



**ECUADOR** UNIVERSIDAD  
INTERNACIONAL  
**SEK**  
SER MEJORES

## **UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK**

### **FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AMBIENTALES MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL**

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**CALIBRACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA) PARA LA CUENCA  
HIDROGRÁFICA DEL RÍO PAUTE, REGIÓN SUR INTERANDINA DEL  
ECUADOR, BASADO EN EL ACUERDO MINISTERIAL 097-A/2015 DEL  
MINISTERIO DEL AMBIENTE (MAE)**

Realizado por:

**LENIN STALIN BAJAÑA ZAJIA**

Director del proyecto:

**EDUARDO ALEXIS LOBO ALCAYAGA Ph. D.**

Como requisito para la obtención del título de:  
**MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL**

Quito, 07 Noviembre de 2018



## DECLARACION JURAMENTADA

Yo, LENIN STALIN BAJAÑA ZAJIA, con cédula de identidad # 120574054-9, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a 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.



---

LENIN STALIN BAJAÑA ZAJIA  
C.I. 1205740549

## **DECLARATORIA**

El presente trabajo de investigación titulado:

**CALIBRACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA) PARA LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO PAUTE, REGIÓN SUR INTERANDINA DEL ECUADOR, BASADO EN EL ACUERDO MINISTERIAL 097-A/2015 DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE (MAE)**

Realizado por:

**LENIN STALIN BAJAÑA ZAJIA**

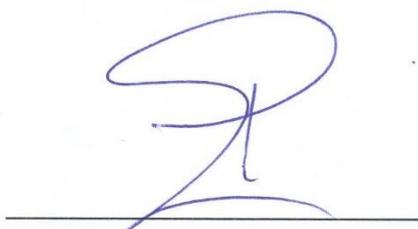
como Requisito para la Obtención del Título de:

**MAGISTER DE GESTIÓN AMBIENTAL**

Ha sido dirigido por el profesor

**EDUARDO ALEXIS LOBO ALCAYAGA Ph. D.**

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor



Eduardo Alexis Lobo Alcayaga Ph. D.

**DIRECTOR**

## **LOS PROFESORES INFORMANTES**

Los Profesores Informantes:

**MIGUEL MARTÍNEZ-FRESNEDA**

**MÓNICA SUSANA DELGADO YÁNEZ**

Después de revisar el trabajo presentado,

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador

  
Miguel Martínez-Fresneda

  
Mónica Delgado Yáñez

## DEDICATORIA

*“...Somos los herederos de lo mejor que nuestros padres hicieron con nosotros”,  
y precisamente esta investigación es el resultado de aquello, por eso quiero dedicarla:*

*A mi Papá por su ejemplo de rectitud, carácter y ética para vivir.*

*A mi Madre por sus libros que me ayudaron a mantener una  
narrativa interna para sostenerme cuando las cosas  
no salían como esperaba.*

*A mis hermanos Johnny, Christian y Alexander.*

*A mi Esposa y compañera de vida Arelis, por su amor y por cuidar  
de nuestra familia en esos días en los que no pude estar presente.*

*Domi hijita, está mi mejor manera de enseñarte que no hay límites,  
¡Donde hay voluntad, hay una manera para seguir adelante!*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A los Ingenieros Fabián Guacho y Chris Hannah por haberme permitido estudiar la Maestría y trabajar a la vez, gracias por todos los vuelos y permisos.*

*Al Profesor Dr. Eduardo Lobo, por haber creído en mi para desarrollar esta investigación, fue un honor haber sido dirigido por usted. Pero sobre todo, gracias por compartirme sus experiencias de vida junto a su señora Esposa, me enseñaron mucho más de lo yo esperaba aprender.*

*A las personas que con su dedicación y trabajo contribuyen a que el Convenio de Cooperación Interinstitucional entre UISEK – UNISC funcione: Michelle Montoya, Cristiana Mueller, Eveline Baier y André Maurer.*

*Quiero agradecer a Nubia, Patrik, Gustavo, Nilmar, Elías, Tiago por su amistad y ayuda durante mi periodo de investigación.*

*A los Profesores que hacen parte del Programa de Maestría en Gestión Ambiental de la UISEK.*

07/11/2018 10:00:00

Para someter a:  
To be submitted:

**“Calibración del Índice de Calidad del Agua (ICA) para la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador, basado en el Acuerdo Ministerial 097-A/2015 del Ministerio del Ambiente (MAE)”**

Lenin Stalin Bajaña Zajia<sup>1</sup> & Eduardo Alexis Lobo Alcayaga<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito, Ecuador. Email: [lenin\\_b@live.com](mailto:lenin_b@live.com)

<sup>2</sup> Universidad de Santa Cruz do Sul (UNISC), RS, Brasil. Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito, Ecuador. Email: [lobo@unisc.br](mailto:lobo@unisc.br)

**AUTOR DE RESPONSABILIDAD PRINCIPAL:** Lenin Stalin Bajaña Zajia

**AUTOR DE CORRESPONDENCIA:** Eduardo Alexis Lobo Alcayaga Ph.D.

**AUTOR APORTANTE DE RESPONSABILIDAD UNO:** Miguel Martínez-Fresneda Ph.D, Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales. Quito, Ecuador.

**AUTOR APORTANTE DE RESPONSABILIDAD DOS:** Mónica Delgado Yáñez M.Sc., Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales. Quito, Ecuador.

**Título corto o Running title:** Calibración del Índice de Calidad del Agua (ICA) para el Ecuador.

## RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo calibrar por primera vez en el Ecuador un Índice de Calidad de Agua (ICA) que explique el comportamiento de las variables que generan enriquecimiento de nutrientes y condicionan la utilización del recurso hídrico en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, en la Región Sur Interandina, teniendo como base el Acuerdo Ministerial 097-A para determinar cuáles son los usos que puede recibir el agua en función de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Para el muestreo se tomaron los registros de monitoreo de agua generados por la Unidad de Negocios Hidropaute – CELEC EP durante la serie temporal 2012 - 2017, distribuidos en 11 estaciones (P1 – P11) a lo largo del río Paute que abastece a los embalses Mazar y Amaluza. Para el análisis descriptivo y determinación del grado de eutrofía se utilizó el programa estadístico PAST; para comparar los valores promedios de las variables estudiadas en la serie temporal se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis ( $\alpha = 5\%$ ); para la clasificación y el ordenamiento de los datos se aplicó el método de la variancia mínima y el Análisis de Componentes principales (PCA) respectivamente. La clasificación de la calidad del agua fue evaluada aplicando el (ICA) desarrollado por Brown *et al.* (1970) para los Estados Unidos y el ICA calibrado por Moretto *et al.* (2012) para el Brasil y los cálculos fueron realizados utilizando el Software IQADData. Los resultados indicaron un gradiente de eutrofización correlacionado positivamente con fosfato ( $r = 0,75$ ) y  $\text{DBO}_5$  ( $r = 0,72$ ), donde la concentración de fosfato total fue de  $0,73 \pm 1,51 \text{ mgL}^{-1}$  (Coeficiente de Variación,  $\text{CV} = 207,0\%$ ), clasificando las aguas de la cuenca como hipereutróficas. Por lo tanto, los usos atribuibles a esta condición son la irrigación y producción de energía, conforme la clasificación propuesta por Thornton & Rast (1994). También se evidenció que hay diferencias significativas entre los valores promedios del ICA ( $p < 0,05$ ) siendo menor el valor promedio del ICA Brasil, condición que lo caracteriza como más restrictivo, constituyéndose en una herramienta eficiente para el monitoreo de ecosistemas acuáticos en la Región Sur Interandina. Además, ante la ausencia de criterios para calificar el uso del agua en función de las concentraciones de fosfato total, se concluye que los usos sugeridos pueden ser incorporados al Acuerdo Ministerial 097-A, condición que contribuirá a aumentar el desempeño de programas de monitoreo ambiental en Ecuador, considerando la importancia del parámetro fosfato como indicador ambiental del grado de eutrofización de ambientes lacustres.

**Palabras claves:** Eutrofización, Fosfato total, Usos del agua, Índice de Calidad del Agua (ICA), Acuerdo Ministerial 097-A, Cuenca del Río Paute, Ecuador.

## ABSTRACT

The objective of the research was to calibrate for the first time in Ecuador a Water Quality Index (WQI) that explains the behavior of the variables that generate nutrient enrichment and conditions the use of the water resource in the Paute River Hydrographic Basin, at Andean South Region, based on Ministerial Agreement 097-A to determine the uses that water can receive in function of physical, chemical and microbiological parameters. For the sampling the water monitoring records generated by the Hidropaute Business Unit - CELEC EP were taken during the time series 2012 - 2017 distributed in 11 stations (P1 - P11) along the Paute river that supplies the Mazar and Amaluza reservoirs. For the descriptive analysis and determination of the degree of eutrophy, the PAST statistical program was used; To compare the average values of the variables studied in the time series, the Kruskal-Wallis test was applied ( $\alpha = 5\%$ ); for the classification and ordering of the data, the minimum variance method and the Principal Components Analysis (PCA) were applied, respectively. The classification of water quality was evaluated by applying the (WQI) developed by Brown *et al.* (1970) for the United States and the ICA calibrated by Moretto *et al.* (2012) for Brazil, and the calculations were made using the IQADData Software. The results indicated a positively correlated eutrophication gradient with phosphate ( $r = 0,75$ ) and BOD<sub>5</sub> ( $r = 0,72$ ) where the total phosphate concentration was  $0,73 \pm 1,51 \text{ mgL}^{-1}$  (Coefficient of Variation, CV = 207,0%), classifying waters of the basin as hypereutrophic. Therefore, the uses attributable to this condition are irrigation and energy production, according to the classification proposed by Thornton & Rast (1994). It was also evidenced that there are significant differences between the average values of the WQI ( $p < 0,05$ ), being lower the average value of the WQI Brazil, a condition that characterizes it as more restrictive, constituting an efficient tool for the monitoring of aquatic ecosystems in the Andean South Region. In addition, in the absence of criteria to qualify the use of water based on total phosphate concentrations, it is concluded that the suggested uses can be incorporated into Ministerial Agreement 097-A, a condition that will contribute to increase the performance of environmental monitoring programs in Ecuador, considering the importance of the phosphate parameter as an environmental indicator of the degree of eutrophication of lacustrine environments.

Key Words: Eutrophication, Total Phosphate, Water Uses, Water Quality Index (ICA), Ministerial Agreement 097-A, Paute River Basin, Ecuador.

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los elementos indispensables para el desarrollo de la vida y el entorno natural, así como también es un componente básico empleado en los procesos industriales (Rivas *et al.*, 2011), además de ser una sustancia imprescindible para la vida, convirtiéndose en uno de los recursos más apreciados en el planeta (Arcos, 2005).

En este contexto, las fuentes de agua superficial son eje de desarrollo de los seres humanos que permiten el abastecimiento para las diferentes actividades socioeconómicas llevadas a cabo en los asentamientos poblacionales; no obstante, de forma paradójica muchas de estas actividades causan alteración y deterioro de las mismas (Torres *et al.*, 2009); Por lo que las acciones humanas sobre las cuencas hidrográficas y las fuentes hídricas condicionan los procesos naturales en los ríos afectando el régimen de caudal de la corriente, la calidad del agua y los ecosistemas (Castro *et al.*, 2006).

Torres *et al.* (2009) menciona que las aguas superficiales están sometidas a contaminación natural (arrastre de material particulado y disuelto y presencia de materia orgánica natural) y de origen antrópico: descargas de aguas residuales domésticas, escorrentía agrícola, efluentes de procesos industriales, entre otros. Motivos por los cuales una de las actividades más importantes para la gestión del recurso hídrico es el monitoreo periódico de los cuerpos de agua, para permitir la detección temprana de cambios en la calidad del recurso (Castro *et al.*, 2014).

Tanto los sistemas hídricos lóticos (ríos, quebradas, manantiales) como los leníticos (lagos, estanques, embalses) y las zonas estuarinas, sufren procesos de eutrofización cuando sus aguas se enriquecen en nutrientes. El problema radica en que, si hay exceso de nutrientes, crecen en abundancia algas, plantas y otros organismos (Vásquez *et al.*, 2012).

Sin embargo, la cuantificación de la carga contaminante que aporta a un cuerpo de agua es un elemento fundamental, ya que a través del análisis integrado entre los datos de calidad del agua y las características de uso y ocupación del suelo en una cuenca hidrográfica, junto con la distribución de la población urbana y la disponibilidad de infraestructura urbana e industrial, se hace posible definir relaciones de causa y efecto entre las condiciones de ocupación de la cuenca y la calidad del agua (Zimmermann *et al.*, 2008).

En ese sentido, un Índice de Calidad del Agua (ICA) consiste básicamente en una expresión simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros, los cuales sirven como medida de calidad del agua. El índice puede ser representado por un número, rango, descripción verbal, símbolo o color (Fernández y Solano, 2005).

El ICA desarrollado por Brown *et al.* (1970), sugiere el empleo de ecuaciones de tipo multiplicativo ya que son más sensibles que las ecuaciones de tipo aditivo o suma ponderada a valores extremos en los subíndices, asociados generalmente con fuertes variaciones en la calidad del agua, evitando el fenómeno de eclipsamiento que se presenta cuando se calcula un valor satisfactorio, aunque el subíndice no lo sea (Torres *et al.*, 2009). Su determinación requiere la medición de nueve parámetros: Coliformes Totales (CT), Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ), Turbidez (TU), Fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), Sólidos Totales Disueltos (SDT), Oxígeno Disuelto (OD), Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y Temperatura (T), las cuales son llevadas a una misma escala y agregadas aritméticamente mediante la asignación de pesos (Jiménez y Vélez, 2006).

Una de las herramientas que ha demostrado ser efectiva para modelar de forma más precisa el ICA son los métodos de análisis multivariantes, un conjunto de técnicas de análisis de datos que permiten al investigador testar la utilidad conjunta de los datos que se emplean en la explicación de fenómenos de interés analíticos, como el bienestar social o la calidad ambiental. Por ejemplo, el Análisis de Componentes Principales (ACP) es un tipo de transformación lineal aplicada a un conjunto de datos multivariantes habitualmente correlacionados entre sí (Bedoya *et al.*, 2017), siendo una de sus utilidades la calibración de datos multivariados para el análisis previo para revelar anomalías y datos atípicos “outliers” (Escobar, 2008). Los actuales medios computacionales permiten, mediante la resolución de las ecuaciones que representan el fenómeno físico, generar simulaciones que proporcionan, una vez calibradas y validadas, fidedignas representaciones de la realidad (López, 2003).

En el Ecuador, no hay una normativa expresa para el cálculo del ICA, sin embargo, la Ley de Gestión Ambiental en su Art. 33 establece como instrumentos de aplicación: parámetros de calidad ambiental, normas de efluentes y emisiones, entre otros. En concordancia, el Ministerio del Ambiente mediante Acuerdo Ministerial No. 097-A, publicado en el Registro Oficial N°

387 (MAE, 2015) expide los Anexos al Texto Unificado de Legislación Secundaria (TULSMA), donde en el Art. 1 se establecen las «Normas de Calidad Ambiental y de descarga de Efluentes del Recurso Agua», incluyéndose los criterios de calidad para los distintos usos de las aguas superficiales: consumo humano y uso doméstico, preservación de la vida acuática y silvestre, uso agrícola o de riego, uso pecuario, uso recreativo y uso estético.

## 2. PROBLEMA

El desarrollo de la energía hidráulica como cita Bauer (2009) ha sido potenciado alrededor del mundo, entre otras razones, a partir de una preocupación creciente respecto al cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de carbono, dado a que construir represas para producir electricidad conlleva transformar las áreas donde se instalan o influyen; se trata de una reconfiguración territorial.

Aguilar (2010), en su estudio «Calidad del Agua, un enfoque multidisciplinario», menciona que el uso del agua impone numerosas modificaciones a la morfología de los ríos, tales como la construcción de presas y canales de riego, por lo que, desde un punto de vista integral, definir la calidad del agua significa ir más allá de sus atributos fisicoquímicos o biológicos. Sin embargo, el monitoreo no es sólo hacer mediciones; se reconoce cada vez más que los datos deben estar disponibles y ser procesados (Peña *et al.*, 2009).

Conceptualmente, la calidad del agua se refiere a las características de un suministro de agua que influirá en su idoneidad para un uso específico. Es decir que la calidad se define por ciertas características físicas, químicas y biológicas (Ayers, 1985); de esta forma el Índice de Calidad del Agua (ICA) desarrollado por Brown *et al.* (1970) fue concebido con base a las características de los ríos norteamericanos. Las variables que involucra y los pesos que se asigna a cada una de las características corresponden a la problemática específica de contaminación.

Se puede deducir entonces, que la evaluación general de la calidad del agua no siempre garantiza el resultado esperado para regiones con diferentes características. Como consecuencia, muchos países han desarrollado estudios e indicadores tendientes a aplicar criterios de evaluación propios, de tal manera que su aplicabilidad corresponda con sus requerimientos y necesidades (López *et al.*, 2015; Espinal *et al.*, 2013; Ledesma *et al.*, 2013; Moretto *et al.*, 2012; Torres, 2009; Escobar, 2008; Behar, 1997; Zimmermann, 2008).

Esta diferencia se debe a que en el ICA sugerido por Brown *et al.* (1970) los pesos asignados a parámetros como el Fosfato ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) y Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), por ejemplo, son relativamente menores al que deberían tener tomando en cuenta que, entre los problemas ambientales de lagos y embalses, la eutrofización es uno de los más frecuentes problemas ambientales causado,

principalmente, por el enriquecimiento de estos nutrientes (Ledesma *et al.*, 2013).

En todos los casos lo más importante es poder definir las variables más significativas para caracterizar el problema; en esta instancia el análisis multivariado es una técnica de utilidad ya que permite la reducción de dimensión, pudiendo describir y analizar observaciones multidimensionales y así comprender la relación entre variables evaluadas simultáneamente sobre una misma unidad, como también comparaciones, agrupaciones y/o clasificaciones de observaciones.

Considerando que el objeto de la calibración es asegurar la valía del modelo como herramienta de toma de decisiones (López, 2003), el problema a estudiar busca evaluar tendencias temporales y espaciales en la calidad del agua a partir de la calibración de un Índice de Calidad del Agua (ICA) apropiado, capaz de ajustar el peso de las variables para reflejar con mejor precisión la realidad de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador.

### 3. HIPÓTESIS

Considerando que la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador que abastece a los embalses Mazar y Amaluza, se encuentra ubicada en la zona austral, está caracterizada por dos zonas pluviométricas marcadas, la mitad occidental de cuenca corresponde al régimen interandino, con periodos más lluviosos de marzo a mayo, mientras que la parte oriental de cuenca corresponde al régimen oriental siendo la estación más húmeda de abril a septiembre, la calibración del Índice de Calidad del Agua (ICA), originalmente desarrollado por Brown *et al.*, (1970) para los Estados Unidos, irá a alterar los pesos de importancia de las variables que componen el índice, adaptándolos a las condiciones climáticas que caracterizan la región, constituyéndose en una herramienta eficiente para monitorear sistemas acuáticos tropicales.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. Objetivo General**

- Calibrar el Índice de Calidad del Agua (ICA) para la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador, basado en el Acuerdo Ministerial 097-A/2015 del Ministerio del Ambiente (MAE, 2015)

### **4.2. Objetivos Específicos**

- Calibrar el Índice de Calidad del Agua (ICA) basado en los datos físicos, químicos y bacteriológicos del agua obtenidos durante las campañas de monitoreo del 2012 al 2017 en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute que abastece a los embalses de Mazar y Amaluza en la Región Sur Interandina del Ecuador.
- Evaluar la calidad del agua en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute que abastece a los embalses de Mazar y Amaluza durante las campañas de monitoreo del 2012 al 2017, mediante el ICA calibrado basado en el Acuerdo Ministerial 097 – A del Ministerio del Ambiente (MAE, 2015).
- Aportar al desarrollo científico y tecnológico del país demostrando la aplicabilidad del Índice de Calidad del Agua (ICA), debidamente calibrado en los programas de vigilancia ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute que abastece a los embalses de Mazar y Amaluza.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Área de estudio

La Cuenca Hidrográfica del Río Paute (Fig. 1) se encuentra localizada en la Región del Austral de Ecuador (Centro Sur), ubicada entre las Cordilleras Oriental (límite este) y Occidental de los Andes (límite oeste); y entre los Nudos de Curiquingue (límite norte) y de Portete (límite sur) cubriendo una superficie aproximada de 6439 km<sup>2</sup> definida hasta su confluencia con el Río Upano, representando el 2,5% con relación al territorio nacional y abarca una población de 600.000 habitantes. Latitudinalmente se localiza entre los paralelos 2° 15' y 3° 15' de latitud sur y longitudinalmente se ubica entre los meridianos 78° 30' y 7° 20' de latitud oeste (Cordero, 2013). El mayor potencial de esta cuenca es, precisamente, su capacidad de generación de agua; se considera una cuenca estratégica porque allí se asienta un sistema de generación hidroeléctrica vital para el país.

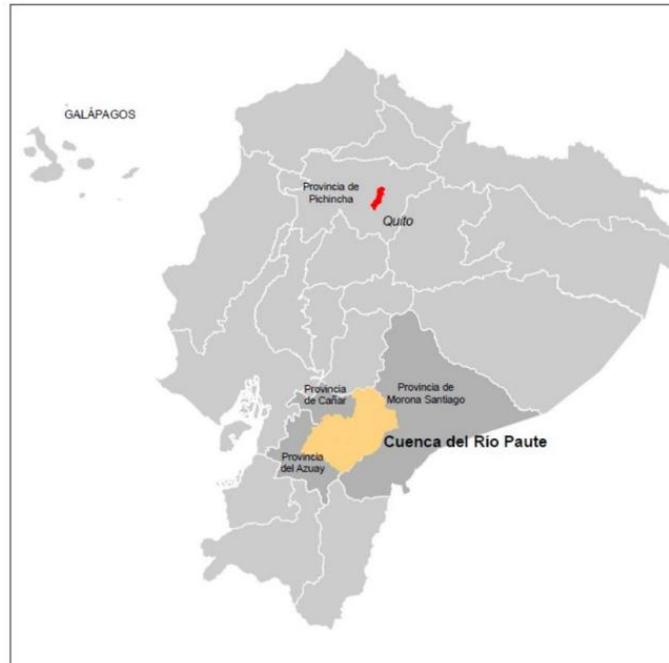
El área de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute es compartido por los territorios de tres provincias: Azuay (57%), Cañar (24%) y Morona Santiago (19%) (Tabla 1).

Tabla 1: Área por provincia perteneciente a la Cuenca Hidrográfica del Río Paute (Cordero, 2013).

Provincia	Superficie (Km <sup>2</sup> )	%	Cantones en el interior de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute
Azuay	3636,0	56,5	11 de 14
Cañar	1547,9	24,0	4 de 7
Morona Santiago	1255,2	19,5	6 de 10
TOTAL	6439,3	100	21

Su geografía se encuentra compartida entre los rangos de altura que empiezan desde la confluencia de los ríos Paute y Negro hasta los páramos del Parque Nacional “El Cajas”, caracterizándose de la siguiente manera:

Figura 1: Ubicación de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Ecuador (Plan Maestro de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute. Mapa 343-GEN-001)



- Cuenca baja: Esta parte de la cuenca del río Paute se desarrolla aproximadamente en altitudes comprendidas entre 500 y 2200 msnm, de clima meso-térmico húmedo con precipitaciones superiores a los 2000mm anuales, con temperatura media de 20°C y una humedad relativa de 91%. La vegetación predominante está constituida por bosque natural desarrollada en pendientes fuertes, los asentamientos y la agricultura son incipientes con cultivos en pequeñas áreas en especial en las vegas de los ríos. En esta zona se localiza el principal proyecto hidroeléctrico en cascada del país, actualmente con dos centrales de generación ubicadas en el sector de Guarumales (Central Molino) y en Mazar a pie de presa.
- Cuenca Media: Comprende el área entre los 2200 y 2600 msnm, de clima templado semi-húmedo con precipitaciones entre 500 y 1000 mm/año, temperatura media anual de 15 °C, humedad relativa 84%. En esta zona climática se localiza la ciudad de Cuenca y los principales asentamientos poblacionales. La actividad agrícola predominante constituida por pastos, caña de azúcar, frutales y cultivos de exportación como las flores en Paute.
- Cuenca Alta: Presenta un clima frío semi-húmedo con altitudes entre 2600 y 4600 msnm, con precipitaciones entre 1000 a 2000 mm/año, temperaturas medias de alrededor de 8°C, humedad relativa media 88%, vegetación típica de paramo, pajonales con cultivos de

cereales y hortalizas.

Las características climáticas son muy heterogéneas, por su morfología y ubicación geográfica, influenciada por varios factores meteorológicos como son: la presencia de masas de aire húmedo provenientes de la región amazónica que provocan lluvias durante todo el año en estas zonas (cuenca baja principalmente) la distribución de la lluvia es unimodal con máximas entre junio y agosto y mínimas desde noviembre hasta febrero. También las masas de aire provenientes del océano pacífico alcanza la parte más occidental de la cuenca (cuenca alta principalmente) con características de precipitación bimodal, con dos estaciones lluviosas en el año, la primera entre febrero y mayo, y la segunda entre octubre y noviembre.

La temperatura de la cuenca también es muy variable y depende primordialmente de la altitud y de la exposición. En la cuenca existe un gradiente térmico de alrededor de 0,6 °C por cada 100 m de altura. Así, la temperatura media en la cuenca alta, sobre los 3 000 msnm es menor a 12 °C, mientras que, en la cuenca media y baja, entre los 2 000 y 3 000 msnm, la temperatura promedio varía entre los 18 °C y 12 °C.

Respecto a la distribución de las lluvias, se distinguen al menos dos zonas pluviométricas homogéneas, las cuales presentan comportamientos diferentes entre sí; en la primera, las precipitaciones se incrementan con la altitud, mientras que, en la segunda, las precipitaciones decrecen con la altitud. Así la mitad occidental de la cuenca corresponde al régimen interandino con influencia del Pacífico, con los periodos más lluviosos de marzo a mayo; la parte oriental de la cuenca corresponde al régimen oriental, unimodal, siendo la estación más húmeda entre abril y septiembre (Cordero, 2013).

Las estaciones de muestreo de las cuales se utilizaron los datos de los análisis físicos, químicos y biológicos están distribuidas en dos cuerpos de agua localizados dentro de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute: El embalse “Mazar” (Fig. 2) perteneciente a la Central Hidroeléctrica del mismo nombre, con un volumen total de 410 hm<sup>3</sup> y con una longitud aproximada de 31 km y el embalse Amaluza (Fig. 3) perteneciente a la Central Hidroeléctrica “Molino”, que tiene una capacidad de almacenamiento de 120 hm<sup>3</sup>.

Las estaciones de muestreo que conducen hasta el Embalse Amaluzá están distribuidas de la siguiente manera: en la parte baja del Río Paute a una altitud de 1978 msnm se ubica el punto P1 al pie de la presa Amaluzá, el punto P2 está situado en el tramo medio-inferior, el punto P3 en el tramo medio-superior y el punto P4 se encuentra a 1987 msnm en el tramo superior del cauce (Tabla 2, Fig. 2).

Figura 2: Localización de las estaciones de muestreo en el Embalse Amaluzá ubicado en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute (Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, 2017).

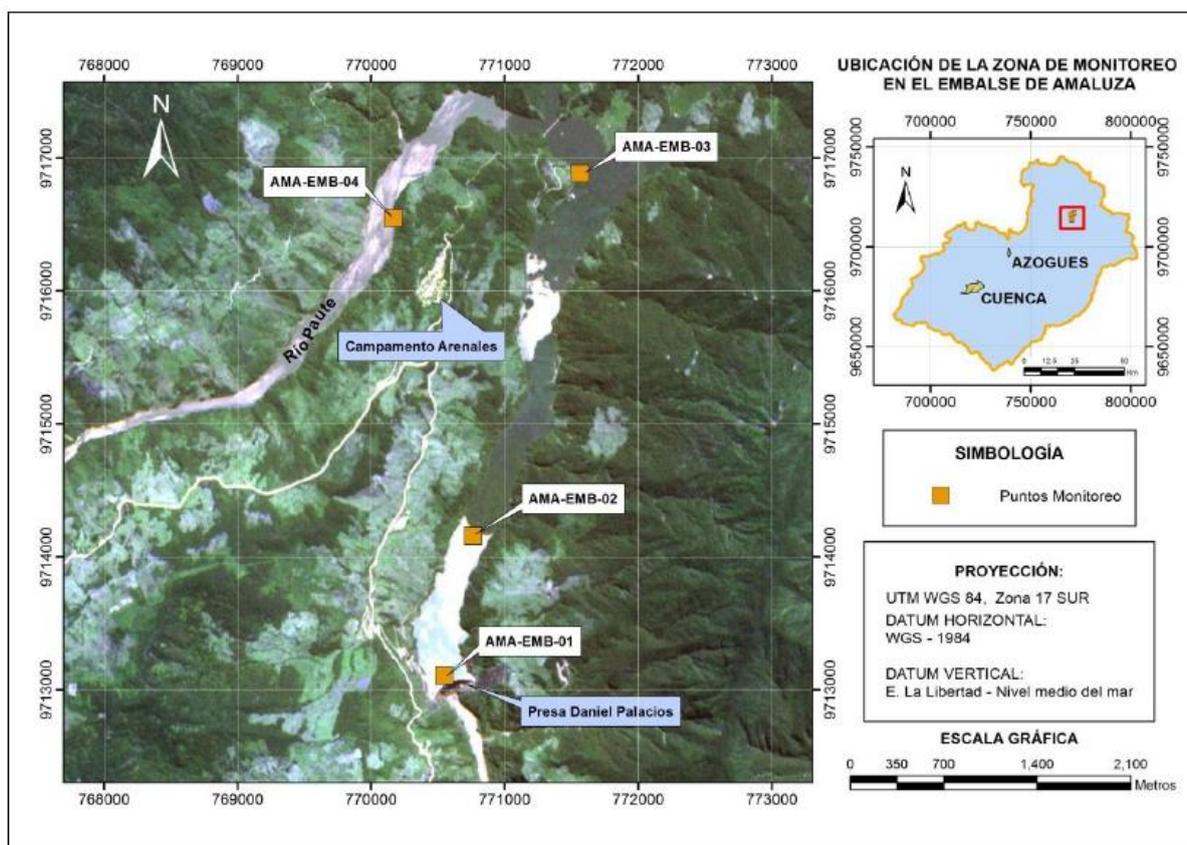
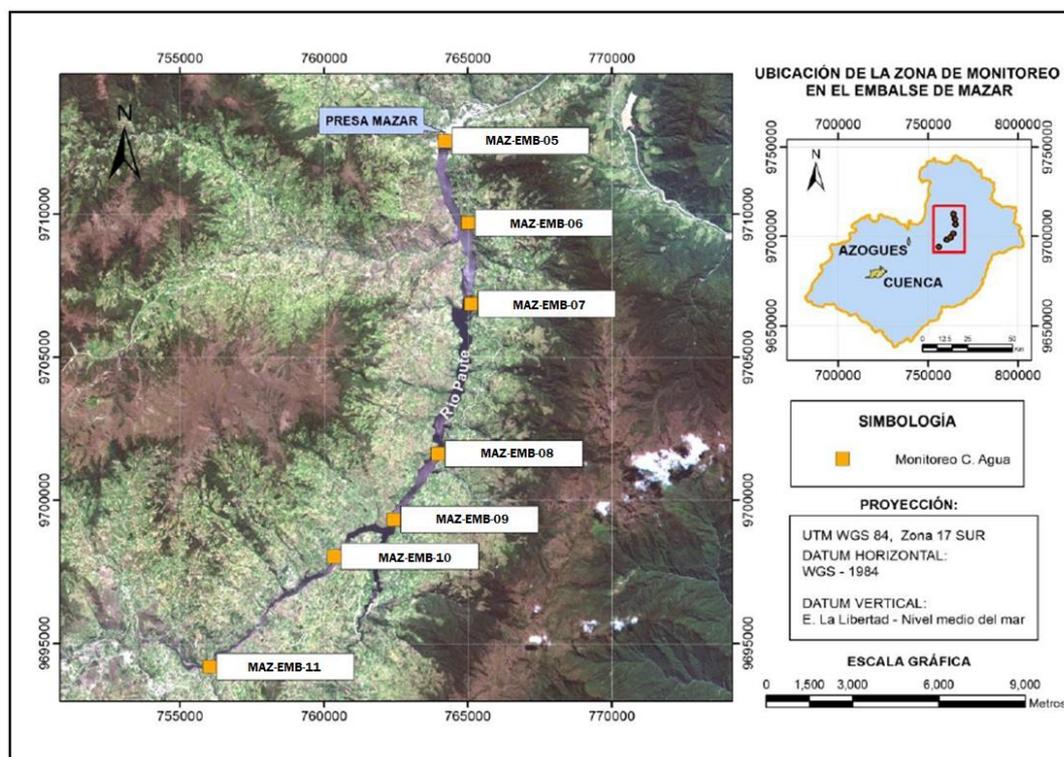


Tabla 2: Puntos de monitoreo embalse de Amaluzá - Río Paute (Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, 2017).

Código	Lugar	Tipo de muestra	Coordenadas UTM		
			Norte	Este	Altitud (msnm)
P1	Cercanía Sigales	Compuesta en área	770546	971309	1978
P2	Cercanía R. Juval	Compuesta en área	770759	974159	1994
P3	Límite lechugín cerca de pie de presa	Compuesta en área	771564	9716884	1979
P4	Pie de presa	Compuesta en área	770131	9716590	1987

Figura 3: Localización de las estaciones de muestreo en el Embalse Mazar ubicado en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute (Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, 2017).



Siguiendo el Río Paute están ubicadas las estaciones de colecta que conforman el Embalse Mazar, las cuales están distribuidas de la siguiente manera: el punto P5 se localiza a una altitud de 2053 msnm en el tramo inferior al pie de la presa Mazar, siguiendo el cauce aguas arriba se encuentran los puntos P6 y P7 en el tramo medio-inferior, los puntos P8, P9 y P10 se encuentran en el tramo medio, y en la parte alta de Cuenca Hidrográfica se localiza el punto P11 a 2153 msnm (Tabla 3, Fig. 3).

Tabla 3: Estaciones de monitoreo embalse de Mazar - Río Paute. (Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, 2017).

Código	Lugar	Tipo de muestra	Coordenadas UTM		
			Norte	Este	Altitud (msnm)
P5	Presa Mazar	Compuesta en área	763999	9711504	2053
P6	Shall	Compuesta en área	765008	9709709	2054
P7	Jordán	Compuesta en área	765113	9706871	2071
P8	Q. Onda	Compuesta en área	763965	9701620	2101
P9	Palmas	Compuesta en área	762428	9699321	2116
P10	Santul	Compuesta en área	760359	9698038	2124
P11	Sacre / Guachapala	Compuesta en área	756036	9694176	2153

Figura 4: Vista parcial de las estaciones de muestreo en el Embalse Amaluza ubicado en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Ecuador.



a) Pie de presa



b) Límite lechugín cerca de pie de presa



c) Cercanía R. Juval



d) Cercanía Sigsales

Figura 5. Vista parcial de las estaciones de muestreo embalse de Mazar ubicado en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Ecuador.



a) Presa Mazar



b) Shall



c) Jordán



d) Q. Onda



e) Palmas



f) Santul



g) Sacre / Guachapala

## **5.2. Base de datos**

Para la presente investigación fue empleado como base de consulta los registros de monitoreo suministrados por los laboratorios prestadores de servicio de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, Unidad de Negocio Hidropaute, obtenidos de las muestras de agua recogidas durante los años de 2012 a 2017 (en campañas de monitoreo), siete estaciones de muestreo distribuidos en el Río Paute que abastece al embalse de Mazar y cuatro estaciones de monitoreo distribuidas aguas abajo del trayecto hasta el embalse Amaluza, que forman parte de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Ecuador. Las variables físicas, químicas y microbiológicas consideradas para la evaluación de la contaminación orgánica y eutrofización del agua fueron: Coliformes Totales (CT), Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Turbidez (TU), Fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), Sólidos Totales Disueltos (SDT), Oxígeno Disuelto (OD), Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y Temperatura (T). Las técnicas utilizadas en la recolección, medición y análisis de las muestras se realizaron siguiendo los procedimientos de la Norma ISO 17025 en todas las etapas de las campañas de monitoreo.

## **5.3. Evaluación de la calidad de agua de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute basado en el Anexo A, Artículo 1 del Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015) del Ministerio del Ambiente.**

La presente norma ambiental forma parte del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULSMA), es dictada por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE), bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental; es de aplicación obligatoria y rige en todo el territorio nacional. En el Artículo 1, Numeral 4, se establecen las normas de calidad ambiental y de descarga de efluentes para el recurso agua, siendo objetivo principal proteger la calidad del recurso agua para salvaguardar y preservar los usos asignados, la integridad de las personas, los ecosistemas y sus interrelaciones.

En el Numeral 4 de esta normativa prevé la clasificación para los cuerpos de agua dulce y se establecen los criterios de calidad para sus distintos usos, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Criterios de calidad de las aguas para sus distintos usos.

*Usos	1	2	3	4	5	6
<b>Criterios de calidad para:</b>						
<b>Consumo humano y uso doméstico, previo a potabilización</b>						
Aquella que es obtenida de cuerpos de agua, superficiales o subterráneas, y que luego de ser tratada será empleada por individuos o comunidades en actividades como:	X					
a. Bebida y preparación de alimentos para consumo humano	X					
b. Satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios	X					
<b>Preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces frías y cálidas</b>						
Actividades destinadas a mantener la vida natural de los ecosistemas asociados, sin causar alteraciones en ellos, o para actividades que permitan la reproducción, supervivencia, crecimiento, extracción y aprovechamiento de especies bioacuáticas en cualquiera de sus formas, tal como en los casos de pesca y acuicultura.			X			
<b>Riego Agrícola</b>						
Aquella empleada para la irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias que establezcan los organismos competentes.			X			
<b>Uso Pecuario</b>						
Aquellas empleadas para el abrevadero de animales, así como otras actividades conexas y complementarias que establezcan los organismos competentes.				X		
<b>Uso Recreativo</b>						
Se entiende por uso del agua para fines recreativos, la utilización en la que existe:					X	
a) Contacto primario, como en la natación y el buceo, incluidos los baños medicinales y					X	
b) Contacto secundario como en los deportes náuticos y pesca.					X	
<b>Uso Estético</b>						
Se refiere al mejoramiento y creación de la belleza escénica.						X

(\*) Usos del agua: 1. Consumo humano y uso doméstico, 2. Preservación de la vida acuática y silvestre, 3. Uso Agrícola o de riego. 4. Uso Pecuario, 5. Uso Recreativo, 6. Uso Estético (Acuerdo Ministerial 097-A, MAE, 2015).

La Tabla 5 muestra los valores máximos permitidos por parámetro clasificados según los usos del agua, según el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015). Tomando como referencia la relevancia que tiene los límites máximos permisibles de la variable de Coliformes fecales para incidir en la clasificación del uso del agua, se complementó la Tabla 5 con los límites máximos permisibles establecidos en la Normativa 357/2015 del Consejo Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) brasileño (BRASIL, 2005).

Con relación a la variable fosfato, el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015) no presenta criterios para calificar usos del agua. De esta forma, se optó por utilizar la clasificación propuesta por Sperling (1996), quien elaboró una síntesis para la concentración de fosfato total en condiciones tropicales (Tabla 6).

Tabla 5. Valores máximos permitidos por parámetro clasificados según los usos del agua según el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015).

USOS	1	2	3	4	5	6
PARÁMETROS						
Coliformes fecales	≤ 1000 NMP 100 ML <sup>-1</sup>	≤ 200 NMP 100 ML <sup>-1</sup> (*)	≤ 1000 NMP 100 ML <sup>-1</sup>	≤ 1000 NMP 100 ML <sup>-1</sup>	≤ 200 NMP 100 ML <sup>-1</sup>	> 1000 NMP 100 ML <sup>-1</sup> (*)
DBO <sub>5</sub>	≤ 2 mg L <sup>-1</sup>	≤ 20 mg L <sup>-1</sup>	-	-	-	-
OD	-	≥ 80% de saturación	≥ 3 mg L <sup>-1</sup>	-	≥ 80% de saturación	> 60% de saturación No mayor al 20% de las condiciones naturales en UTN
Turbidez	≤ 100 UNT	-	-	-	-	-
pH	6,0 a 9,0	6,5 a 9,5	6,0 a 9,0	-	6,5 a 8,3	6,5 a 8,3
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	-	-	-	-	-	-
Sólidos Totales Disueltos	-	10% de incremento max de la condición natural	-	-	-	-
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	≤ 50 mg L <sup>-1</sup>	≤ 13 mg L <sup>-1</sup>	-	≤ 50 mg L <sup>-1</sup>	-	-

(\*) Límite máximo permisible tomado de Resolución 357/2015, Consejo Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) brasileño (BRASIL, 2005).

Legenda:

Uso 1: Consumo humano y uso doméstico	Uso 3: Uso Agrícola o de riego	Uso 5: Uso Recreativo
Uso 2: Preservación de la vida acuática y silvestre	Uso 4: Uso Pecuario	Uso 6: Uso Estético

Tabla 6. Bandas de valores de Fosfato Total para los principales grados de eutrofización (Sperling, 1996).

Clase de Eutrofización	Concentración de Fosfato PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mgL <sup>-1</sup> )
Ultraoligotrófico	< 0,015
Oligotrófico	< 0,031 - 0,061
Mesotrófico	< 0,031 - 0,0153
Eutrófico	< 0,077 - 0,0153
Hipereutrófico	> 0,307

La clasificación propuesta por Sperling (1996), que tiene como base los distintos grados de eutrofización de un ecosistema acuático, se puede vincular a la clasificación de los distintos usos del agua propuesta por Thornton y Rast (1994), conforme se muestra en la Tabla 7.

#### 5.4. Evaluación de la calidad de agua de la Cuenca Hidrográfica del Rio Paute basado en el Índice de Calidad del Agua (ICA).

Para evaluar el Índice de Calidad de Agua (ICA), se empleó el método propuesto originalmente por la *National Sanitation Foundation* de los Estados Unidos (NSF, 2017), basado en una investigación de opinión aplicado a 142 especialistas del sector ambiental, y desarrollado por Brown *et al.* (1970), donde fueron seleccionados nueve parámetros relevantes: Coliformes Totales (CT), Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>),

Turbidez (TU), Fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), Sólidos Totales Disueltos (SDT), Oxígeno Disuelto (OD), Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y Temperatura (T), las cuales son llevadas a una misma escala mediante diagramas y posteriormente agregadas aritméticamente a través de la asignación de pesos (Jiménez, y Vélez, 2006).

Tabla 7. Vinculación entre los usos del agua y los grados de eutrofia en un cuerpo de agua (Thornton y Rast, 1994).

Uso	Clases de eutrofia					
	Ultraoligo trófico	Oligo trófico	Meso trófico	Meso eutrófico	Eutrófico	Hiper eutrófico
Abastecimiento de agua potable		Deseable	Tolerable			
Abastecimiento de agua de proceso			Deseable	Tolerable		
Abastecimiento de agua de enfriamiento					Tolerable	
Recreación de contacto primario			Deseable	Tolerable		
Recreación de contacto secundario			Deseable		Tolerable	
Paisajismo				Tolerable		
Crianza de peces (especies sensibles)			Deseable	Tolerable		
Crianza de peces (especies tolerantes)					Tolerable	
Irrigación						Tolerable
Producción de energía						Tolerable

El ICA es calculado por el producto ponderado de la calidad del agua correspondiente a cada parámetro evaluado utilizando la siguiente ecuación:  $\text{ICA} = \prod q_i^{w_i}$ . El cálculo del ICA requiere un paso de normalización, donde cada parámetro es transformado en una escala de 0 a 100%, con 100 representando la mayor calidad (Pesce & Wunderlin, 2000). El siguiente paso consiste en la aplicación del Software IQAData (Posselt *et al.*, 2015) para la aplicación de los factores de peso que reflejan la importancia de cada parámetro (Tabla 8).

Donde:

IQA - Índice de Calidad del Agua (valor entre 0 y 100).

$q_i$  - calidad del  $i$ -ésimo parámetro (valor entre 0 y 100), que se obtiene de la respectiva curva media de variación de calidad del agua, en función de su concentración o medida (Fig. 6).

$w_i$  - peso correspondiente al  $i$ -ésimo parámetro (valor entre 0 y 1), atribuido en función de su importancia.

Tabla 8. Parámetros y pesos relativos del ICA desarrollado de Brown *et al.*, 1970.

Parámetro	Unidad	Peso Relativo
Potencial de Hidrógeno (pH)	-	0,11
Oxígeno Disuelto (OD)	(mg L <sup>-1</sup> )	0,17
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	(mg L <sup>-1</sup> )	0,11
Temperatura (T)	(°C)	0,10
Turbidez (TU)	NTU	0,08
Sólidos Totales Disueltos (STD)	(mg L <sup>-1</sup> )	0,07
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	(mg L <sup>-1</sup> )	0,10
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	(mg L <sup>-1</sup> )	0,10
Coliformes fecales (CF)	(NMP 100 ML <sup>-1</sup> )	0,16

La interpretación del valor del IQA se realiza dentro de las bandas de calidad del agua, que son: muy mala, mala, regular, buena y excelente (Tabla 9).

Tabla 9. Categorías de calidad del agua para ICA (modificada de Brown *et al.*, 1970).

Valor	Clasificación de la calidad del agua
25	MUY MALA
26 – 50	MALA
51 – 70	REGULAR
71 – 90	BUENA
91 – 100	EXCELENTE

Para evaluar la calidad del agua de sistemas lóticos en el sur del Brasil, Moretto *et al.* (2012) realizaron una calibración del ICA desarrollado por la *National Sanitation Foundation* de los Estados Unidos, evaluando la calidad del agua de la Cuenca Hidrográfica del Río Pardo, región subtropical y templada en el Estado del Rio Grande del Sur. Para la calibración fueron modificados los pesos de las variables que se utilizan para el cálculo del ICA, teniendo como base la Normativa 357/2005 del Consejo Nacional del Medio Ambiente - CONAMA (BRASIL, 2005), que clasifica las aguas en cinco clases de acuerdo con sus usos (Tabla 10).

La Normativa 357/2005 del CONAMA es mucho más restrictiva que el ICA, principalmente para las variables coliformes fecales y fósforo total, de tal forma que cuando se aplican simultáneamente, la calidad del agua determinada por el uso del ICA indica una condición

“regular”, mientras que utilizando la Normativa 357/2005 del CONAMA indica una Clase de Uso 4, que corresponde a la clase de peor calidad, correspondiente a la condición “muy mala” del ICA. Esta diferencia resulta porque el ICA es un promedio ponderado de los nueve parámetros que se utilizan para su cálculo, mientras que la Normativa 357/2005 del CONAMA utiliza, siempre, la peor nota verificada para una serie de parámetros, con destaque para los coliformes fecales y fosfato total, una vez que la contaminación orgánica y la eutrofización del agua se constituyen en los principales problemas ambientales en el Sur del Brasil, que tienen como origen las aguas servidas sin tratamiento, criaderos de animales y fertilizantes usados en la agricultura.

Tabla 10. Clasificación de aguas dulces brasileñas en función de los usos (BRASIL, 2005).

<b>Clase</b>	<b>Aguas que pueden destinarse</b>
Especial	al abastecimiento para el consumo humano, con desinfección; a la preservación del equilibrio natural de las comunidades acuáticas; y, a la preservación de los ambientes acuáticos en unidades de conservación de protección integral.
Clase 1	al abastecimiento para el consumo humano, tras un tratamiento simplificado; a la protección de las comunidades acuáticas; a la recreación de contacto primario, tales como natación, esquí acuático y buceo, Resolución CONAMA no 274, de 2000; a la irrigación de hortalizas que se consumen crudas y de frutas que se desarrollan rentes al suelo y que se ingieren crudas sin eliminación de película; y a la protección de las comunidades acuáticas en Tierras Indígenas.
Clase 2	al abastecimiento para el consumo humano, después del tratamiento convencional; a la protección de las comunidades acuáticas; a la recreación de contacto primario, tales como natación, esquí acuático y buceo, Resolución CONAMA n° 274, de 2000; a la irrigación de hortalizas, plantas frutales y de parques, jardines, campos de deporte y con el que el público pueda tener contacto directo; y a la acuicultura ya la actividad pesquera.
Clase 3	al abastecimiento para el consumo humano, después del tratamiento convencional o avanzado; a la irrigación de cultivos arbóreos, cereales y forrajeros; a la pesca amateur; a la recreación de contacto secundaria; y a la desecación de animales.
Clase 4	a la navegación; y a la armonía paisajística.

En la tabla 11 se muestran los valores límites (VMP - Valor Máximo Permitido) establecidos por la Normativa 357/2005 del CONAMA para la clasificación de las aguas dulces en Brasil (BRASIL, 2005), con excepción de la variable oxígeno disuelto, para la cual se considera el valor mínimo.

Tabla 11. Límites establecidos por la Normativa 357/2005 del CONAMA (BRASIL, 2005), para la clasificación de las aguas dulces.

Parámetros	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Coliformes fecales, NMP 100 mL <sup>-1</sup>	200	1000	1000 <sup>a</sup> 2500 <sup>b</sup> 4000 <sup>c</sup>	-
Demanda bioquímica de oxígeno, mg L <sup>-1</sup>	3,0	5,0	10,0	-
Fosfato total, mg L <sup>-1</sup> P (ambientes lóticos)	0,1	0,1	0,15	-
Nitrato, mg L <sup>-1</sup> NO <sub>3</sub> -N	10,0	10,0	10,0	-
Nitrógeno amoniacal, mg L <sup>-1</sup> NH <sub>3</sub> -N (pH ≤ 7,5)	3,7	3,7	13,3	-
Nitrógeno amoniacal, mg L <sup>-1</sup> NH <sub>3</sub> -N (7,5 < pH ≤ 8,0)	2,0	2,0	5,6	-
Nitrógeno amoniacal, mg L <sup>-1</sup> NH <sub>3</sub> -N (8,0 < pH ≤ 8,5)	1,0	1,0	2,2	-
Nitrógeno amoniacal, mg L <sup>-1</sup> NH <sub>3</sub> -N (pH > 8,5)	0,5	0,5	1,0	-
Oxígeno disuelto, mg L <sup>-1</sup>	6,0	5,0	4,0	2,0
PH	6 – 9	6 – 9	6 – 9	6 – 9
Sólidos Totales Disueltos, mg L <sup>-1</sup>	500	500	500	-
Turbidez, uT	40	100	100	-

Observaciones: a - VMP para abrevadero de animales en confinamiento; b - VMP para recreación de contacto secundario; c - VMP para otros usos.

De esta forma, Moretto *et al.* (2012) realizaron la calibración de los pesos del ICA original, utilizando técnicas multivariantes, como el Análisis de Componentes Principales (PCA). Los resultados indicaron un ajuste significativo principalmente para la variable coliformes fecales, que pasó de 16% para 23% del peso total, y la variable fosfato, que pasó de 10% para 16% del peso total (Tabla 12).

Tabla 12. Parámetros y pesos relativos del ICA (Moretto *et al.*, 2012).

Variables	Peso Original (ICA Brown <i>et al.</i> 1970)	Peso calibrado (Moretto <i>et al.</i> , 2012)
Coliformes fecales	0,16	0,23
Demanda bioquímica de oxígeno	0,11	0,08
Fosfato total	0,10	0,16
Nitrato	0,10	0,07
Oxígeno disuelto	0,17	0,20
pH	0,11	0,05
Sólidos totales disueltos	0,07	0,06
Turbidez	0,08	0,12
Temperatura	0,10	0,03

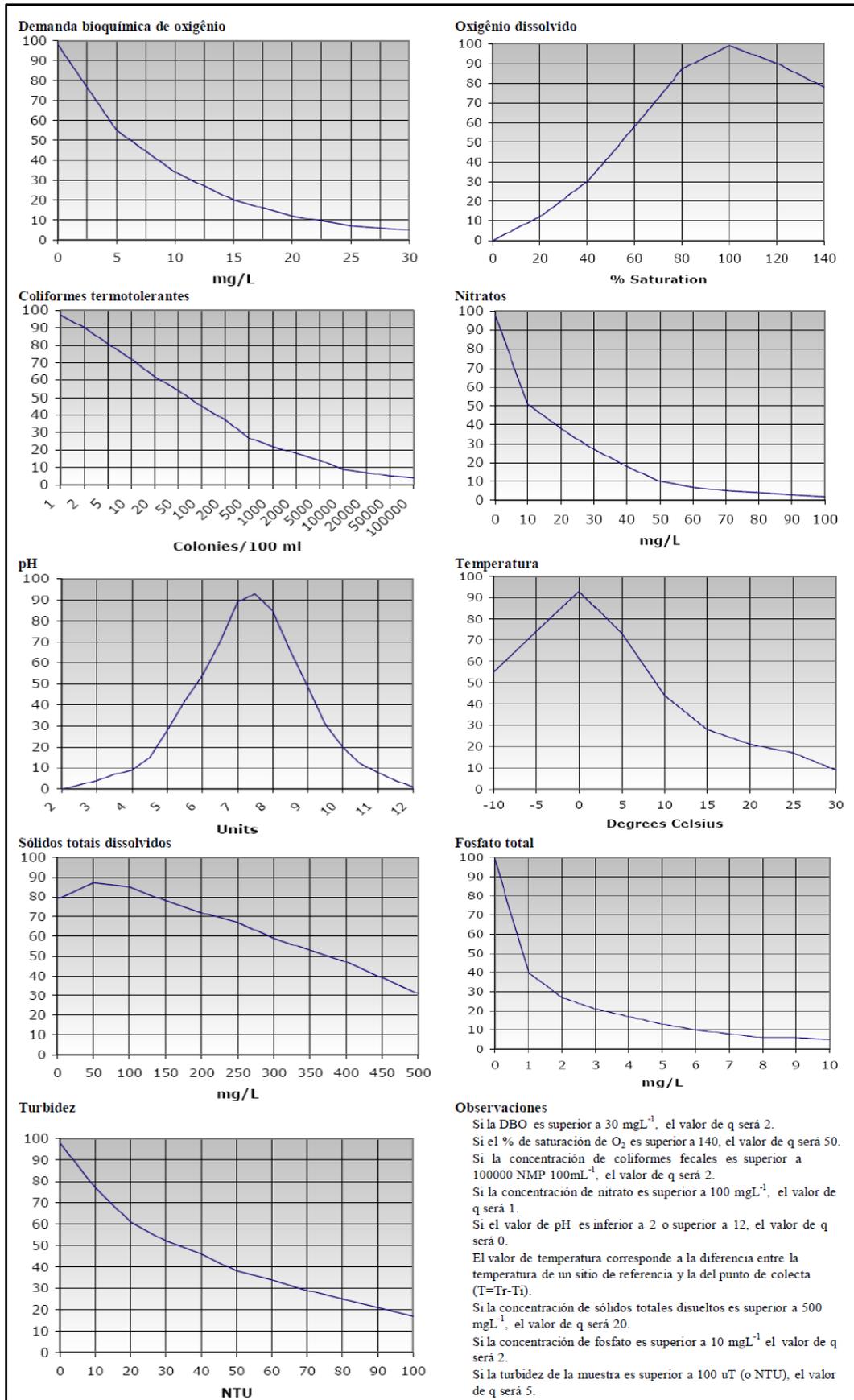
Los autores concluyeron que el ICA calibrado con los nuevos pesos presenta resultados compatibles con la Normativa 357/2005 del CONAMA, y puede ser utilizado en programas de monitoreo ambiental en ecosistemas acuáticos de la región Sur del Brasil.

## **5.5. Análisis de los datos**

A partir de la base de datos para los nueve parámetros evaluados, durante la serie temporal 2012-2007, obtenidos a través de los registros de monitoreo generados por CELEC E.P – Unidad de Negocio Hidropaute, se procedió a evaluar la calidad del agua aplicando el Acuerdo Ministerial 097/A (MAE, 2015), que establece en el Anexo 1, Numeral 4, los criterios de calidad del agua en función de los usos a los cuales se destina, teniendo como base variables físicas, químicas y microbiológicas. Para el análisis descriptivo de los nueve parámetros en el ecosistema acuático y la determinación del grado de eutrofia se utilizó el programa estadístico PAST (HAMMER *et al.*, 2001). Para comparar los valores promedios de las variables estudiadas, entre los distintos años de la serie temporal, se aplicó la prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis, una vez que los requisitos para la aplicación de pruebas estadísticas paramétricas no fueron cumplidos (normalidad de los datos e/o homogeneidad de las variancias), según las recomendaciones de Zar (1996), con nivel de significancia  $\alpha = 5\%$ . Para la clasificación y el ordenamiento de los datos, se aplicaron técnicas multivariantes, como el análisis de agrupamiento, utilizando el método de la variancia mínima, y el Análisis de Componentes principales (PCA), respectivamente, siguiendo las recomendaciones de Gauch (1995).

La calidad del agua del ecosistema acuático ecuatoriano fue evaluada utilizando el ICA desarrollado por Brown *et al.*, 1970 para los Estados Unidos, y el ICA calibrado por Moretto *et al.*, (2012) para sistemas lóticos subtropicales y temperados brasileños. Los cálculos fueron realizados utilizando el Software IQADData (Posselt *et al.*, 2015).

Figura 6. Curvas promedio de la variación de calidad del agua del ICA (Brown *et al.* 1970).



## 6. RESULTADOS

### 6.1. Evaluación de la calidad de agua de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute basado en el Anexo 1, Artículo 1 del Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015).

A partir de los valores promedio calculados para cada variable obtenidos de las 11 estaciones de muestro (P1 a P11), para la serie temporal 2012 – 2017 localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute que abastece a los embalses Mazar y Amaluza en la Región Sur Interandina del Ecuador, se calificaron los siguientes usos posibles según se presenta en la Tabla 13.

Tabla 13. Clasificación del agua en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute por parámetro, en la serie temporal 2012 – 2017, según el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015).

Parámetros	Valor ( $\bar{X}$ )	CLASIFICACIÓN					
		Uso 1	Uso 2	Uso 3	Uso 4	Uso 5	Uso 6
pH	7,23	X	X	X		X	X
Oxígeno Disuelto (%)	75,8		X	X		X	X
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg L <sup>-1</sup> )	3,76	X	X				
Temperatura (°C)	17,68						
Turbidez (NTU)	19,95	X	X				X
Sólidos Totales (mg L <sup>-1</sup> )	154,48		X				
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) (mg L <sup>-1</sup> )	0,73						
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg L <sup>-1</sup> )	1,77	X	X		X		
Coliformes Fecales (NMP 100 ML <sup>-1</sup> )	924,2	X		X	X		
Legenda:		Uso 1: Consumo humano y uso doméstico		Uso 3: Uso Agrícola o de riego		Uso 5: Uso Recreativo	
		Uso 2: Preservación de la vida acuática y silvestre		Uso 4: Uso Pecuario		Uso 6: Uso Estético	

En la Tabla 14 se puede constatar que la calificación que predomina en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, en la serie temporal 2012 – 2017, es el *USO 2: Preservación de la vida acuática y silvestre*, que son aguas destinadas a mantener la vida natural de los ecosistemas asociados, sin causar alteraciones en ellos, o para actividades que permitan la reproducción, supervivencia, crecimiento, extracción y aprovechamiento de especies bioacuáticas en cualquiera de sus formas, tal como en los casos de pesca y acuicultura (MAE, 2015).

Tabla 14. Clasificación del agua en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute por parámetro, en la serie temporal 2012 – 2017, según el Acuerdo Ministerial 097/A (MAE, 2015).

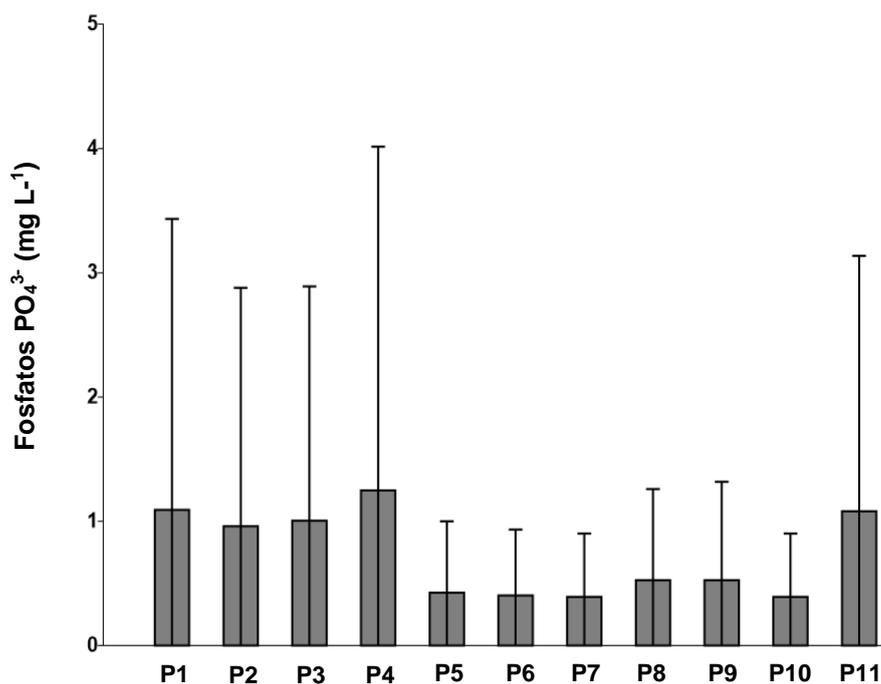
USO	CRITERIOS DE CALIDAD	Diagramas de Clasificación por Parámetro		
1	Consumo humano y uso doméstico			
2	Preservación de la vida acuática y silvestre			
3	Uso Agrícola o de riego			
4	Uso Pecuario			
5	Uso Recreativo			
6	Uso Estético			

\* La variable de Temperatura no fue considerada para asignar un uso al agua debido a que su variación por si sola no es representativa.

La calificación de *USO 2* para el agua de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute evidencia un vacío relevante para establecer criterios de calidad, ya que el Acuerdo Ministerial 097-A, (MAE, 2015) no establece límites permisibles para parámetros como fosfato, que registró un valor medio de  $0,73 \pm 1,51 \text{ mg L}^{-1}$  (Coeficiente de Variación, CV = 207,0%) (Fig. 7), siendo esta variable de alta importancia para definir la calidad de un cuerpo de agua y el uso primario que puede recibir.

Cuando se comparó estadísticamente los promedios de las variables Potencial de Hidrógeno (pH), Oxígeno Disuelto (OD  $\text{mg L}^{-1}$ ), Turbidez (NTU), Sólidos Totales Disueltos (STD,  $\text{mg L}^{-1}$ ), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>,  $\text{mg L}^{-1}$ ), Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{mg L}^{-1}$ ), Coliformes Fecales (NMP/100  $\text{mL}^{-1}$ ) y Fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$   $\text{mg L}^{-1}$ ), entre los 11 puntos de coleta (P1 a P11), (n=09), en la serie temporal 2012 - 2017 se observa que no hubo diferencias significativas ( $p > 0,05$ ), lo cual indica que las variables representan el ecosistema acuático en su totalidad.

Figura 7. Valores de Fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) (promedio  $\pm$  desviación estándar) de 11 puntos de coleta (P1 a P11) ( $n=09$ ), en la serie temporal 2012 - 2017, localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador. No hay diferencias significativas entre los promedios ( $p>0.05$ ).



Una de las concentraciones más elevadas de fosfato  $\text{PO}_4^{3-}$  se encuentra en el punto P11 donde se registra un valor medio de  $1,08 \pm 2,05 \text{ mgL}^{-1}$  ( $\text{CV} = 189,8\%$ ); esta estación de muestreo se ubica en la zona alta del área de estudio a 2153 msnm. Según Brito *et al.* (2009), concentraciones elevadas de fosfatos en el agua pueden ser explicadas por la liberación de nutrientes debido a la descomposición natural de biomasa y arrastre al cauce del río. Adicionalmente la presencia de actividades agropecuarias y uso intensivo de fertilizantes contribuye significativamente a la entrada de nutrientes y están estrechamente vinculados a la erosión y transporte de sedimentos (Pinheiro *et al.*, 2012).

Las estaciones de muestreo que van desde el punto P10, en el sector Santul a 2124 msnm, hasta el punto P5, localizado en el Embalse Mazar, muestran concentraciones de fosfato  $\text{PO}_4^{3-}$  que fluctuaron entre valores medios de  $0,39 \pm 0,50 \text{ mgL}^{-1}$  ( $\text{CV} = 129,2\%$ ) a  $0,43 \pm 0,57 \text{ mgL}^{-1}$  ( $\text{CV} = 134,4\%$ ). La variación en la concentración en este punto se debe a que en los ríos la eutrofización también puede ocurrir, sin embargo, es menos frecuente debido a las condiciones ambientales, como turbidez y velocidades elevadas (Da Silva, 2005)

Siguiendo el gradiente altitudinal del Río Paute, a 7,08 km de presa Mazar se localiza la estación

de muestreo P4, que se ubica en el sector de Sigales a 1987 msnm. En este punto la concentración promedio de fosfato  $\text{PO}_4^{3-}$  se eleva a  $1,25 \pm 2,76 \text{ mgL}^{-1}$  (CV = 221,42%). Este aumento está relacionado a la sedimentación cargada de nutrientes y al represamiento del agua en el embalse Mazar, ya que la estación de muestreo P5 recibe agua represada con sedimentos que transitan en granulometrías finas, donde gran parte del fósforo que llega al ecosistema acuático puede precipitarse en el sedimento y, en muchos casos, como menciona Esteves (1998) y López, (2009), no retorna al metabolismo límnic. Un estudio realizado por Orbes & Peralta (2017) sobre el manejo de sedimentos en las Cuencas Andinas del Ecuador, señala que el Embalse Mazar cuenta con una capacidad de almacenamiento de  $410 \text{ hm}^3$  y se estima que la tasa media de sedimentación desde el inicio de la operación es de  $2.75 \text{ hm}^3\text{año}^{-1}$ .

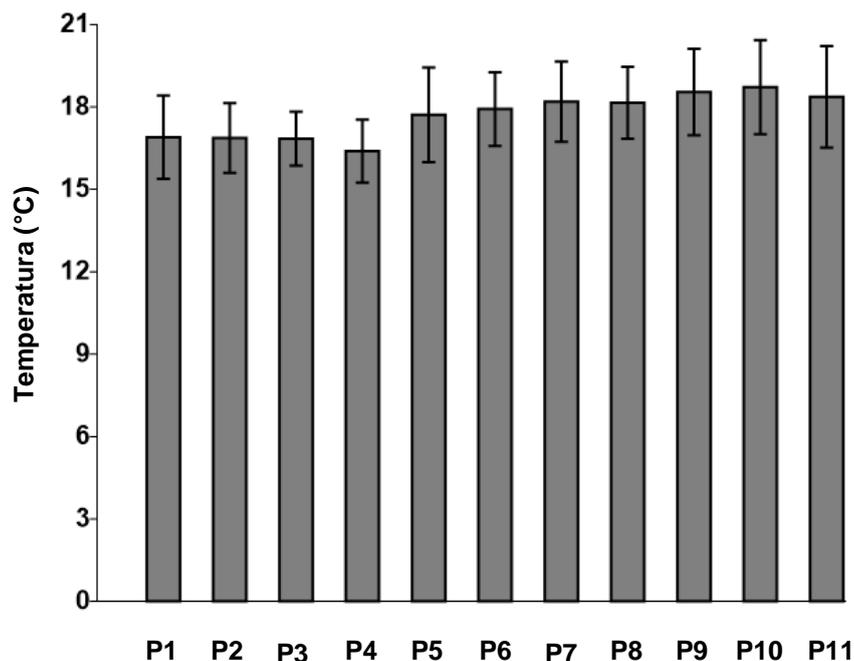
En las estaciones de monitoreo que conducen hasta el Embalse de Amaluza, los valores medios de fosfato  $\text{PO}_4^{3-}$  tienden a mantenerse elevados. La estación de colecta P3 registra un valor de  $1,00 \pm 1,88 \text{ mgL}^{-1}$  (CV = 187,7%). El punto P2 registra un valor medio de  $0,96 \pm 1,92 \text{ mgL}^{-1}$  (CV = 200,0%). Mientras que el Punto P1, ubicado en la zona más accesible al pie de la presa, muestra un valor medio de  $1,09 \pm 2,34 \text{ mgL}^{-1}$  (CV = 214,0%). Estas concentraciones elevadas de nutrientes son características de condiciones de hipereutroficación del agua (Vera, 2011), y la consecuente proliferación de la macrófita acuática *Eicchornia Crassipes* (Jacinto de agua), siendo la única planta acuática introducida con el carácter de invasiva en el Ecuador, que puede ser hallada en sus tres regiones costa, sierra y oriente (Vera, 2011; Kuffo *et al.*, 2006; Torres, 2009; Espinoza & Peralta, 2008; Palacios *et al.*, 1999).

En relación a la variable temperatura (Fig. 8), se observa que hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) al comparar los valores promedios de las estaciones de muestreo del embalse Amaluza (P1 a P4), igual a  $16,8 \pm 1,2 \text{ }^\circ\text{C}$  (CV = 7,2%) y las estaciones de muestreo del embalse Mazar (P5 a P11), igual a  $18,2 \pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$  (CV = 8,4%). Esta diferencia significativa se debe principalmente a la variación del gradiente de altitud que hay entre el embalse Amaluza, localizado entre las cotas 1978 m.s.n.m. a 1987 m.s.n.m., y el embalse Mazar, localizado entre las cotas 2053 m.s.n.m. hasta 2153 m.s.n.m., construidos en la Región Sur Interandina del Ecuador, una zona montañosa atravesada por cordilleras transversales (nudos) que corren de este a oeste.

La separación de las estaciones de muestreo de los embalses en función de la temperatura se

observa claramente en la Figura 9, que corresponde al análisis de agrupamiento (método de la variancia mínima) basado en los valores de temperatura de los 11 puntos de coleta (P1 a P11) (n=09), en la serie temporal 2012 - 2017.

Figura 8. Valores de Temperatura (°C) (promedio  $\pm$  desviación estándar) de 11 puntos de coleta (P1 a P11) (n=09), en la serie temporal 2012 - 2017, localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador. Hay diferencias significativas entre los promedios ( $p > 0.05$ ).



Los valores medios registrados para el de potencial de Hidrógeno (pH) (Fig. 10), en las 11 estaciones de muestreo (P1 - P11), fluctuaron entre  $6,93 \pm 0,50$  (CV = 7,23%) y  $7,71 \pm 0,50$  (CV = 4,85%) y no presentan diferencias significativas entre los promedios ( $p > 0.05$ ). Para este rango, el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015) permite los siguientes usos del agua: Consumo Humano y Uso Doméstico, Preservación de la Vida Acuática y Silvestre, Uso Agrícola o de Riego, Uso Recreativo y uso Estético. Un aspecto relevante es que no está normado el límite permisible de este parámetro para aguas destinada a Uso Pecuario.

Figura 9. Análisis de agrupamiento (método de la variancia mínima) basado en los valores de Temperatura (°C), de 11 puntos de coleta (P1 a P11) (n=09), en la serie temporal 2012 - 2017, localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador.

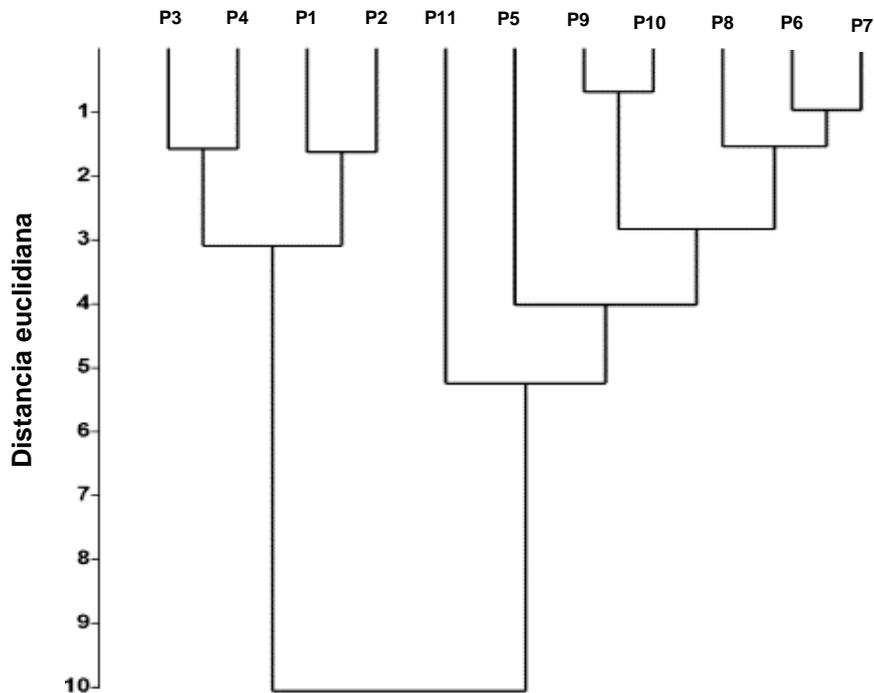
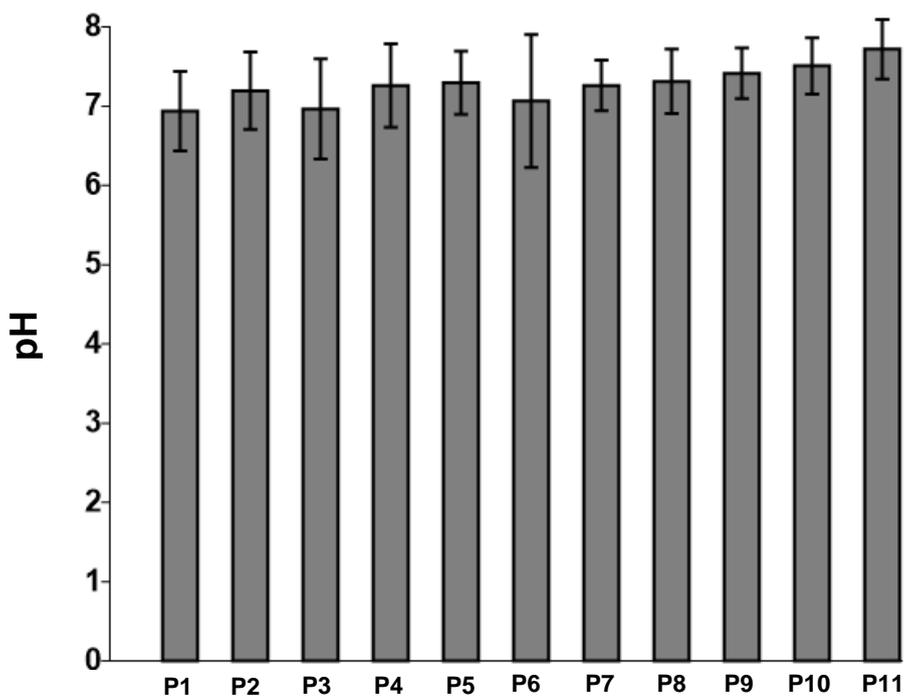
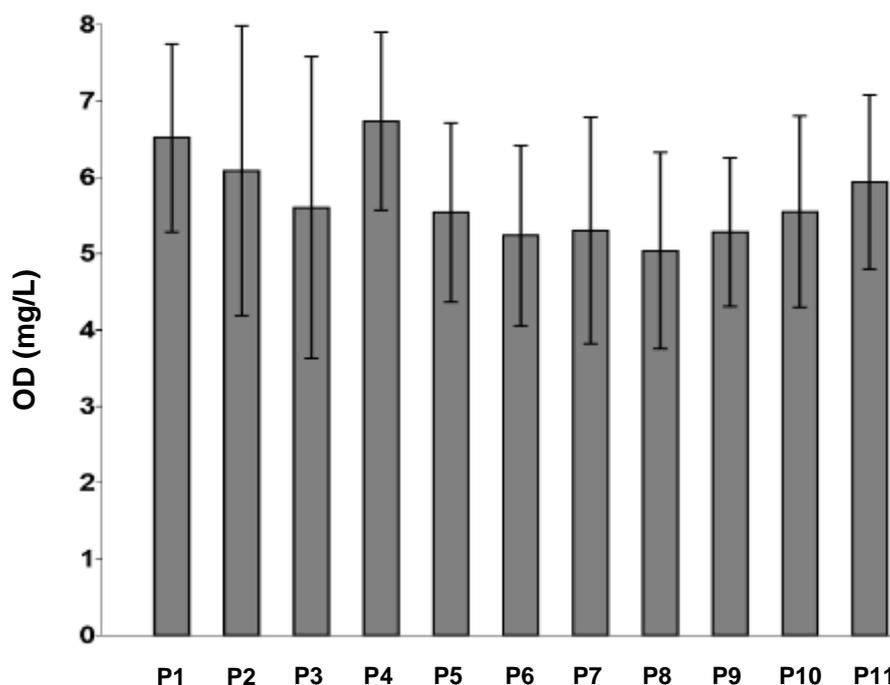


Figura 10. Valores de pH (promedio  $\pm$  desviación estándar) de 11 puntos de coleta (P1 a P11) (n=09), en la serie temporal 2012 - 2017, localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador. No hay diferencias significativas entre los promedios ( $p > 0.05$ ).



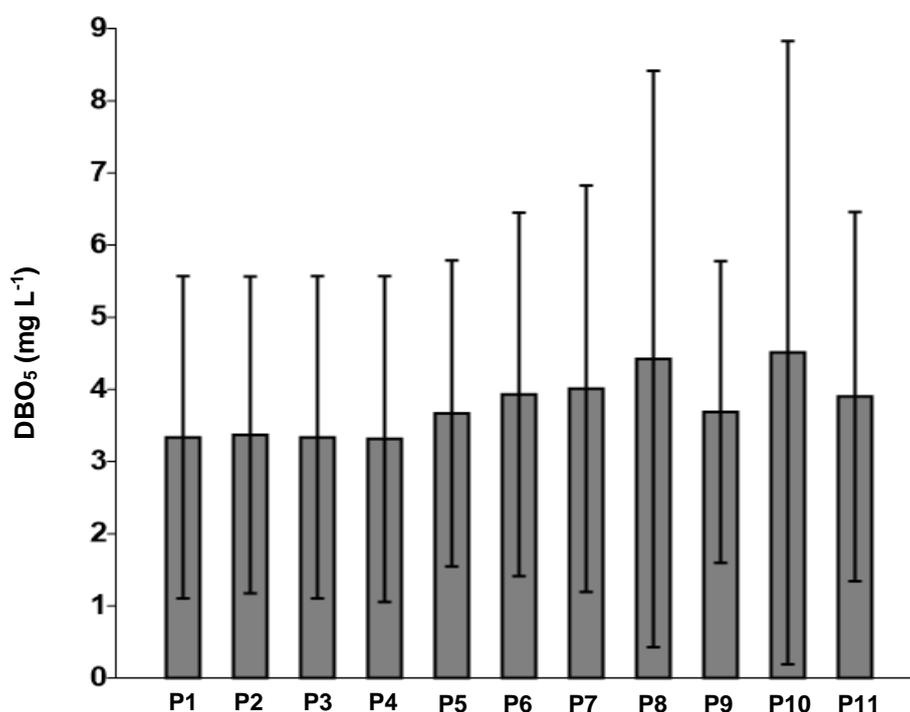
El valor medio del porcentaje de saturación de Oxígeno (Fig. 11) para las estaciones de monitoreo (P1 - P11) fue de  $75,8 \pm 6,39 \%$  ( $CV = 8,43\%$ ), no hay diferencias significativas entre los promedios ( $p > 0.05$ ). Con estos niveles, los usos para el agua que permite el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015) son: Preservación de la vida acuática y silvestre, Uso Agrícola y Riego, Uso Recreativo y Uso Estético. Sin embargo, la normativa no establece valores permisibles de oxígeno disuelto para determinar si bajo este parámetro el agua califica para Consumo Humano y Uso Doméstico, Uso Pecuario, Uso Estético.

Figura 11. Valores de OD ( $\text{mgL}^{-1}$ ) (promedio  $\pm$  desviación estándar) de 11 puntos de coleta (P1 a P11) ( $n=09$ ), en la serie temporal 2012 - 2017, localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador. No hay diferencias significativas entre los promedios ( $p > 0.05$ ).



Los valores medios para Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ) (Fig. 12) registrados para las estaciones de muestreo de los puntos P1 - P11 oscilaron entre  $3,33 \pm 2,23 \text{ mgL}^{-1}$  ( $CV = 66,92\%$ ), a  $4,50 \pm 4,31 \text{ mgL}^{-1}$  ( $CV = 95,73\%$ ) y no hay diferencias significativas entre los promedios ( $p > 0.05$ ). Con base en estos valores, el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015) permite los siguientes usos: Consumo humano y uso doméstico y Preservación de la vida acuática y silvestre. Sin embargo, no se registran límites máximos permisibles para Uso Agrícola y Riego, Uso Pecuario, Uso Recreativo y Uso Estético.

Figura 12. Valores de DBO<sub>5</sub> mg L<sup>-1</sup> (promedio ± desviación estándar) de 11 puntos de coleta (P1 a P11) (n=09), en la serie temporal 2012 - 2017, localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador. No hay diferencias significativas entre los promedios (p>0,05).



El valor medio de Turbidez (Fig. 13) para las estaciones de monitoreo (P1 - P11) fue de 19,96 ± 52,99 NTU (CV = 265,46%), y no hay diferencias significativas entre los promedios (p>0.05). Con estos niveles, los usos para el agua que permite el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015) son: Consumo humano y uso doméstico, Preservación de la vida acuática y silvestre, y Uso Estético. Sin embargo, la normativa no establece valores permisibles de Turbidez para los usos: Agrícola y Riego, Uso Pecuario, Uso Recreativo.

El valor medio registrado para la variable de Sólidos Totales Disueltos (STD) (Fig. 14) en las 11 estaciones de muestreo (P1 - P11) fue de 154,48 ± 202,45 mgL<sup>-1</sup> (CV = 131,05%), y no hay diferencias significativas entre los promedios (p>0.05). El Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015) solo establece límite máximo permisible para las aguas destinadas a Preservación de la Vida Acuática y Silvestre. No se encuentran establecidos los límites de STD para aguas destinadas a: Consumo Humano y Uso Doméstico, Uso Agrícola o de Riego, Uso Pecuario, Uso Recreativo y Uso Estético.

Figura 13. Valores de Turbidez (NTU) (promedio  $\pm$  desviación estándar) de 11 puntos de coleta (P1 a P11) (n=07), en la serie temporal 2012 - 2017, localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador. No hay diferencias significativas entre los promedios ( $p>0,05$ ).

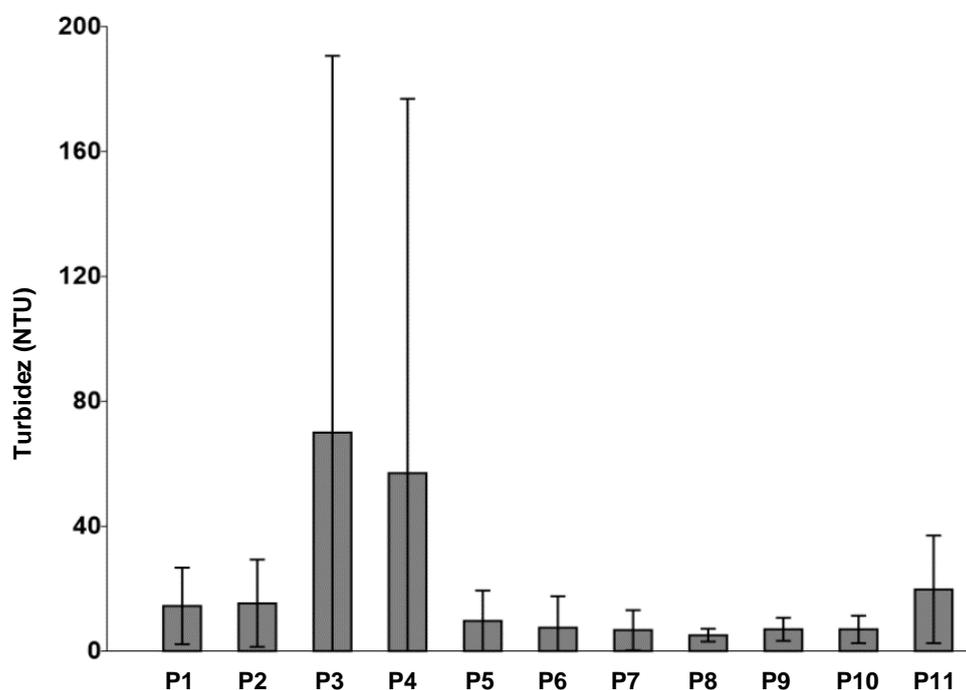
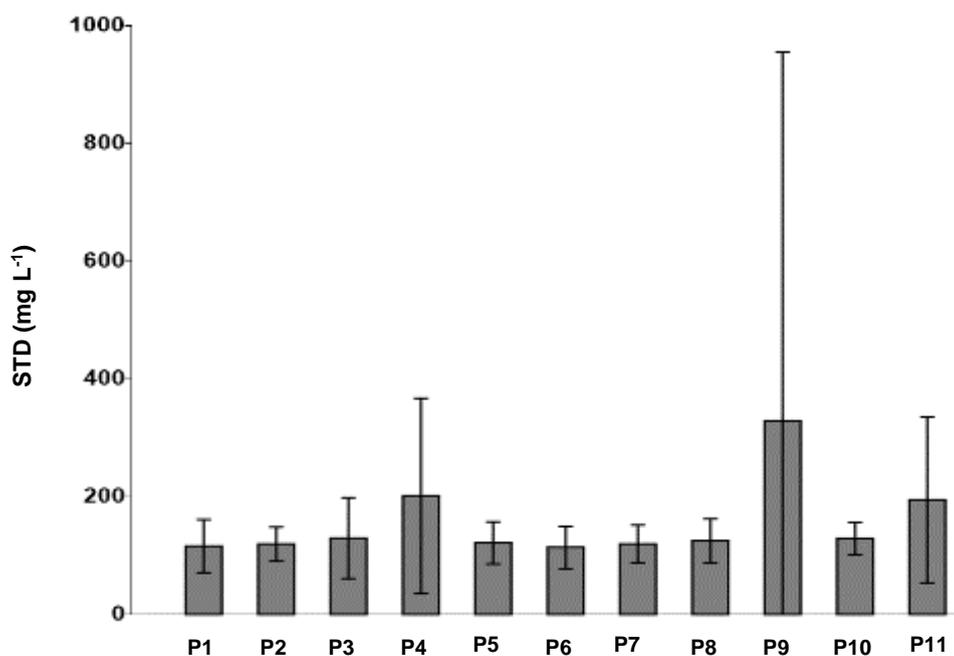
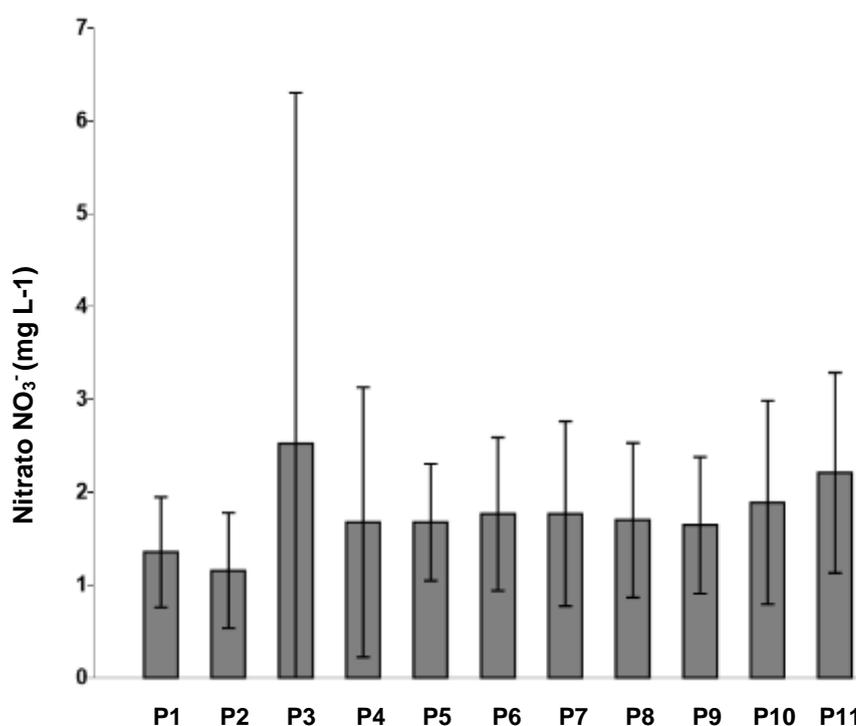


Figura 14. Valores de Sólidos Totales Disueltos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) (promedio  $\pm$  desviación estándar) de 11 puntos de coleta (P1 a P11) (n=09), en la serie temporal 2012 - 2017, localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador. No hay diferencias significativas entre los promedios ( $p>0,05$ ).



Los valores medios de Nitrato (Fig. 15) registrados en las 11 estaciones de muestreo (P1 - P11) variaron desde  $1,15 \pm 0,62 \text{ mg L}^{-1}$  (CV = 53,88%) hasta  $2,52 \pm 3,78 \text{ mg L}^{-1}$  (CV = 150,12%), y no hay diferencias significativas entre los promedios ( $p > 0,05$ ). Con base en estos valores, el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015) permite los siguientes usos: Consumo Humano y Uso Doméstico, Preservación de la Vida Acuática y Silvestre, y Uso Pecuario. No se encuentran normados límites máximos permisibles para niveles de nitrato en aguas destinadas a: Uso Agrícola, Uso Recreativo y Uso Estético.

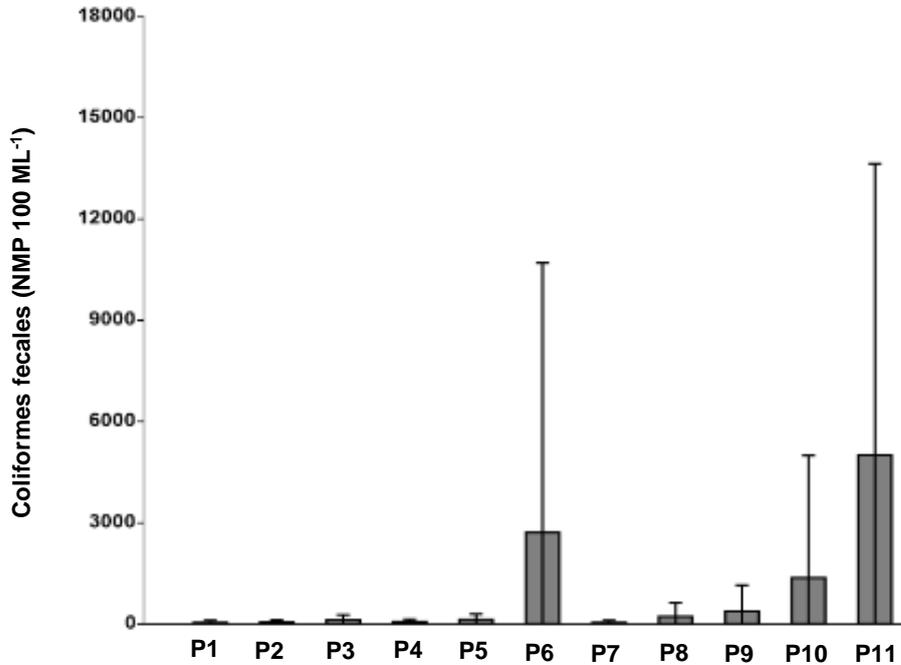
Figura 15. Valores de Nitrato  $\text{NO}_3^-$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) (promedio  $\pm$  desviación estándar) de 11 puntos de coleta (P1 a P11) ( $n=09$ ), en la serie temporal 2012 - 2017, localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador. No hay diferencias significativas entre los promedios ( $p > 0,05$ ).



Los valores medios de coliformes fecales (Fig. 16) registrados en las 11 estaciones de muestreo (P1 - P11) no presentan diferencias significativas entre los promedios ( $p > 0,05$ ). Sin embargo, se registraron puntos críticos con elevadas concentraciones de coliformes fecales, como en la zona alta del Río Paute (P11), con un valor medio de  $5017,12 \pm 8625,90 \text{ NMP ML}^{-1}$  (CV = 171,92%) y el punto P6, con un valor medio de  $2710,44 \pm 7983,89 \text{ NMP ML}^{-1}$  (CV = 294,56%). Con base en estos valores, el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015) restringe el uso del agua para Consumo Humano y Uso Doméstico, permitiéndose solo el uso del agua para: Uso Agrícola y Riego, y Uso Pecuario. Un aspecto relevante a destacar es que no se encuentran

normados límites máximos permisibles para Preservación de la Vida Acuática y Silvestre, Uso Recreativo y Uso Estético.

Figura 16. Valores de Coliformes Fecales (NMP 100 ML<sup>-1</sup>) (promedio ± desviación estándar) de 11 puntos de coleta (P1 a P11) (n=09), en la serie temporal 2012 - 2017, localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador. No hay diferencias significativas entre los promedios ( $p>0.05$ ).



### 6.1. Análisis de Componentes Principales para evaluar el estado trófico de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute.

Con el objetivo de comparar los patrones de la composición del conjunto de datos físicos, químicos y microbiológicos registrados en las 11 estaciones de muestreo (P1 - P11), en la serie temporal 2012 - 2017, se utilizó un análisis de componentes principales (PCA). Los primeros tres componentes muestran un porcentaje de varianza acumulada igual a 56,90% (Tabla 14), sin embargo, los componentes 1 y 2 fueron los únicos significativos, considerando que los auto valores para estos componentes se encuentran arriba del punto de inflexión en la curva de los auto valores (prueba de *Broken Stick*) siendo, por lo tanto, significativos (Jackson, 1993).

Tabla 14. Auto valores del Análisis de Componentes Principales (PCA).

	<b>Auto valor</b>	<b>% Varianza</b>	<b>Auto valor acumulado</b>	<b>% de varianza acumulada</b>
Componente 1 =	1,91117	23,89	1,9112	23,89
Componente 2 =	1,42468	17,81	3,3359	41,70
Componente 3 =	1,21592	15,20	4,5518	56,90
Componente 4 =	0,997762	12,47	5,5495	69,37
Componente 5 =	0,832948	10,41	6,3825	79,78
Componente 6 =	0,642932	8,04	7,0254	87,82
Componente 7 =	0,588698	7,36	7,6141	95,18
Componente 8 =	0,385884	4,82	8,0000	100,00

La Tabla 15 resume los resultados del PCA para los dos primeros componentes, incluidos los auto vectores propios de la matriz de correlación. Teniendo en cuenta que las variables se midieron utilizando diferentes unidades, se utilizó la correlación (variación normalizada-matriz de covarianza). La Figura 17 muestra la gráfica bivariada de los componentes principales PC1 y PC2, considerando las variables físicas, químicas y microbiológicas registradas en las 11 estaciones de muestreo (P1 - P11), en la serie temporal 2012 - 2017. De acuerdo con la Tabla 15 y la Fig. 17, el PC1 se correlacionó positivamente con fosfato ( $r = 0,75$ ) y la demanda bioquímica de oxígeno ( $r = 0,72$ ), mostrando claramente un gradiente de eutrofización a lo largo de este componente, con destaque para las muestras P1 a P4 del embalse Amaluza (círculos rojos en la Figura 17), en el año 2017, que presentaron un promedio de  $6,82 \pm 1,30 \text{ mg L}^{-1}$  ( $CV = 19,0\%$ ). Con relación al PC2, el oxígeno presentó la más alta correlación ( $r = 0,77$ ), caracterizando un gradiente a lo largo de este componente, con destaque para las muestras P1 y P2 del embalse Amaluza y P7 del embalse Mazar, en el 2012, P4 en Amaluza, en el 2013, P1 a P11 en ambos embalses, en el año 2015, y P4 en Amaluza, en el 2016 (círculos azules en la Figura 17), que presentaron un promedio de  $7,82 \pm 0,58 \text{ mg L}^{-1}$  ( $CV = 7,4\%$ ).

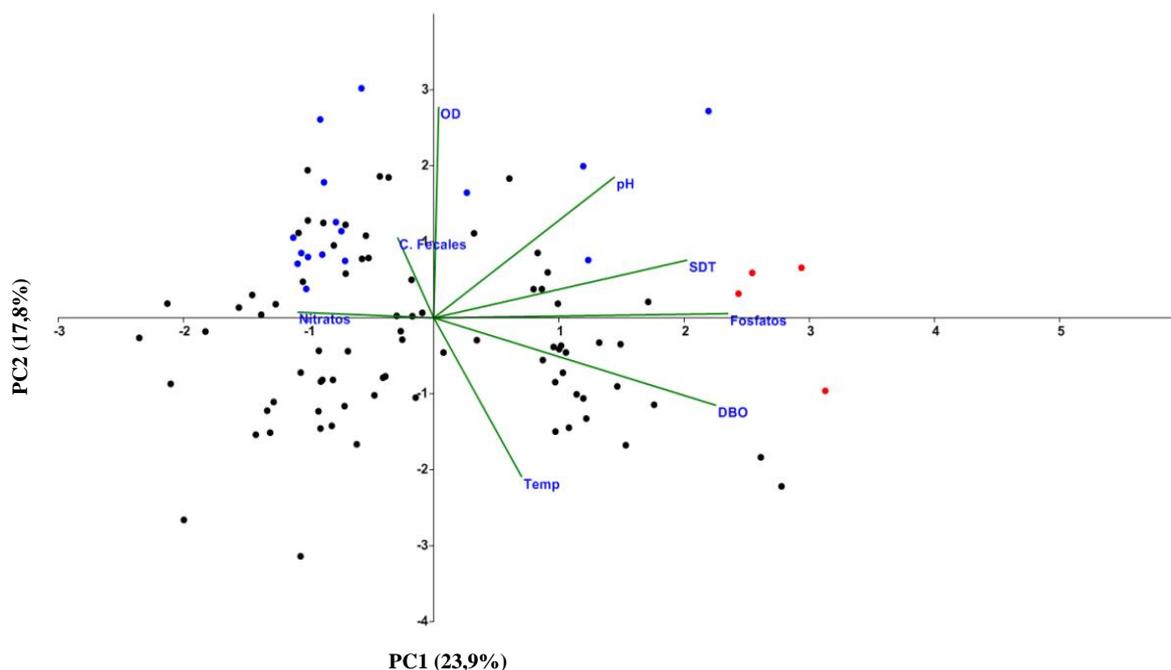
Como señalan Janzekovic y Novak (2012), cuanto más fuerte es la correlación entre una variable y un factor, mayor es la correlación entre la variable correspondiente y los componentes principales. Las variables que están correlacionadas con un factor en particular pueden identificarse, proporcionando información sobre qué variables pueden explicar el factor dado. En este contexto, estos resultados indican que los embalses Amaluza y Mazar localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador, se caracterizan por presentar un gradiente de eutrofización, con destaque para las variables fosfato y demanda bioquímica de oxígeno en el componente principal PC1, y el oxígeno disuelto en el componente

principal PC2.

Tabla 15. Auto vectores del Análisis de Componentes Principales (PCA).

Variables/Componentes Principales	CP1	CP2
pH	0,4637	0,5139
OD (mg L <sup>-1</sup> )	0,01257	0,769
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	0,7235	-0,3189
Temperatura (°C)	0,2256	-0,5802
SDT (mg L <sup>-1</sup> )	0,6493	0,2105
Fosfatos (mg L <sup>-1</sup> )	0,7545	0,01529
Nitratos (mg L <sup>-1</sup> )	-0,3494	0,02071
Coliformes Fecales (NMP 100 mg L <sup>-1</sup> )	-0,09299	0,2933

Figura 17. Diagrama bivariado de los Componentes Principales CP1 y CP2, para las variables físico, químicas y biológicas registradas para los 11 puntos de coleta (P1 a P11) (n=09), en la serie temporal 2012 - 2017, localizados en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador. (Temp: temperatura; C. fecales: coliformes fecales; SDT: sólidos totales disueltos; DBO: demanda bioquímica de oxígeno; OD: oxígeno disuelto).



## 6.2. Evaluación de la calidad de agua de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute basado en el Índice de Calidad del Agua (ICA) según Brown *et al.* (1970).

La Tabla 16 presenta la calidad del agua Cuenca Hidrográfica del Río Paute que abastece a los embalses Mazar y Amaluza, obtenida para la serie temporal 2012 - 2017, basado en el ICA desarrollado por Brown *et al.* (1970). Es posible observar que 40,3% de las estaciones de muestreo presentaron una calidad del agua “buena”, principalmente en los años 2012, 2013, 2015, donde los puntos (P1 - P4) ubicados en el Embalse Amaluza mostraron mejor calidad del agua.

Sin embargo, también se evidencia que más de la mitad de estaciones de colecta (54,5%) presentaron un nivel de calidad del agua “Regular”, constatándose un decrecimiento de calidad desde el año 2012 al 2017, siendo más frecuente en los puntos (P5 - P11) que corresponden a las estaciones de monitoreo localizadas a lo largo del tramo del río que abastece al embalse Mazar. Entretanto, solo el 5,2% de las estaciones demostraron una calidad de agua “Mala”.

Tabla 16. Índice de Calidad del Agua para la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador para la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador según Brown *et al.* (1970).

AÑO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
2012	76,19	75,60	64,29	58,71	73,00	75,07	77,89	78,89	72,08	70,60	58,37
2012	71,93	73,56	45,40	69,45	71,79	60,74	72,33	69,98	73,43	77,65	50,82
2013	72,06	64,47	54,67	78,26	71,22	68,69	72,47	70,58	67,87	69,03	58,12
2015	76,02	75,66	75,20	70,27	68,73	69,09	62,62	57,50	57,78	62,58	54,62
2016	70,24	70,62	54,12	71,05	68,48	67,65	68,35	60,63	51,34	62,22	52,77
2017	54,25	53,84	46,05	49,56	65,01	69,52	67,71	67,35	68,21	71,46	39,60
2017	71,02	71,09	71,25	71,49	59,65	62,85	59,67	59,02	64,79	56,35	64,60

Legenda

Muy mala	Mala	Regular	Buena	Excelente
----------	------	---------	-------	-----------

## 6.3. Evaluación de la calidad de agua de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute basado en el Índice de Calidad del Agua (ICA) calibrado por Moretto *et al.* (2012).

En la Tabla 17 se visualiza la distribución espacial de los resultados de la evaluación de la calidad del agua en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute que abastece a los embalses Mazar y Amaluza, para la serie temporal 2012 – 2017, utilizando el ICA calibrado por Moretto *et al.*

(2012) y sugerido para ecosistemas acuáticos con altas concentraciones de nutrientes, principalmente fósforo.

Los resultados demuestran una tendencia decreciente en la calidad del agua a lo largo del área de estudio. Mientras que para el año 2012 hasta principios del 2015 solo el 20,8% de las estaciones de muestreo de monitoreo (P1 - P11) registraron niveles de calidad “Buena”; mientras que el 66,2% de las estaciones de colecta presentaron niveles de calidad de agua “Regular”, y un 13% tuvieron una calidad del agua “mala”.

A partir del año 2016 se puede constatar que la calidad del agua del río Paute que abastece a los embalses Amaluza (P1 – P4) y Mazar (P5 – P11) se muestra “Regular” y “Mala” respectivamente, en casi todos puntos de monitoreo, desatacándose la baja calidad de agua que se registra en punto P11 que corresponde a la zona alta de cuenca hídrica.

Tabla 17. Índice de Calidad del Agua para la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador para la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador según Moretto *et al.*, (2012).

AÑO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
2012	72,50	72,04	54,34	49,46	69,09	71,83	74,97	77,20	72,08	70,60	53,25
2012	70,54	68,68	37,44	67,40	69,67	61,94	70,97	67,65	73,43	76,10	43,86
2013	68,23	59,66	51,85	75,47	69,44	66,92	71,96	69,52	67,87	65,31	50,96
2015	75,69	74,24	74,89	68,99	65,03	67,16	58,79	52,64	57,78	58,08	46,49
2016	65,25	65,09	51,46	65,64	63,86	62,06	63,32	53,26	51,34	54,39	42,23
2017	43,36	42,61	31,31	40,14	58,79	64,65	61,77	61,13	68,21	66,78	36,72
2017	65,95	66,11	66,32	66,55	53,12	58,11	54,98	55,38	64,79	52,56	58,91

Legenda  Muy mala  Mala  Regular  Buena  Excelente

## 7. DISCUSIÓN

Según Derisio (2000), la calidad del agua es un aspecto que asegura un determinado uso o conjunto de usos, estando representada por características intrínsecas, generalmente medibles, siendo la calidad de las aguas superficiales un importante medio de diagnóstico del equilibrio de una cuenca hidrográfica (Margalef, 1980). A partir de este criterio surge la necesidad de evaluar la calidad del agua de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute que abastece a los embalses Mazar y Amaluza, durante la serie temporal 2012 - 2017, teniendo como base el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015), para determinar cuáles son los usos que puede recibir el agua en función de cada uno de los parámetros analizados, así como una clasificación general a partir de la aplicación del Índice de Calidad de Agua (ICA).

La calificación de “Uso 2” para el agua de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute que abastece a los embalses Mazar y Amaluza evidencia un vacío relevante para establecer criterios de calidad, ya que el Acuerdo Ministerial 097-A MAE (2015) no establece límites permisibles para parámetros como fosfato, que registró un valor medio de  $0,73 \pm 1,51 \text{ mg L}^{-1}$  (Coeficiente de Variación,  $CV = 207,0\%$ ), tomando como referencia que en aguas no contaminadas la concentración suele variar entre  $0,005$  y  $0,020 \text{ mgL}^{-1}$  (Gastaldini & Mendonça, 2001). La cuantificación de fósforo es de gran importancia para buscar un mejor entendimiento del comportamiento de ese nutriente en el ecosistema acuático, pudiendo servir como indicador del grado de conservación ambiental de la cuenca hidrográfica, siendo uno de los principales parámetros para establecer el grado de eutrofización de ambientes lacustres (Carneiro *et al.*, 2003; Ferreira, 2010).

Ante esta problemática, algunos países han establecido dentro de su legislación ambiental niveles máximos permisibles de fosfato total para diferentes usos, como el caso de Brasil que determinó en la Normativa 357/2005 del CONAMA (Brasil, 2005) el valor de  $0,03 \text{ mg L}^{-1}$  como valor máximo en ambientes lénticos para diferenciar las clases de usos 2 de 3, siendo esta última considerada “Regular”, limitándose al consumo humano con tratamiento convencional, recreación de contacto secundario y abrevadero de animales. Usos más nobles que caracterizan la clase 2, como consumo humano con tratamiento simplificado, protección de las comunidades acuáticas y recreación de contacto primario (balneabilidad), no son permitidos. En Perú, el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, determina el valor de  $0,035 \text{ mg L}^{-1}$  de fosfato total

como valor máximo en ambientes lénticos para el encuadramiento en la categoría 4 - Conservación del ambiente acuático.

En el caso particular de Brasil, la Resolución 357/2005 del CONAMA presenta, primeramente, una concordancia significativa entre la clasificación para las aguas dulces según la calidad requerida para sus usos preponderantes, donde las aguas de mejor calidad pueden ser aprovechadas en usos más exigentes (Tabla 10), y las cinco categorías calificadas por el Índice de Calidad de Agua (ICA) desarrollado por Brown *et al.* (1970) (Tabla 9), conforme muestra la Tabla 18.

Tabla 18. Escala relativa de concordancia entre la clase de la Normativa 357/2005 del CONAMA (BRASIL, 2005) y las categorías de calidad del Índice de Calidad de Agua (ICA), (Brown, *et al.*, 2017).

<b>Clases de Uso del CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005)</b>	<b>Categorías de Calidad del Agua del ICA (Brown et al., 1970)</b>
Especial	Excelente
Clases 1, 2	Buena
Clase 3	Regular
Clase 4	Mala/ Muy Mala

Segundo, las condiciones y estándares fijados en la Normativa 357/2005 del CONAMA se encuentran claramente estructurados, de forma tal que para determinar los “Usos” del agua según la “Clase”, se miden variables en común que tienen Valores Máximos Permitidos para los siguientes parámetros: Coliformes Totales, Potencial de Hidrógeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Turbidez, Fosfato, Sólidos Totales, Oxígeno Disuelto, Nitrato y Temperatura.

Consecuentemente, los resultados evidencian que el ICA calibrado por Moretto *et al.* (2012) para la Cuenca Hidrográfica del Río Pardo RS, Brasil, se encuentra acorde a la Resolución 357/2005 del CONAMA (Brasil, 2005), siendo más restrictivo que el ICA sugerido por Brown *et al.* (1970) y ajustándose mejor a la realidad de los ecosistemas lénticos con gradientes de eutrofización.

Esta correspondencia directa entre “usos” y “clases” o “categorías” no es posible establecer en el Ecuador con el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015). Primeramente, porque los “Criterios de calidad” del agua superficial que definen los distintos “Usos” del agua no presentan parámetros físicos, químicos y bacteriológicos comunes entre las tablas para cada

“Uso”, y tampoco se especifican Valores Máximos Permisibles de forma homogénea para cada parámetro, de modo que se pueda establecer claramente, dentro de los “Criterios de calidad”, los Valores Máximos Permisibles de cada variable.

Segundo, porque en la Región Sur Interandina de Ecuador no se ha calibrado, hasta la presente fecha, un ICA que explique el comportamiento de las variables que generan enriquecimiento de nutrientes y condicionan la utilización del recurso hídrico (GIRÃO *et al.*, 2007; STEFOULI *et al.*, 2005). Más aún, tomando como referencia a autores como Da Silva (2005), que reconocen que los embalses proporcionan información fundamental sobre las cuencas hidrográficas, constituyéndose en importantes centros de convergencia de las diversas actividades desarrolladas en su interior, incluso de sus usos y aspectos socioeconómicos.

En este contexto, al comparar los resultados de la evaluación de la calidad del agua en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, aplicando el ICA propuesto por Brown *et al.* (1970) y el ICA calibrado por Moretto *et al.* (2012) para sistemas acuáticos del Sur del Brasil, se verifica que durante la serie temporal 2012 - 2017 el número de estaciones de monitoreo calificadas como “Buena” se reduce de 40,3% para 20,8% utilizando el ICA Brasil, consecuentemente las estaciones de muestreo con calificación “Regular” se incrementaron de 54,5% para 66,2%, mientras que las estaciones con calidad “Mala” pasaron de 5,2% para 13,0% (Tablas 16, 17). De hecho, comparando estadísticamente los valores promedios del ICA sugerido por Brown *et al.* (1970) y el ICA Brasil, se verifica que hay diferencias significativas entre ambos índices ( $p < 0.05$ ), siendo menor el valor promedio del ICA Brasil, condición que lo caracteriza como un índice más restrictivo para evaluar la calidad del agua de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute.

Estas diferencias en los resultados de la aplicación del ICA desarrollado por Brown *et al.* (1970) y del ICA Brasil, se deben al hecho de que Moretto *et al.* (2012) realizaron una calibración del ICA originalmente propuesto por la Brown *et al.* (1970), comparando sus resultados con la Normativa 357/2005 del CONAMA Brasileño (BRASIL, 2005), utilizando técnicas multivariantes, siendo que los resultados indicaron un ajuste significativo principalmente para la variable coliformes fecales, que pasó de 16% para 23% del peso total para el cálculo del índice, y la variable fósforo, que pasó de 10% para 16% del peso total, conforme se observa en la Tabla 12. Estas dos variables (coliformes fecales y fósforo) se relacionan directamente con

la eutrofización del agua, uno de los principales problemas ambientales detectados en sistemas acuáticos del Estado del Rio Grande del Sur en Brasil (Lobo *et al.*, 2010, 2014; 2015; 2016a,b, 2017; Salomoni *et al.*, 2011; Bes, *et al.*, 2012; Schuch, *et al.*, 2012, 2015; Böhm, *et al.*, 2013; Heinrich, *et al.*, 2014), que tienen como origen las aguas servidas sin tratamiento, criaderos de animales y fertilizantes usados en la agricultura. Todavía, según Tundisi (2006), esta condición caracteriza de forma generalizada los cursos de agua en toda la región Sur del Brasil, conforme resultados obtenidos por el proyecto “Brasil de las Aguas”.

Moretto *et al.* (2012) concluyeron que el ICA calibrado con los nuevos pesos presenta resultados compatibles con la Normativa 357/2005 del CONAMA, y puede ser utilizado en programas de monitoreo ambiental en ecosistemas acuáticos eutrofizados. Por estos motivos, los cambios en la calificación general del agua en la Cuenca del Río Paute, al aplicar el ICA calibrado para el Brasil, demostraron la capacidad de inferir y estimar con mayor precisión la calidad del agua de la Cuenca, cuando comparado con los resultados del ICA original propuesto por Brown *et al.* (1970), considerando aspectos relevantes como eutrofización del agua y contaminación por coliformes fecales provenientes de vertido de efluentes domésticos, la cría de animales y el uso de fertilizantes. De hecho, los resultados de la aplicación del Análisis en Componentes Principales indican que la calidad del agua de la Cuenca del Río Paute se caracteriza por presentar un gradiente de eutrofización, con destaque para las variables fosfato, demanda bioquímica de oxígeno y oxígeno disuelto. Concluimos, por lo tanto, que el ICA calibrado por Moretto *et al.* (2012) se constituye en una herramienta eficiente para el monitoreo de ecosistemas acuáticos en la Región Sur Interandina del Ecuador.

Con relación a la variable fosfato, el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015) no presenta criterios para calificar usos del agua (Tabla. 5). De esta forma, se optó por utilizar la clasificación propuesta por Sperling (1996), quien elaboró una síntesis para la concentración de fosfato total en condiciones tropicales, conforme se muestra en la Tabla 6. Esta clasificación tiene como base los distintos grados de eutrofización de un ecosistema acuático, en función de la concentración de fosfato total, y se relaciona directamente con la clasificación de los distintos usos del agua propuesta por Thornton & Rast (1994), conforme se muestra en la Tabla 7.

De esta forma, para sistemas hipereutróficos, cuya concentración de fosfato supera el valor de  $0,307 \text{ mg L}^{-1}$ , los usos atribuibles son para irrigación y producción de energía (Thornton & Rast,

1994). En la Cuenca del Río Paute, durante la serie temporal 2012 - 2017, los resultados indicaron un valor promedio para la concentración de fosfato total de  $0,73 \pm 1,51 \text{ mg L}^{-1}$  (Coeficiente de Variación, CV = 207,0%), concentración que clasifica las aguas de la cuenca como hipereutróficas (Sperling, 1996). Por lo tanto, los usos atribuibles a esta condición, para la Cuenca del Río Paute, son irrigación y producción de energía.

Concluimos, finalmente, que estos usos del agua en relación a la variable fosfato, pueden ser incorporados al Anexo 1 del Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015), condición que irá contribuir para aumentar el desempeño de programas de monitoreo ambiental en Ecuador, considerando la importancia del parámetro fosfato como indicador ambiental del grado de eutrofización de ambientes lacustres.

## 8. CONCLUSIONES

Al comparar los resultados de la evaluación de la calidad del agua en la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, durante la serie temporal 2012 - 2017, aplicando el ICA propuesto por Brown *et al.* (1970) y el ICA calibrado por Moretto *et al.* (2012) para sistemas acuáticos del Sur del Brasil, concluimos que el ICA Brasil se constituye en una herramienta eficiente para el monitoreo de ecosistemas acuáticos en la Región Sur Interandina del Ecuador, una vez que permite inferir y estimar con mayor precisión la calidad del agua, particularmente problemas relacionados a la eutrofización, como demostrado a través de la concentración promedio de fosfato total, que encuadró las aguas de la cuenca como hipereutróficas.

Con relación a la variable fosfato, el Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015) no presenta criterios para calificar usos del agua. De esta forma, se optó por utilizar la clasificación propuesta por Sperling (1996) que tiene como base los distintos grados de eutrofización de un ecosistema acuático, en función de la concentración de fosfato total, y se relaciona directamente con la clasificación de los distintos usos del agua propuesta por Thornton & Rast (1994). Las aguas de la cuenca fueron clasificadas como hipereutróficas en relación al fosfato, por lo tanto, los usos atribuibles para esta condición son irrigación y producción de energía. Concluimos, finalmente, que estos usos del agua en relación a la variable fosfato pueden ser incorporados al Acuerdo Ministerial 097-A (MAE, 2015), condición que irá contribuir para aumentar el desempeño de programas de monitoreo ambiental en Ecuador, considerando la importancia del parámetro fosfato como indicador ambiental del grado de eutrofización de ambientes lacustres.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, A. (2010). Calidad del agua: Un enfoque multidisciplinario. Instituto de Investigaciones Económicas UNAM. DF. México. p. 311.
- Alvarez, A. *et al.*, (2006). Índice de calidad del agua en la cuenca del río Amajac, Hidalgo, México: Diagnóstico y Predicción. *Revista Internacional de Botánica Experimental*, 72–83.
- Arcos, P. *et al.*, (2005). Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. *NOVA*, 3(4), p 69–79. ISSN: 1794-2470.
- Austin, D. (2012). La Situación Ambiental, Económica y de Salud de los Recursos Hídricos en la Frontera México – Estados Unidos, p. 34.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water Quality for Agriculture*. FAO of the UNITED NATIONS, Rome, Italy, 97. ISBN 92-5-102263-1
- Bauer, C. J. (2009). Represas y mercados: Ríos y energía eléctrica en Chile. *Power*, 49, 5–9.
- Bedoya, L. *et al.*, (2017) “Análisis de componentes principales para caracterización estructural de pymes manufactureras de Cartagena de Indias, Colombia”, *Lámpsakos*, no. 17, pp 52-59.
- Behar, R., *et al.*, (1997). Análisis y Valoración del Índice de Calidad de Agua (ICA) de la NSF: Caso Ríos Cali y Meléndez. (Spanish). *Ingeniería y Competitividad*.
- Bes, D., Ector, L., Torgan, L. C., & Lobo, E. A. Composition of the epilithic diatom flora from a subtropical river, Southern Brazil. *Iheringia Série Botânica*. 67(1):93-125.
- Besse-Lototskaya, A., Verdonshot, P. F. M., Coste, M., & Van De Vijver, B. 2011. Evaluation of European diatom trophic indices. *Ecological Indicators*. 11(2): 456-467.
- Böhm, J. S., Schuch, M., Düpont, A., & Lobo, E. A. 2013. Response of epilithic diatom communities to downstream nutrient increases in Castelhana Stream, Venâncio Aires City, RS, Brazil. *Journal of Environmental Protection*. 4: 20-26.
- BRASIL. Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005. Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Diário Oficial da República Federativa do Brasil, DF, 18 mar. 2005.
- Brito N., *et al.*, (2009). Características sedimentares fluviais associadas ao grau de reservação da mata Ciliar - Rio Urumajó, Nordeste Paraense. *Acta Amazonica*. 39. 173-180. 10.1590/S0044-59672009000100017.
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., Tozer, R. G. (1970). A water quality index - do we dare? *Water Sewage Works*, 117(10): 339-343.
- Castro, H. *et al.*, (2006). Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. *Ingeniería y*

Universidad, 10(2), 179–196. ISSN: 0123-2126

- CELEC E.P. Corporación Eléctrica del Ecuador, Unidad de Negocios Hidropaute, Jefatura de Gestión Ambiental y Acción Social, Banco de datos, Registros de monitoreo de calidad del agua de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute. Cuenca, Ecuador. 2017.
- Cerón, C. *et al.*, (1999). Propuesta Preliminar De Un Sistema De Clasificación De Vegetación Para El Ecuador Continental. Ecuador.
- Coello, J. *et al.*, (2015). Aplicación del ICA-NSF para determinar la calidad del agua de los ríos Ozogoché, Pichahuiña y Pomacochó-Parque Nacional Sangay – Ecuador. Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 15(30), 66–71.
- Cordero, I. (2013). Evaluación de la Gestión Territorial de la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, estrategias y líneas de acción para superarlas. Tesis Post Grado. Universidad de Cuenca. Ecuador. 27 - 35. 151p
- Córdova, J. (2015). Diseño de embalse teniendo en consideración los impactos ambientales. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Da Silva, R. (2005). Avaliação das frações de fosfato como indicadores de eutrofização de águas superficiais. Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais – Brasil. 8 – 42. 108p.
- Derisio, J. (2000) Introdução ao controle da poluição ambiental. 2.ed. São Paulo: Signus. Brasil – São Paulo.
- Donoso, M. (2002). La Cuenca del Río Paute: Diagnóstico y propuesta de manejo integral. políticas de desarrollo agropecuario. Postgrado Maestría en Población y Desarrollo Local Sustentable. Universidad de Cuenca. 4 – 31, p.221.
- Escobar Jaramillo, L. A. (2008). Indicadores ambientales sintéticos: Una aproximación conceptual desde la estadística multivariante. Gestión y Ambiente, 11(1), 121–140.
- Espinal, C. *et al.*, (2013). Evaluación de la calidad del agua en la laguna de Yuriria, Guanajuato, México, mediante técnicas multivariadas: Un análisis de valoración para dos épocas 2005, 2009-2010. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 29(3), 147–163.
- Fernández, N., Solano F. (2005). Índices de Calidad y de Contaminación del Agua. Universidad de Pamplona. ISBN 958-33-7810-0, p. 17.
- Fraile, H. *et al.*, (1995). Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses de Cernadilla y Valparaíso (Río Tera, Zamora). Limnetica, 11(2), 29–37.
- Gauch, H. (1995). Multivariate Analysis in Community Ecology. Cambridge: Cambridge University Press, 298p.

- Girão, E.G. *et al.*, (2007). Seleção dos indicadores da qualidade de água no Rio Jaibaras pelo emprego da análise da componente principal; *Revista Ciência Agronômica*, v.38, n.1; p.17-24;.
- González, V. *et al.*, (2013). Aplicacion de los Índices de Calidad de Agua NSF , DINIUS y BMWP. *Revista Gestion y Ambiente*, 16(1), 97–108.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., Ryan, P. D. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1): 9p. 2001.
- Heinrich, C. G., Leal, V. L., Schuch, M., Düpont, A., & Lobo, E. A. (2014). Epilithic diatoms in headwater areas of the hydrographical sub-basin of the Andreas Stream, RS, Brazil, and their relation with eutrophication processes. *Acta Limnologica Brasiliensia*. 26: 347-355.
- Helena, B. *et al.*, (2000). Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga river, Spain) by principal componente analysis. *Water research*, v. 34, n.3, p. 807-816, 2000.
- Hernández Torres, C. A. (2011). Análisis ambiental de las grandes centrales hidroeléctricas de Colombia aplicando metodología multiobjetivo. Universidad de la Salle: Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.
- Jackson, D. A. Stopping rules in principal components analysis: a comparison of heuristical and statistical approaches. *Ecology*, 74 (8): 2204-2214. 1993.
- Jiménez, M. *et al.*, (2006). Análisis comparativo de indicadores de la calidad de agua superficial. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 14, 53–69.
- Ledesma, C. *et al.*, (2013). Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). *Revista Ciencia Agronómica*, 44(3), 419–425.
- Ledesma, C. *et al.*, (2013). Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). *Revista Ciencia Agronómica*, 44(3), 419–425. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000300002>.
- Lobo, E. A., Heinrich, C. D., Schuch, M., Düpont, A., Costa, A. B., Wetzel, C. E., & Ector, L. (2016). Índice trófico da qualidade da água: Guia ilustrado para sistemas lóticos subtropicais e temperados brasileiros. E-Book ([www.unisc.br/edunisc](http://www.unisc.br/edunisc)). Santa Cruz do Sul: EDUNISC.
- Lobo, E. A., Heinrich, C. D., Schuch, M., Wetzel, C. E., & Ector, L. (2016). Diatoms as bioindicators in rivers. p. 245-271. In: Necchi Jr. (Ed.). *River Algae*. Springer International Publishing.
- Lobo, E. A., Schuch, M., Heinrich, C. D., Costa, A. B., Düpont, A., Wetzel, C. E., & Ector, L. (2015). Development of the Trophic Water Quality Index (TWQI) for subtropical temperate Brazilian lotic systems. *Environmental Monitoring Assessment*. 187: 354-366.

- Lobo, E. A., Wetzel, C. E., Ector, L., Katoh, K., Blanco, S., Mayama, S. (2010). Response of epilithic diatom community to environmental gradients in subtropical temperate Brazilian rivers. *Limnetica*, Madrid, v. 29(2): 323-340.
- Lobo, E. A., Wetzel, C. E., Heinrich, C. G., Schuch, M., Taques, F., & Ector, L. (2017). Occurrence of a poorly known small-sized *Nitzschia* species in headwaters streams from southern Brazil. *Nova Hedwigia*, Beiheft. 146: 229-240.
- Lobo, E. A., Wetzel, C. E., Schuch, M., & Ector, L. (2014). Diatomáceas epilíticas como indicadores da qualidade da água em sistemas lóticos subtropicais e temperados brasileiros. EDUNISC: Santa Cruz do Sul.
- López, A. *et al.*, (2003). Metodología para la calibración de modelos de calidad de aguas. *Ingeniería del agua*, [S.l.], v. 10, n. 4, p. 501-516, 2003. ISSN 1886-4996.
- López, M. (2009). Los sedimentos y su incidencia en la eutrofización de los embalses. Caso del río Lozoya. *Ingeniería Del Agua*, 16(4), 273–283.
- MAE. Acuerdo Ministerial 097-A, 30 de julio de 2015. Ecuador. Anexos del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA). Edición Especial Registro Oficial. N° 387, 4 de noviembre de 2015.
- Moretto, D. L., Panta, E., Costa, A. B., Lobo, E. A. Calibration of Water Quality Index (WQI) based on Resolution n° 357/2005 of the Environment National Council (CONAMA) Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 24(1): 29-42. 2012.
- NSF. (2017). National Sanitation Foundation. Consumer Information: Water Quality Index (WQI). Disponible em: [http://www.nsf.org/consumer/earth\\_day/wqi.asp](http://www.nsf.org/consumer/earth_day/wqi.asp).
- Peña-Caro, J. *et al.*, (2016). Aproximación al Modelo de Estimación para el Uso de Agua del Río Bogotá, Basado en el Análisis de Vertimientos en Aguas Superficiales. *Revista científica*. 3. 92.
- PERU, (2017). Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM del 7 de junio de 2017. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua. Ministerio del Ambiente. Lima – Perú.
- Posselt, E. L., Costa, A. B., Lobo, E. A. Software IQAData 2015. Registro no INPI BR 512015000890-0, Programa de Mestrado em Sistemas e Processos Industriais (PPGSPi), Programa em Tecnologia Ambiental - Mestrado e Doutorado (PPGTA), UNISC, 2015. Disponible em: <http://www.unisc.br/ppgspi>. 2015.
- Rivas, R. *et al.*, (2011). Acuerdos de monitoreo de calidad del agua en Estados Unidos de Norte América. *Revista Visión Gerencial*. Universidad de los Andes Mérida, Venezuela. 10 (1). 173 – 187. ISSN 1317-8822
- Salomoni, S. E.; Rocha, O.; Hermany, G.; Lobo, E. A. (2011). Application of water quality biological indices using diatoms as bioindicators in Gravataí River, RS, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, v.71 (4): 949-959.

- Schuch, M., Oliveira, M. A., & Lobo, E. A. (2015). Spatial response of epilithic diatom communities to downstream nutrient increases. *Water Environment Research*, 87: 547-558.
- SPERLING, M.V. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2.ed.rev. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 243p. 1996.
- Stefouli, M. et al. (2005). Monitoring and assessing internal waters (lakes) using operational space born and field measures. *European Water Publications* 9/10, p. 25-33.
- Thornton, J., RAST, W. The Management of International River Basins. In: *Qualidade de águas continentais no Mercosul*. ABRH, publicação n° 2, 420 p. 1994.
- Torres, A. (2009). Estudio de Aprovechamiento Del Lechuguín Eichhornia Crassipes, Del Embalse De la Represa Daniel Palacios Como Bioabsorbente De Metales Pesados En El Tratamiento De Aguas Residuales. Cuenca – Ecuador.
- Torres, P. *et al.*, (2009). Índices De Calidad De Agua En Fuentes Superficiales Utilizadas En La Producción De Agua Para Consumo Humano. Una Revisión Crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79–94.
- Tundisi, J. (2006). Futuro dos Recursos Hídricos no Brasil. Projeto Brasil das Águas. Disponível em <http://www.brasildasaguas.com.br/>.
- Vásquez, Z. *et al.*, (2012). Metodología para determinar niveles de Eutrofización en ecosistemas acuáticos. *Revista de La Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 1(24), 112–128.
- Vera, J. 2011. Monitoreo y control ecológico de lechuguines (Eichhornia Crassipes) en el embalse “La Esperanza”, en la cuenca del río Chone de la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista La Técnica*. N° 8, Junio-Diciembre 2012, pp. 40 – 46. ISSN: 1390-6895
- Zar, J. H. (1996). *Biostatistical Analysis*. 3<sup>a</sup> ed. New Jersey: Prentice-Hall Internacional.
- Zimmermann, C. *et al.*, (2008). Avaliação da qualidade do corpo hídrico do Rio Tibagi na região de Ponta Grossa utilizando análise de componentes principais (PCA). *Quimica Nova*, 31(7).