentos de la Laguna de Limoncocha. Quito, Ecuador.
- Ortiz, J. (2012). Estado trófico de la laguna de Limoncocha en base a los índices de Carlson y Lacat. Quito: Universidad Internacional SEK.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
2015-2017

- Pena, L., Ferreira, C., & Almeida, M. (2004). Comportamento dos índices do estado trófico de Carlson (IET) e modificado (IETm) no reservatório de UHE Luís Eduardo Magalhães, Tocantins - Brasil. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Pérez-Castillo, A. G., & Rodríguez, A. (Diciembre de 2009). Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. *Revista de Biología tropical* , 56(4).
- Plummer, P. D. (2005). *Geochemistry and the understanding of ground-water systems*. Reston, USA: Springer.
- Rahman, M., & Hasegawa, H. (2011). Aquatic arsenic: Phytoremediation using floating macrophytes. *Chemosphere*, 85(5), 636-646.
- Reddy, K., Kadlec, R., Flaig, E., & Gale, P. (1999). Phosphorus Retention in streams and wetlands: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1(29), 83-146.
- Sandoval M. Celis J., Junod J. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria*, 14(17–25), 224-237.
- Santos, K., & Florencio, L. (2001). Aplicação de Modelo Simplificado para Avaliação do Estado Trófico no Reservatório de Duas Unas. Congreso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (21).
- Standard Methods. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*. Washington D.C.
- Vásquez, C., Ariza, A., & Pinilla, G. (2009). Descripción del estado trófico de diez humedales del altiplano cundiboyacense. Bogotá: Red Universitas Scientiarum.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology*. Elsevier.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
 2015-2017

Anexo A - Tablas

Tabla IV. Ejemplo de matriz de parámetros medidos in-situ

Punto de muestreo	Fecha	Profundidad	pH	eH	T	Conductividad	O₂ D.
Caño	28/2/17	0	7,38	321,9	28,5	122,8	7,7
Caño	28/2/17	20	7,28	327,3	28,5	122,7	6,96
Caño	28/2/17	40	7,25	332,6	28,6	122,8	7,02
Caño	28/2/17	60	7,25	336,3	28,6	122,8	6,6
Caño	28/2/17	80	7,27	339,4	28,6	122,7	6,72
Caño	28/2/17	100	7,22	340,8	28,6	122,6	6,69
Caño	28/2/17	120	7,21	345,6	28,6	122,4	6,8
Caño	28/2/17	140	7,19	356,9	28,6	122,3	5,87
Caño	28/2/17	160	7,02	362	28,6	122	4,84
Caño	28/2/17	180	7,12	364,7	28,6	121,6	3,64
Caño	28/2/17	200	7,03	369	28,6	118,9	1,62
Zona Profunda	28/2/17	0	7,46	289,5	29,4	133,3	7,11
Zona Profunda	28/2/17	20	7,46	290,1	29,3	133,3	7,05
Zona Profunda	28/2/17	40	7,51	295,8	29,3	133,1	7,01
Zona Profunda	28/2/17	60	7,48	306,6	29,2	133,1	6,93
Zona Profunda	28/2/17	80	7,5	308,7	29	132,9	6,96
Zona Profunda	28/2/17	100	7,55	314,1	29	133	6,86
Zona Profunda	28/2/17	120	7,54	317,1	29	133,1	6,66
Zona Profunda	28/2/17	140	7,48	319,3	29	134	6,92
Zona Profunda	28/2/17	160	7,52	338,3	29	135,3	7,27
Zona Profunda	28/2/17	180	7,52	335,5	29	139,4	7,07
Zona Profunda	28/2/17	200	7,54	300	29	139,3	5,23
Zona Profunda	28/2/17	220	7,38	-138,4	29	142,5	1,05
Zona Profunda	28/2/17	240	7,33	-142,2	29	444	0,26
Zona Profunda	28/2/17	260	6,98	-144	29	445	0,01
Muelle	28/2/17	0	7,61	287,1	29,6	128	2,67
Muelle	28/2/17	20	7,5	298,3	29,6	127,8	2,56
Muelle	28/2/17	40	7,46	305,6	29,6	127,7	2,36
Muelle	28/2/17	60	7,35	304,2	29,6	127,6	2,32
Muelle	28/2/17	80	7,36	310	29,6	127,3	2,28
Muelle	28/2/17	100	7,33	310,6	29,5	127,1	2,21
Muelle	28/2/17	120	7,27	211,6	29,4	126,8	1,77
Muelle	28/2/17	140	7,21	99,4	29,3	126,8	1,43
Muelle	28/2/17	160	6,98	-104,8	28,5	126,5	0,51
Muelle	28/2/17	180	6,95	-105,6	27,5	102,5	0,02
Muelle	28/2/17	200	6,94	-105,8	27,5	272	0
D.Pishira	28/2/17	0	7,71	284,9	25,5	135,1	8,4
D.Pishira	28/2/17	20	7,65	300,9	25,6	133,9	8,37
D.Pishira	28/2/17	40	7,47	295	25,6	132,3	3,88
D.Pishira	28/2/17	60	7,42	283,3	25,7	122,7	0,76
D.Playayacu	28/2/17	0	7,85	218,9	25,7	134,5	5,63

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
 2015-2017

D.Playayacu	28/2/17	20	7,64	329,9	25,7	134,4	5,5
D.Playayacu	28/2/17	40	7,61	330,8	25,7	134,2	5,45
D.Playayacu	28/2/17	60	7,53	333	25,7	134,4	5,44
D.Playayacu	28/2/17	80	7,48	334,1	25,7	135,2	5,35
D.Playayacu	28/2/17	100	7,36	334,1	25,7	134,5	5,11
Río Pishira	28/2/17	0	7,69	265,3	28,1	115	6,51
Río Playayacu	28/2/17	0	7,42	309,9	25,8	117,7	5,82
Río Napo	28/2/17	0	7,87	278,2	25,3	74	7,22

Tabla V. Tabla de correlaciones de los parámetros medidos in-situ

Caño					
	pH	eH	T	Cond	O2
pH		0,058632	1,64E-05	5,46E-06	5,70E-08
eh	0,48206		0,017738	0,011849	0,037702
T	0,86344	0,58315		0,0042734	3,74E-08
Cond	-0,88429	-0,61142	-0,67301		0,00020461
O2	0,94101	0,52286	0,94454	-0,79907	
Zona Profunda					
	pH	eH	T	Cond	O2
pH		6,23E-06	9,29E-05	0,80277	1,11E-06
eh	0,86821		0,019372	0,64691	0,0083126
T	0,80621	0,5601		0,1567	6,06E-09
Cond	-0,065503	-0,11982	-0,35927		0,47356
O2	0,89653	0,61712	0,94939	-0,1865	
Muelle					
	pH	eH	T	Cond	O2
pH		2,66E-05	6,32E-08	0,060175	1,58E-05
eh	0,93363		0,00019421	0,021067	0,0066752
T	0,98294	0,89544		0,083711	7,77E-06
Cond	-0,58227	-0,68096	-0,54389		0,21337
O2	0,94098	0,75968	0,94977	-0,4076	
D. Pishira					
	pH	eH	T	Cond	O2
pH		0,29923	0,15652	0,51712	0,10848
eh	0,51189		0,89512	0,0010688	0,024109
T	0,65673	-0,070036		0,59567	0,8479
Cond	-0,33438	-0,97319	0,27661		0,071812
O2	0,71744	0,87039	0,10175	-0,77239	
D. Playayacu					
	pH	eH	T	Cond	O2
pH		0,15875	0,36323	0,1922	0,058693
eh	0,54901		0,0075953	0,0027573	0,0010649

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
 2015-2017

T	-0,37268	-0,84946		0,10601	0,007008
Cond	-0,51433	-0,89385	0,61312		0,014952
O2	-0,68911	-0,92328	0,8536	0,8093	

Tabla VI. Índices de Estado Trófico de Carlson (IET)

Punto				
Caño	1era medida	2da medida	Promedio	TSI
28/11/15	65	67	66	66
17/12/15	53	52	52,5	69
25/1/16	32	34	33	76
19/2/16	59	64	61,5	67
14/3/16	66	63	64,5	66
14/4/16	57	58	57,5	68
14/5/16	48	52	50	70
23/9/16	60	65	62,5	67
29/10/16	44	45	44,5	72
19/11/16	67	68	67,5	66
3/12/16	71	68	69,5	65
21/1/17	57	56	56,5	68
28/2/17	68	67	67,5	66
30/3/17	77	71	74	64

Punto				
Zona profunda	1era medida	2da medida	Promedio	TSI
28/11/15	87	89	88	62
17/12/15	62	65	63,5	67
25/1/16	31	26	28,5	78
19/2/16	44	42	43	72
14/3/16	45	48	46,5	71
14/4/16	56	55	55,5	68
14/5/16	41	37	39	74
23/9/16	50	57	53,5	69
29/10/16	64	69	66,5	66
19/11/16	55	57	56	68
3/12/16	74	75	74,5	64
21/1/17	71	69	70	65
28/2/17	62	64	63	67
30/3/17	53	50	51,5	70

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
 2015-2017

Punto				
Muelle	1era medida	2da medida	Promedio	TSI
28/11/15	56	55	55,5	68
17/12/15	39,5	39	39,25	73
25/1/16	48	45	46,5	71
19/2/16	39,5	39	39,25	73
14/3/16	57	53	55	69
14/4/16	53	56	54,5	69
14/5/16	66	67	66,5	66
23/9/16	53	58	55,5	68
29/10/16	35	39	37	74
19/11/16	57	57	57	68
3/12/16	47	44	45,5	71
21/1/17	68	62	65	66
28/2/17	59	61	60	67
30/3/17	60	59	59,5	67

Punto				
D.Pishira	1era medida	2da medida	Promedio	TSI
25/1/16	42	34	38	74
19/2/16	32	35	33,5	76
14/3/16	33	33	33	76
14/4/16	31	33	32	76
14/5/16	48	59	53,5	69
23/9/16	72	69	70,5	65
29/10/16	83	81	82	63
19/11/16	70	68	69	65
3/12/16	82	77	79,5	63
21/1/17	45	42	43,5	72
28/2/17	58	61	59,5	67
30/3/17	65	59	62	67

Punto				
D.Playayacu	1era medida	2da medida	Promedio	TSI
25/1/16	33	35	34	76
19/2/16	47	49	48	71
14/3/16	58	55	56,5	68
14/4/16	67	63	65	66
14/5/16	80	78	79	63
23/9/16	68	66	67	66
29/10/16	75	76	75,5	64

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO 2015-2017

19/11/16	51	54	52,5	69
3/12/16	68	63	65,5	66
21/1/17	47	44	45,5	71
28/2/17	59	64	61,5	67
30/3/17	51	55	53	69

Tabla VII. Índices de Estado Trófico de Carlson modificado (IETm)

Punto				
Caño	1era medida	2da medida	Promedio	TSIm
28/11/15	65	67	66	57
17/12/15	53	52	52,5	60
25/1/16	32	34	33	67
19/2/16	59	64	61,5	58
14/3/16	66	63	64,5	57
14/4/16	57	58	57,5	59
14/5/16	48	52	50	61
23/9/16	60	65	62,5	58
29/10/16	44	45	44,5	62
19/11/16	67	68	67,5	56
3/12/16	71	68	69,5	56
21/1/17	57	56	56,5	59
28/2/17	68	67	67,5	56
30/3/17	77	71	74	55

Punto				
Zona profunda	1era medida	2da medida	Promedio	TSIm
28/11/15	87	89	88	53
17/12/15	62	65	63,5	57
25/1/16	31	26	28,5	69
19/2/16	44	42	43	63
14/3/16	45	48	46,5	62
14/4/16	56	55	55,5	59
14/5/16	41	37	39	64
23/9/16	50	57	53,5	60
29/10/16	64	69	66,5	57
19/11/16	55	57	56	59
3/12/16	74	75	74,5	55
21/1/17	71	69	70	56
28/2/17	62	64	63	57

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
 2015-2017

30/3/17	53	50	51,5	60
---------	----	----	------	----

Punto				
Muelle	1era medida	2da medida	Promedio	TSIm
28/11/15	56	55	55,5	59
17/12/15	39,5	39	39,25	64
25/1/16	48	45	46,5	62
19/2/16	39,5	39	39,25	64
14/3/16	57	53	55	59
14/4/16	53	56	54,5	60
14/5/16	66	67	66,5	57
23/9/16	53	58	55,5	59
29/10/16	35	39	37	65
19/11/16	57	57	57	59
3/12/16	47	44	45,5	62
21/1/17	68	62	65	57
28/2/17	59	61	60	58
30/3/17	60	59	59,5	58

Punto				
D.Pishira	1era medida	2da medida	Promedio	TSIm
25/1/16	42	34	38	65
19/2/16	32	35	33,5	67
14/3/16	33	33	33	67
14/4/16	31	33	32	67
14/5/16	48	59	53,5	60
23/9/16	72	69	70,5	56
29/10/16	83	81	82	54
19/11/16	70	68	69	56
3/12/16	82	77	79,5	54
21/1/17	45	42	43,5	63
28/2/17	58	61	59,5	58
30/3/17	65	59	62	58

Punto				
D.Playayacu	1era medida	2da medida	Promedio	TSIm
25/1/16	33	35	34	66
19/2/16	47	49	48	61
14/3/16	58	55	56,5	59
14/4/16	67	63	65	57
14/5/16	80	78	79	54

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
 2015-2017

23/9/16	68	66	67	57
29/10/16	75	76	75,5	55
19/11/16	51	54	52,5	60
3/12/16	68	63	65,5	57
21/1/17	47	44	45,5	62
28/2/17	59	64	61,5	58
30/3/17	51	55	53	60

Tabla VIII. Datos meteorológicos - Estación científica Limoncocha - UISEK

Date	Time	Rain	Rate
28/4/16	10:00	4.83	31.2
28/4/16	11:00	15.24	45.0
2/5/16	15:00	4.83	65.0
4/5/16	18:00	6.10	22.9
4/5/16	17:00	4.32	27.4
11/5/16	15:00	8.89	46.7
14/5/16	08:00	5.84	10.2
17/5/16	07:00	8.13	17.3
17/5/16	11:00	5.08	21.3
17/5/16	08:00	29.21	133.1
18/5/16	01:00	6.35	86.6
18/5/16	05:00	6.10	53.6
20/5/16	11:00	6.86	153.9
20/5/16	12:00	15.75	142.0
22/5/16	05:00	8.38	57.2
24/5/16	14:00	8.89	106.7
24/5/16	11:00	4.32	43.9
25/5/16	10:00	6.86	32.5
25/5/16	11:00	6.60	23.9
25/5/16	07:00	5.59	11.7
25/5/16	12:00	4.32	10.9
28/5/16	15:00	11.68	100.8
29/5/16	02:00	4.83	15.0
29/5/16	11:00	10.41	24.6
31/5/16	13:00	4.57	116.1
31/5/16	14:00	11.68	62.2
2/6/16	04:00	7.11	33.3
2/6/16	13:00	5.59	39.1
16/12/16	08:00	7.87	8.9
16/12/16	09:00	7.11	8.1
16/12/16	10:00	6.60	7.6

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
 2015-2017

16/12/16	18:00	4.06	5.6
----------	-------	------	-----

Tabla IX. Concentraciones de Fosfatos en época lluviosa

Location	Sample_Date	Sample_Depth	Fosfatos
Caño	14/5/16	0	4,6
Caño	14/5/16	40	4,2
Caño	14/5/16	80	3,3
Caño	14/5/16	240	3,3
Zona Profunda	14/4/16	80	3,16
Caño	14/4/16	0	2,98
Zona Profunda	14/4/16	40	2,89
Caño	14/5/16	120	2,8
Muelle	14/5/16	120	2,7
Caño	14/4/16	120	2,67
Caño	14/4/16	160	2,57
Caño	14/4/16	80	2,44
Caño	14/4/16	200	2,44
Caño	14/4/16	240	2,44
Muelle	14/4/16	120	2,44
Zona Profunda	14/4/16	0	2,33
Caño	14/4/16	40	2,31
Zona Profunda	14/5/16	40	2,3
Muelle	14/4/16	80	2,26
Caño	14/5/16	200	2,2
Zona Profunda	14/4/16	120	2,11
Zona Profunda	14/4/16	200	2,11
Zona Profunda	14/5/16	0	2,1
Zona Profunda	14/5/16	160	2,1
Muelle	14/4/16	40	1,99
Caño	14/5/16	160	1,9
Muelle	14/4/16	0	1,88
Zona Profunda	14/4/16	160	1,86
Caño	14/5/16	280	1,8
Zona Profunda	14/5/16	120	1,4
Zona Profunda	14/5/16	240	1,1
Muelle	14/5/16	0	1,1
Zona Profunda	14/5/16	80	0,9
Zona Profunda	14/5/16	200	0,9
Muelle	14/5/16	40	0,9
Muelle	14/5/16	80	0,9

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA
 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PERFILES HIDROQUÍMICOS EN EL PERIODO
 2015-2017

Tabla X. Mayores valores de fosfatos registrados

Location	Sample_Date	Sample_Depth	Fosfatos
Zona Profunda	23/9/16	200	18,94
Caño	23/9/16	160	15,12
Zona Profunda	23/9/16	160	8,61
Zona Profunda	19/2/16	0	7,52
Caño	17/12/15	0	7,3
D. Pishira	23/9/16	80	7,25
Caño	14/3/16	40	7,17
Zona Profunda	19/2/16	80	7,1
Caño	14/3/16	160	6,78
Zona Profunda	19/2/16	40	6,31
Caño	25/1/16	0	6,24
Caño	14/3/16	120	6,11
Zona Profunda	17/12/15	0	6