



**UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA**  
**CARRERA DE HIDROLOGÍA**

**ESTADO DEL ECOSISTEMA ACUÁTICO DE LA CUENCA DEL**  
**RÍO QUIMI**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN CIENCIAS DEL AGUA**

**AUTOR: DANIEL FRANCISCO SOLANO WASHIMA**

**TUTOR: PhD. JORGE EMILIO CELI SANGURIMA**

**CO-TUTOR: M.Sc. RODRIGO EDUARDO ESPINOZA BARRERA**

Napo- Ecuador

2024

## DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Daniel Francisco Solano Washima con documento de identidad 0105849665, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título ingeniero/a en Ciencias del Agua son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

Según lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y los demás aspectos vertidos en el presente documento son de mi autoría y responsabilidad.

Tena, 16 de febrero de 2024



---

Daniel Francisco Solano Washima

CI: 0105849665

## AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Daniel Francisco Solano Washima, con documento de identidad N° 0105849665, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: Estado del ecosistema acuático de la cuenca del río Quimi, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación superior.

Tena, 16 de febrero de 2024



---

Daniel Francisco Solano Washima

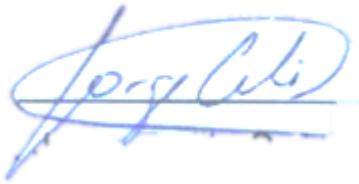
CI: 0105849665

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: “Estado del ecosistema acuático de la cuencadel río Quimi” en la modalidad de: artículo original, fue realizado por Daniel Francisco Solano Washima, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiám, para su entrega y defensa.

Tena, 16 de febrero de 2024



---

Ph.D. Jorge Emilio Celi Sangurima

C.I: 1102662010

## DEDICATORIA

A mis padres, German Solano y Marcia Washima, quienes me apoyaron y me formaron para estudiar una carrera universitaria y ser un buen profesional.

A mis hermanas, sobrino y cuñado, Elizabeth Solano, Tatiana Solano, Mauricio Velasco y Emilio Velasco, quienes con su cariño y aprecio me dieron impulso para seguir con mis metas y objetivos y así cumplirlos.

Al resto de familiares que estuvieron siempre animando a seguir adelante y no desistir.

A mi novia que su apoyo incondicional ha sido mi mayor fortaleza a lo largo de este camino académico, y esta tesis no hubiera sido posible sin tu amor, comprensión y aliento.

A mis Profesores quienes con entrega supieron enseñarme y guiarme durante la etapa universitaria.

A mis amigos, con quienes formé un lazo inigualable y me apoyaron en cada tropiezo en la universidad.

## TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
1. MATERIALES Y MÉTODOS	5
1.1 Área de estudio	5
1.2 Selección de área de muestreo	6
1.3 Muestreo	8
1.4 Evaluación de calidad Fisicoquímica del agua	9
1.4.1 Mediciones de parámetros Fisicoquímico	9
1.4.2 Índice de calidad del agua	9
1.5 Evaluación de calidad del agua con macroinvertebrados bentónicos	10
1.5.1 Muestreo de macroinvertebrados	10
1.5.2 Identificación de macroinvertebrados	10
1.5.3 Índices para macroinvertebrados	10
1.6 Evaluación de calidad del agua con metales pesados en agua	11
1.6.1 Muestreo de metales	11
1.6.2 Índice HPI	11
1.7 Ensayo de fitotoxicidad con <i>Lactuca sativa</i>	12
1.7.1 Ensayo con <i>Lactuca sativa</i>	12
1.7.2 Índice de germinación	12
1.8 Marco integrador: Índice IFEQ	12
1.9 Análisis de datos	14
2. Resultados	15
2.1 Físico – Químico	15
2.2. Macroinvertebrados	16
2.3 Metales	18
2.4 Fitotoxicidad	20
2.5 Índice integrador	21
2.6 Análisis PCA	23

3.	DISCUSIÓN .....	25
	CONCLUSIONES .....	28
	REFERENCIAS	
	ANEXOS	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Coordenadas y altitud de los puntos en los que se tomaron las muestras .....	7
<b>Tabla 1-2:</b>	Parámetros y puntajes respectivos utilizados para calcular el índice integrado que incluye los tres LOE de los parámetros de agua dulce..	13
<b>Tabla2-1:</b>	Parámetros fisicoquímicos medidos en los diferentes sitios de muestreo. Los valores resaltados con rojo están por encima de los Criterios de Calidad del Agua para la Protección de la Vida Acuática TULSMA.....	16
<b>Tabla 2-2:</b>	Valores de los metales presentes en muestras de agua medidos en los diferentes puntos de muestreo, Los valores resaltados con rojo están por encima de los Criterios de Calidad del Agua para la Protección de la Vida Acuática TULSMA.....	19
<b>Tabla 2-3:</b>	Análisis matricial integrativo de cuatro LOEs .....	22

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Localización de los 15 puntos de muestreo para el monitoreo de calidad de agua de la cuenca del Río Quimi.....	5
<b>Figura 2-1:</b>	Resultados de calidad para cada punto de muestreo de acuerdo al índice de calidad del agua (ICA).....	16
<b>Figura 2-2:</b>	Abundancia de individuos reportados en cada familia de macroinvertebrados.....	17
<b>Figura2-3:</b>	Resultados de abundancia y riqueza para cada punto de muestreo a) Abundancia y b) Riqueza.....	17
<b>Figura 2-4:</b>	Resultados de calidad para cada punto de muestreo de acuerdo a los índices AAMBI (Andean-Amazon Biotic Index).....	18
<b>Figura 2-5:</b>	Resultados de calidad para cada punto de muestreo de acuerdo al índice de Contaminación por Metales Pesados (HPI).....	20
<b>Figura2-6:</b>	Resultados de los bioensayos realizados en las pruebas de Lactuca sativa.....	21
<b>Figura 2-7:</b>	Localización de los puntos de muestreo, de verde los de menor degradación y los naranjas de mayor degradación.....	23
<b>Figura 2-8:</b>	Análisis PCA para el agua.....	24

## ÍNDICE DE ANEXOS

**ANEXO A.** Criterios de clasificación del Índice de calidad del agua ICA

**ANEXO B.** Criterios de clasificación de la calidad del agua del índice AAMBI

## RESUMEN

Este estudio evaluó la calidad del ecosistema acuático en la cuenca del Río Quimi, afectado por el proyecto minero Mirador de Ecuacorrientes en la parroquia Tundayme, cantón Gualaquiza, provincia de Morona Santiago. Se emplearon diversas metodologías, incluyendo la medición de parámetros físico-químicos, análisis de metales pesados (HPI), evaluación de macroinvertebrados (AAMBI) y ensayos de fitotoxicidad con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*). La mayoría de los puntos en el Índice de Calidad del Agua (ICA) superaron 70, indicando buena calidad, excepto el punto 13 con valores inferiores a 70, señalando calidad regular. En macroinvertebrados, P1, P3, P6 y P7 mostraron valores superiores a 120, mientras que P11 y P13 carecieron de estos organismos. En metales, la mayoría de los puntos estuvo libre de contaminación, excepto P13 con niveles superiores a 50. Las tasas de germinación en ensayos fitotóxicológicos variaron entre 72% y 98%, siendo P3 la más alta y P10 la más baja. La integración de evidencia reveló que P3 presentó el menor grado de degradación (4.37%), mientras que P13 mostró el más alto (47.26%), evidenciando el deterioro del ecosistema acuático, especialmente cerca del proyecto minero. Estos resultados resaltan la urgencia de abordar los impactos negativos de la minería para preservar la salud del ecosistema y la biodiversidad en la región afectada.

**Palabras clave:** ICA, AAMBI, Ensayos de Fitotoxicidad, HPI, gestión sostenible.

## ABSTRACT

This study evaluated the quality of the aquatic ecosystem of the Quimi river basin, affected by the Mirador mining project operated by Ecuacorrientes in Tundayme parish, Gualaquiza canton, Morona Santiago province. Several methodologies were employed, including the measurement of physicochemical parameters, heavy metal analysis (HPI), macroinvertebrate assessment (AAMBI) and phytotoxicity tests using lettuce (*Lactuca sativa*) seeds. Most of the Water Quality Index (WQI) items exceeded 70, indicating good quality, except for item 13, with values below 70, indicating fair quality. As for macroinvertebrates, points P1, P3, P6 and P7 presented values higher than 120, while points P11 and P13 lacked these organisms. As for metals, most points were free of contamination, except P13 with levels above 50. Germination rates in the phytotoxicity tests ranged from 72% to 98%, with P3 being the highest and P10 the lowest. Integration of the tests revealed that P3 showed the lowest degree of degradation (4.37%), while P13 showed the highest (47.26%), highlighting the deterioration of the aquatic ecosystem, especially near the mining project. These results underscore the urgency of addressing the negative impacts of mining to preserve ecosystem health and biodiversity in the affected region.

**Keywords:** ICA, AAMBI, Ensayos de fitotoxicidad, HPI, sustainable management.

## INTRODUCCIÓN

Las cuencas de los ríos de la amazonia ecuatoriana desempeñan un papel fundamental en las áreas de mayor diversidad biológica, pero lamentablemente, han experimentado una perturbación dinámica en sus ecosistemas. La minería metálica se ha identificado como una fuente perjudicial y contaminante en los ecosistemas acuáticos, lo que ha generado impactos ambientales directos, tales como la alteración en su calidad hídrica. Este proceso ha comprometido la integridad ambiental de la región y plantea serias amenazas para la biodiversidad y el equilibrio ecológico de los recursos hídricos [1].

En general, en la cuenca del Amazonas operan tres tipos de minería: minería subterránea, minería aluvial y minería a cielo abierto [2]. En Ecuador, existen actualmente veinte proyectos mineros en fase de exploración [3]. La minería a cielo abierto es la más abundante en la amazonia, consiste en encontrar minerales/ metales valiosos mediante la deforestación de zonas de depósito ricos en minerales y bombear agua contra las paredes del pozo para romper los sedimentos ricos en minerales y luego separar los materiales valiosos (generalmente Au y Cu) [4]. En 2015, en la región sur de la Amazonía ecuatoriana se inauguró el proyecto Mirador, una iniciativa de minería a gran escala de cobre operada por la empresa Ecuacorrientes (ECSA). Sin embargo, la llegada de esta mina a cielo abierto ha desatado conflictos marcados por la preocupación sobre los impactos ambientales y sociales asociados con su presencia. El proyecto está en una zona muy diversa y está directamente relacionado con la cuenca del río Quimi. Esta cuenca ha experimentado un deterioro notable que ha dejado como consecuencias el abandono de actividades cotidianas por parte de las comunidades aledañas. Además, se destaca la presencia de patologías cutáneas, disminución de la población de peces y otros efectos adversos en la salud de los animales domésticos que consumen del agua de estos ríos [5]. Es primordial entender la calidad de la cuenca, por lo que se requiere una determinación holística y multidisciplinaria.

Por ello, es importante evaluar el estado de los recursos hídricos y los impactos ecológicos causados por las actividades mineras, que frecuentemente se basan en las normativas ecuatorianas y sus límites permisibles, como los criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática expuestos en la normativa tulsma 2015 (Edición Especial No 387 Registro Oficial – Edición Especial No 387. Registro Oficial 097:6–26) [6]. En este contexto, se propone una investigación en la cuenca del

río Quimi mediante la integración de múltiples líneas de evidencia (LOE), para ofrecer una comprensión profunda de la salud del ecosistema acuático. Entre las líneas que se plantean se puede mencionar el análisis de los parámetros fisicoquímicos, bioindicadores como los macroinvertebrados acuáticos, análisis de metales pesados, especialmente en zonas mineras. Adicionalmente, se requiere enfoques ecotoxicológicos, como bioensayos para evaluar los impactos de manera integral.

El índice de calidad de agua (ICA) es una de las herramientas que permite identificar el estado del recurso hídrico de forma cualitativa a través de parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Este índice se ha utilizado en estudios de calidad del agua para describir las características de los sistemas hídricos. Horton (1995) desarrolló la metodología para calcular el ICA, al tomar en cuenta nueve parámetros (temperatura, pH, turbidez, coliformes fecales, OD, DBO5, TDS, nitratos, fosfatos) más utilizados para evaluar la calidad del agua, ofreciendo una herramienta para caracterizar la contaminación del agua [7]. En Dalian, China, el ICA ha sido utilizado para cuantificar las variaciones temporales y espaciales de la calidad del agua. Este análisis puede proporcionar una comprensión exhaustiva de la calidad del agua, lo que evidencia los complejos cambios en zonas de acuicultura costera [8]. En Ecuador, el ICA se ha utilizado en el río Yacuambi (*hot spot* de los Andes tropicales), cuyo estudio determinó el índice de calidad del agua diseñado por Brown [9] tales que cumplieron con las normas ecuatorianas y norteamericanas para el consumo humano, la preservación de la vida acuática y el riego [10]. A través del uso de este índice se puede determinar el estado del recurso hídrico; sin embargo, es necesario establecer otros indicadores para comprender el sistema fluvial como bioindicadores.

El biomonitoreo utilizando macroinvertebrados bentónicos acuáticos se ha utilizado eficazmente para evaluar los cambios estructurales e identificar especies sensibles a diferentes grados de contaminación [11]. Particularmente, en Ecuador se han utilizado estos bioindicadores para definir el estado de integridad biótica del ambiente acuático [12,13]. La estimación de este indicador se lleva a cabo a través de diferentes índices. Uno de los más utilizados es el índice biótico-andino (AAMBI), que posee los puntajes de las familias presentes en el área de estudio [14].

Los metales pesados, caracterizados por su elevada densidad, masa y peso atómico, representan una preocupación ambiental significativa debido a su toxicidad incluso en concentraciones bajas. Entre estos elementos se incluyen el plomo, mercurio,

manganeso, cobre, cromo hexavalente, selenio, plata, cadmio, aluminio, bario, zinc, hierro, entre otros. la contaminación de las fuentes hídricas por metales pesados provoca acidificación del agua, afecta a los ecosistemas y también afecta a las poblaciones locales. Esto genera dificultades para las comunidades que dependen de estas fuentes, ya que la presencia de metales pesados amenaza la salud de la población [15].

En Ecuador, diversos estudios han identificado la presencia de contaminantes metálicos originados en actividades mineras, lo que incrementa significativamente las probabilidades de contraer enfermedades gastrointestinales o dermatológicas, ya sea por ingesta o del contacto la misma [16]. La región amazónica ecuatoriana no es ajena a esta problemática, y las investigaciones, como la de Capparelli *et al.* (2021), destacan que los niveles de metales exceden los límites establecidos por las legislaciones, generando consecuencias en la biota acuática y la salud humana [17]. La evaluación de los niveles de metales en zonas mineras se erige como un indicador crucial de contaminación, especialmente cuando las concentraciones elevadas están directamente asociadas con impactos en el ecosistema [18]. Este hallazgo subraya la necesidad urgente de implementar medidas para abordar y mitigar la contaminación derivada de las actividades mineras, con el propósito de salvaguardar la salud de la población y preservar la diversidad biológica en la región afectada.

Para complementar estos análisis de metales pesados, es esencial incorporar enfoques eco toxicológicos que ofrezcan una visión integral de las perturbaciones sobre los recursos hídricos. Dentro de los métodos eco toxicológicos, los bioensayos de fitotoxicidad con *Lactuca Sativa* son confiables, rentables y eficientes. En la cuenca del río Napo se utilizaron estos ensayos fito toxicológicos para detectar los niveles de contaminación causados por la minería [17]. Mediante la evaluación del desarrollo de la radícula e hipocótilo los cuales constituyen indicadores Fito toxicológicos para determinar la capacidad de establecimiento, desarrollo y detección de áreas contaminadas a causa de actividades antropogénicas [19,20].

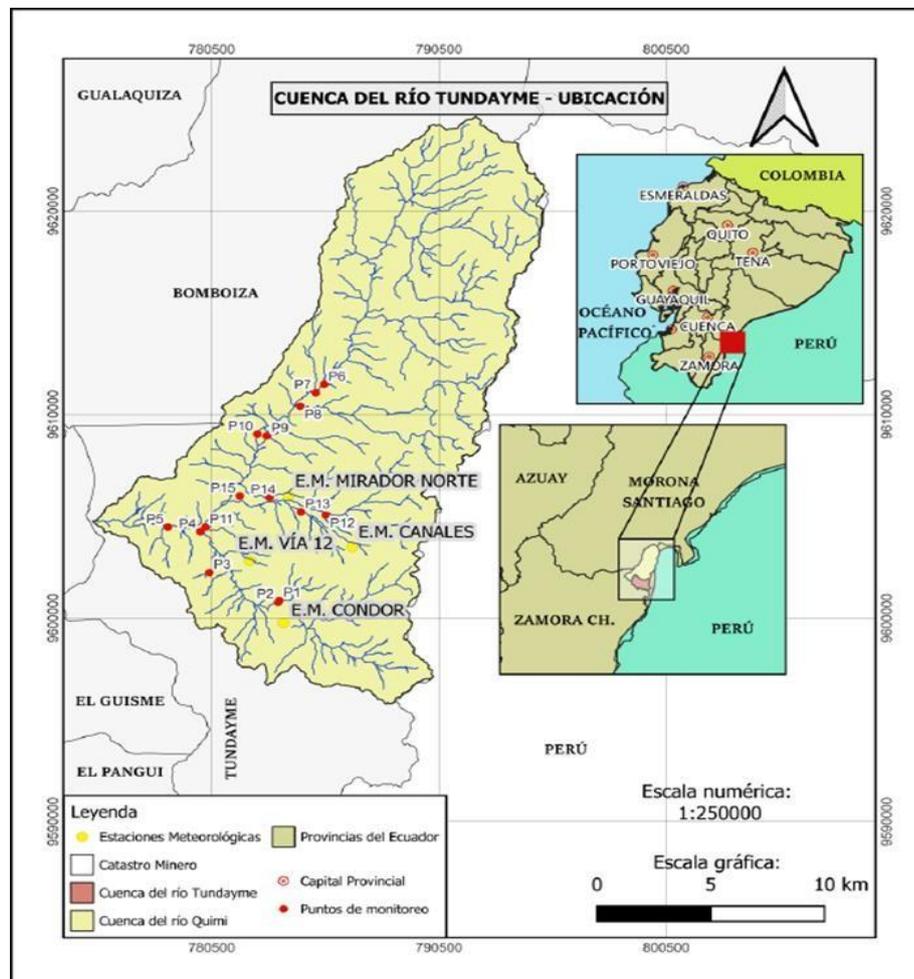
Los objetivos principales de este estudio fueron evaluar el estado del ecosistema acuático basado en varios LOEs dentro de la cuenca del Quimi. Para ello es esencial caracterizar el ecosistema de la cuenca de los ríos según sus (1) parámetros fisicoquímicos (2) determinar el índice de marcadores biológicos como macroinvertebrados, (3) metales pesados en el agua y (4) analizar la toxicidad mediante

bioensayos [21,22]. Mediante los datos e interpretaciones a través de múltiples líneas de evidencia (LOE) se pretende examinar los efectos de la actividad minera dentro de esta región, al utilizar como punto de partida la evaluación y control de la calidad de agua a futuro. Este es un paso crucial para la toma de decisiones por parte de los actores clave y la gestión sostenible en la cuenca.

# 1. MATERIALES Y MÉTODOS

## 1.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de la parroquia Tundayme. Esta zona está caracterizada por una temperatura media anual de 15°C y una precipitación promedio de 3475 mm. Tiene una elevación que varía entre los 800 m.s.n.m y los 2300 m.s.n.m. La zona de estudio posee afecciones por actividades antropogénicas. Entre las actividades más destacadas se encuentra la minería, la cual ha generado cambios en el ciclo del agua, las coordenadas de la salida de la cuenca son (775468,19 – 9604856,349) wgs-84 zona 17 sur.



**Figura 1-1:** Localización de los 15 puntos de muestreo para el monitoreo de calidad de agua de la cuenca del Río Quimi.

Realizado por: Daniel Solano, 2024

## 1.2 Selección de área de muestreo

Para la selección de los puntos de muestreo se siguió la metodología *Guidance Manual for Optimizing Water Quality Monitoring Program Design*, establecida por el CCME (2015) [23]. En la cual se optimizaron los puntos de muestreo a través del nivel jerárquico de la cuenca del río Quimi, como lo establecen Sanders *et al.* (1986) [24], tomando en cuenta que los puntos establecidos tienen las siguientes características, puntos de control a los ubicados en las cabeceras de las subcuencas, puntos con contaminación media en la mitas de las subcuencas y puntos y los más degradados en las partes bajas de las subcuencas, los puntos están distribuidos alrededor de la cuenca más grande que es la del Río Quimi (Figura 1) y los puntos con sus respectivas coordenadas y altitudes están expuestos en la (Tabla 1).

**Tabla 1-1:** Coordenadas y altitud de los puntos en los que se tomaron las muestras  
**Realizado por:** Solano, Daniel, 2024

<b>Coordenadas</b>		<b><u>P1</u></b>	<b><u>P2</u></b>	<b><u>P3</u></b>	<b><u>P4</u></b>	<b><u>P5</u></b>	<b><u>P6</u></b>	<b><u>P7</u></b>	<b><u>P8</u></b>	<b><u>P9</u></b>	<b><u>P10</u></b>	<b><u>P11</u></b>	<b><u>P12</u></b>	<b><u>P13</u></b>	<b><u>P14</u></b>	<b><u>P15</u></b>
WGS-84 ZONA 17 SUR	X	733478	783422,20	780400	780010,2	778575	785455,5	784957,4	784390,7	782926,1	782518,6	780224	785518,6	784422,7	783044,3	781741,3
	Y	9601029,2	9600952,5	9602399,3	9604407,3	9604629,4	9611486,6	9610973,5	9610563,7	9609110,9	9609201,1	9604628	9605221,9	9605372,5	9606089,4	9606157,4
Altitud		1130	1110	947	778	750	1006	959	912	865	847	778	1095	1058	1058	775

### 1.3 Muestreo

Se estableció quince sitios de muestreo a lo largo de la cuenca del río Quimi, y se la dividió en 3 subcuencas: la subcuenca del río Tundayme, la del río Wawayme y la del río Quimi. Los sitios P1 al P4 y P11 están ubicados en la subcuenca del río Tundayme, las aguas del río se bifurcan y posteriormente se reconecta en su desembocadura con el río Quimi. Los puntos del P5 al P10 se distribuyeron en la subcuenca del río Quimi, y los sitios restantes P12 al P15 se ubicaron en la subcuenca del río Wawayme, estos puntos también se seleccionaron de acuerdo a lo establecido en la selección de muestro y también todos estos puntos tienen acceso de vías para poder llegar fácilmente al sitio de muestreo.

El muestreo de campo se realizó en dos salidas de campo, la primera en mayo de 2023 y la segunda en septiembre del 2023. Para cada sitio, se recolectaron muestras de agua superficial y macroinvertebrados tomadas en la primera salida y en la segunda salida se tomó muestras de agua para análisis de metales.

Se tomaron en total 75 muestras de agua superficial, en el centro del cauce del arroyo siguiendo las recomendaciones de la NTE INEN 2176 (INÉN, 2013) [25]. Para las muestras fisicoquímicas se utilizaron quince frascos de plástico de 500 ml y quince frascos de 1 lt para análisis de sólidos totales disueltos. Para los análisis microbiológicos se necesitó quince frascos estériles de 100 mL, para las muestras de metales se usó quince frascos de 1 lt. Las botellas se enjuagaron tres veces con agua de la muestra para los parámetros F-Q, sólidos totales disueltos y para la toma de muestras microbiológicas y de metales la toma fue directa. Las muestras se etiquetaron y transportaron en refrigeración a (4°C) al Laboratorio Nacional de Referencia del Agua (LNRA) para realizar los análisis de los parámetros F-Q, sólidos totales disueltos y sólidos totales suspendidos.

En cuanto a los análisis microbiológicos, las muestras se filtraron 100 ml en cada muestra, luego se incubaron por 48 h. Para los análisis de metales, se enviaron a un laboratorio externo en la ciudad de Quito.

## **1.4 Evaluación de calidad Físicoquímica del agua**

### **1.4.1 Mediciones de parámetros Físicoquímico**

La temperatura, oxígeno disuelto (OD), conductividad (EC), sólidos disueltos totales (TDS) y pH se midieron in situ través de la sonda multiparamétrica (YSI ProfessionalPlus). En el laboratorio (LRNA) se realizaron análisis de color, turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales, coliformes totales, fluoruro, cloruro, nitrato, bromuro, nitrito, fosfato, sodio, amonio, potasio, magnesio, calcio y carbono. Los análisis de turbidez fueron realizados con un turbidímetro (HACH TL 2300). EIDQO se determinó mediante el método del dicromato (prueba de vial HACH TNT822). Para la medición de los sólidos totales disueltos y sólidos totales suspendidos se determinaron mediante el método Standard Methods 2540 D y 2540 B. Los coliformes fecales se midieron de acuerdo con los métodos estándar APHA 2017 [26].

Los fosfatos totales ( $\text{PO}_3\text{-4}$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), cloro ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), amoníaco total ( $\text{NH}_3$ ), se midieron mediante cromatografía iónica (anión Shodex IC-52 4E y catión Shodex IC YS-50).

### **1.4.2 Índice de calidad del agua**

El índice de calidad del agua (ICA) es un índice general para clasificar los recursos hídricos superficiales en función de la calidad del agua [27]. En este estudio se hizo una modificación al ICA calculado en Brown et al, se trabajó con nueve parámetros que incluyen el pH, la temperatura, el OD, el STD, la turbiedad, los coliformes fecales, los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y los fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), el parámetro que se modificó fue el DBO5 por el DQO, utilizando la metodología Alvear et al. (2022) [28] donde hacen una modificación del ICA, cada parámetro tiene una contribución diferente en la calidad del agua. A cada parámetro se le asignó un peso en función de su efecto percibido sobre la vida acuática para calcular el ICA [29]. El índice oscila entre 0 y 100. La puntuación del ICA se clasifica en cinco categorías: Excelente (100-91), Buena (90-71), Media (70-51), Mala (50-26) y Muy mala (25-0), como se muestra en anexos (tabla 2).

El ICA está definido con la siguiente ecuación, de Brown et al. (1970) [9].

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n w_i * Q_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

## 1.5 Evaluación de calidad del agua con macroinvertebrados bentónicos

### 1.5.1 Muestreo de macroinvertebrados

Para la fase de colecta de macroinvertebrados acuáticos, se procedió a tomar muestras en quince sitios en la cuenca de los ríos Tundayme (Sitios T), Quimi (Sitios Q) y Wawayme (Sitios W). Para evaluar la diversidad acuática y conocer el estado de la calidad del agua con índices bióticos de macroinvertebrados acuáticos. Se utilizó la metodología multi - hábitats descrita por Gabriels *et al.* (2010) [30]. Encada punto de monitoreo se recolectaron muestras de diferentes hábitats durante tres minutos usando una red de inmersión D-frame (500  $\mu$ m). Este método es ampliamente recomendado para evaluar la calidad del agua [31]. Las muestras decada punto de monitoreo se colocaron en bolsas de plástico, posteriormente se colocaron en alcohol al 96% para asegurar la conservación de los macroinvertebrados.

### 1.5.2 Identificación de macroinvertebrados

Los macroinvertebrados fueron clasificados e identificados mediante las claves taxonómicas especializadas de Domínguez y Fernández (2009), Darrigran (2013) y Palma (2013) [32–34]. Se obtuvo hasta familia de macroinvertebrados, teniendo en cuenta que es el taxón práctico más bajo. Luego, se calculó el índice biótico- andino (AAMBI), diversidad de Shannon, diversidad de Simpson, Diversidad Verdadera (Números de Hill), riqueza de taxones y abundancia total para cada sitio de muestreo.

### 1.5.3 Índices para macroinvertebrados

El índice Andean-Amazon Biotic Index (AAMBI) consiste en la suma de valores numéricos asignados a cada familia, estos oscilan entre 1 al 10, siendo 1 el nivel más tolerante a contaminación hasta 10 para los más sensibles. Luego, la puntuación final se clasifico en diferentes categorías de calidad de agua: “Mala” los valores van de 0 a 35; “Regular” entre 6 y 49; “Buena” entre 50-89; “Muy Buena” entre 90 y 120 y finalmente, para una “Excelente” calidad de agua valores mayores a 121, como se muestra en anexos (Tabla 3).

## 1.6 Evaluación de calidad del agua con metales pesados en agua

### 1.6.1 Muestreo de metales

Para el muestreo de metales pesados se tomaron muestras de agua en los 15 puntos establecidos en la selección de área de estudio con el objetivo de evaluar la concentración de metales pesados en agua conjunto con parámetros, físico químicos, macroinvertebrados y tener una visión más holística del ecosistema acuático.

Posterior a esto se realizó un proceso de filtrado con (filtros N°45 um) de cada muestra, luego se procedió a realizar la digestión ácida de acuerdo con los métodos estándar (EPA 3050) se utilizó ácido nítrico a concentración 1:1 (HNO<sub>3</sub>) [35]. Para el análisis de metales presentes en agua se envió al laboratorio externo LASA, las muestras fueron analizadas con el método de ensayo EPA 6020, APHA 3125.

### 1.6.2 Índice HPI

El índice de Contaminación por Metales Pesados (HPI) es la técnica para evaluar la predominancia de los compuestos en la concentración de metales pesados en localidad general del agua, que atribuyen una categorización ( $W_i$ ) a cada parámetro seleccionado [36]. Se utilizaron los siguientes parámetros para calcular el HPI: Plomo, Manganeso, Cobalto, Berilio, Cromo, Boro, Cadmio, Cobre, Selenio, Plata, Aluminio, Bario, Zinc, Níquel y Arsénico. La categorización tiene un valor entre 0 y 1, que refleja el valor relativo de un parámetro personal y se puede conceptualizar como inversamente proporcional al estándar recomendado ( $S_i$ ) para cada parámetro [37].

En la presente fórmula, el peso unitario ( $W$ ) se toma como valor inversamente proporcional al estándar recomendado ( $S_i$ ) del correspondiente parámetro [35].

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n w_i * Q_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

## **1.7 Ensayo de fitotoxicidad con *Lactuca sativa***

### **1.7.1 Ensayo con *Lactuca sativa***

En las pruebas de fitotoxicidad se utilizó el ensayo por germinación y elongación de raíces de semillas de *Lactuca sativa*, con una tasa de germinación del 85%. Se recolectaron muestras de agua de acuerdo con la metodología utilizada por Cappalleri *et al.* (2020) [19]. Se repartieron 20 semillas en un papel filtro en cajas Petri previamente lavadas, con 5 mL de muestra de agua. Se realizaron cuatro repeticiones para cada muestra de agua y cuatro para el control (agua dura). Posteriormente, las cajas Petri de 90 mm se incubaron a 25°C, a oscuridad durante 120 horas.

### **1.7.2 Índice de germinación**

Finalmente, se analizaron las alteraciones en la germinación y el desarrollo normal de las plántulas mediante el índice de germinación-raíz (IG) que considera la elongación de la raíz y el porcentaje de germinación con respecto a los controles de laboratorio se evaluaron con la prueba t de Student. Anteriormente, se evaluó, la normalidad y homocedasticidad de los datos, en cuanto a longitud de la raíz se evaluó mediante las pruebas Shapiro-Wilks y Fligner, respectivamente.

La longitud media de las plántulas fue significativamente menor o mayor que la del control, por lo que se asume que las diferencias significativas del valor p calculado fue  $\leq 0,05$ . Las muestras se clasifican en tóxicas y no tóxicas, cuando carece de crecimiento de la raíz o epicotíleo. Una descripción completa del protocolo se desarrolló en Young *et al.* (2016) [38].

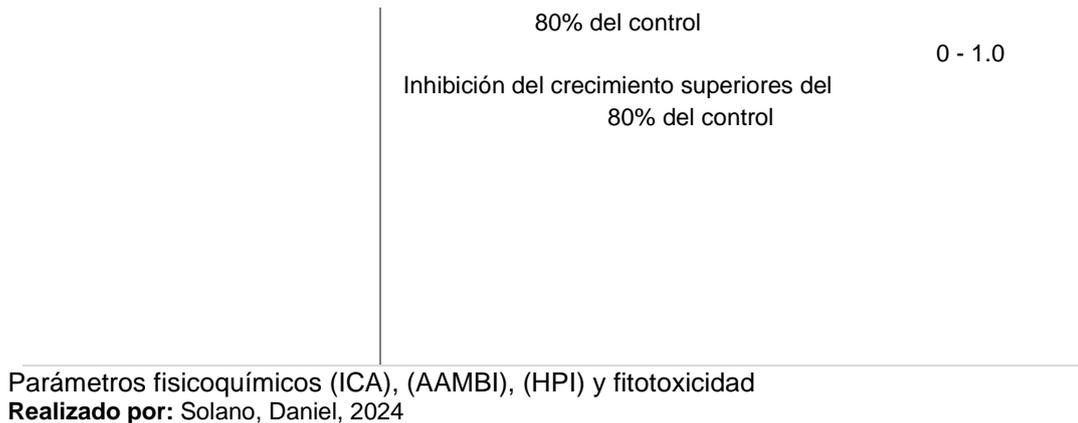
## **1.8 Marco integrador: Índice IFEQ**

Se realizó una adaptación de Galarza *et al.* (2021) [39], del índice integrado cuantitativo en el que se usó cuatro líneas de evidencia (LOEs). Estas son: parámetros fisicoquímicos (ICA), vida acuática (AAMBI), metales en agua (HPI) y fitotoxicidad (IG). A continuación, asignamos valores normalizados de 0 a 5 a cada índice dependiendo del criterio analizado (Tabla 2). La suma de puntajes asignados se interpretó como el grado de impacto ambiental.

Para la LOE de parámetros fisicoquímicos asignamos la puntuación más alta a los valores de ICA categorizados como excelentes (91-100) y la puntuación más baja cuando los valores estaban en la categoría muy mala (0 a 25). Para la LOE de vida acuática la puntuación más alta la asignamos a los valores AAMBI clasificados como “excelentes” (> 100) y la puntuación más baja se clasificaron como “malos” (<35). Para la LOE de metales pesados en agua (HPI) asignamos a los valores de buena calidad a los resultados (< 25) y la puntuación más baja cuando los valores del HPI se clasificaron como extrema contaminación a los valores (> 100). Para la LOE de fitotoxicidad siempre que el crecimiento potenciado o la inhibición difiere hasta en un 20% del control asignamos la puntuación más alta de 5 (impacto ambiental bajo) y cuando la inhibición del crecimiento difería en un 80% del control asignamos la puntuación más baja (alto impacto ambiental).

**Tabla 1-2:** Parámetros y puntajes respectivos utilizados para calcular el índice integrado que incluye los tres LOE de los parámetros de agua dulce.

	<b>RANGO DE LAS CATEGORÍAS</b>	<b>PUNTUACIÓN</b>
<i>Parámetros físico-químicos</i>	<b>1. ICA</b>	
	Excelente (91 - 100)	4.55 – 5
	Buena (71 - 90)	3.55 - 4.54
	Media (51 - 70)	2.55 - 3.54
	Malo (26 - 50)	1.25 - 2.54
	Muy Malo (0 - 25)	0 - 1.24
<i>Vida acuática</i>	<b>2. AAMBI</b>	
	Buena (valores > 120)	5
	Aceptable (90-120)	3.75 - 4.99
	Regular (50-89)	2.55 - 3.70
	Mala (36 - 49)	1.25 - 2.50
	Pésima (<35)	0- 1.2
	<b>4.HPI</b>	
	Buena (< 25)	4 - 5
	Contaminación moderada (26-50)	3 – 3.99
	Contaminada (51-75)	2 – 2.99
Muy Contaminada (76–100)	1 – 1.99	
Extrema Contaminación (> 100)	0 – 0.99	
<i>Potencial tóxico</i>	<b>5. ÍNDICE DE GERMINACIÓN</b>	
	Aumento del crecimiento hasta 30% del control o inhibición hasta 20% del control	4.1 – 5
	Aumento del crecimiento entre 31% y 60% del control o inhibición entre 21% y 40% del control	3.1 - 4.0
	Aumento del crecimiento arriba de 60% del control o inhibición entre el 41% y 60% del control	2.1 - 3.0
Inhibición del crecimiento entre 61% y	1.1 - 2.0	



## 1.9 Análisis de datos

La integración de los cuatro LOE (parámetros fisicoquímicos, exposición a metales, monitorización biológica y bioensayos) se llevó a cabo utilizando un índice cuantitativo integrado que utiliza la matriz de decisión completa para los cuatro LOE. Mediante las clases de valores normalizados de 0 a 5 a cada una de las LOE en función de múltiples criterios (Tabla 4). La suma de las puntuaciones asignadas a cada sitio puede interpretarse como el grado de impacto ambiental, donde el valor máximo del índice es 20 (es decir, no se observa degradación) y el valor mínimo del índice es 0 (es decir, degradación total).

Se utilizó el análisis de componentes principales (PCA) para explorar la relación entre los parámetros fisicoquímicos, las concentraciones de metales, los valores de AAMBI y los resultados de los bioensayos de toxicidad en las muestras de agua. En este análisis solo se conservaron los valores de Na, K, Mg, Ca y los parámetros TSS, ST, OD, color, dureza y conductividad y los índices de ICA, AAMBI, HPI e IG. Todas las variables se normalizaron por sitio, estableciendo la suma de cuadrados igual a 1. Se investigaron los dos primeros componentes principales (CP) y se probaron sus correlaciones con cada variable a través de la prueba de correlación de Pearson.

Además, para el análisis estadístico se utilizó el software R studio y GraphPad Prism [40].

## **2. RESULTADOS**

### **2.1 Físico – Químico**

Según los resultados obtenidos, se registró que el oxígeno disuelto (OD) el 80% de los puntos de muestreo está por encima de la normativa, cumpliendo así con los estándares establecidos con la normativa TULSMA. No obstante, se registraron valores inferiores a la normativa correspondientes a los dos puntos P12 y P13 con 75,6 y 76,8 respectivamente.

En cuanto a los valores de pH, se mantuvieron entre 6,13 a 7,99, cabe recalcar que la normativa está dentro del rango 6.5 a 9, por lo que la mayoría de puntos de muestreo oscilan en ese rango. Sin embargo, se identificaron valores fuera del rango permisible en los puntos P1 y P15. La temperatura del agua estuvo entre 19,2 y 25 °C. Mientras que, la turbidez osciló 0,8 a 66,4 ntu; se destacó que los puntos P4, P5, P13 y P15, presentaron valores fuera del rango permisible según la normativa TULSMA.

DQO oscila entre 5,1 a 37,6 mg/L, la conductividad varía de 15,6 a 855 us/cm, sólidos disueltos totales de 11.5 a 632 mg/L, coliformes fecales entre 4 a 146 ufc/mL y coliformes totales de 150 a 668 ufc/mL (Tabla 3). Estos parámetros se mantuvieron dentro de la normativa.

**Tabla 2-1:** Parámetros fisicoquímicos medidos en los diferentes sitios de muestreo. Los valores resaltados con rojo están por encima de los Criterios de Calidad del Agua para la Protección de la Vida Acuática TULSMA

Parámetro	Unidad	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	TULSM A
<i>T</i>	(C°)	20,4	19,2	21,2	28	24,4	19,5	20	19,4	21	20,1	22,1	20,5	21,4	22,2	25	22.0- 28.0
<i>OD</i>	%	106	106	96	95	100	82	90	81,5	103	101	107	75,6	76,8	83,4	104	> 80
<i>Cond.</i>	us/cm	15,6	35,3	74,9	109	44,1	69,4	83,5	21,8	59,3	24,4	39,2	123,5	855	83,2	63,7	1000
<i>TDS</i>	mg/L	11,5	26,1	55,4	80	32,6	51,4	61,8	16,1	43,9	18,1	29,0	91,4	632,7	61,6	47,1	1000
<i>Ph</i>	-	6,29	6,54	6,77	7,3	6,74	7,11	7,39	7,24	7,21	6,88	6,8	7,02	7,99	7,03	6,13	6.5 - 9
<i>Color</i>	Pt-Co	133	62	15	104	273	3	5	159	0	188	98	38	470	23	132	-
<i>Turbidez</i>	NTU	3,1	2,7	3,5	17	13,2	1,23	0,7	1	0,8	2,4	2,6	6	66,4	4,4	10,7	10
<i>Col. fecales</i>	UFC/ml	88	4	26	20	82	8	12	10	14	16	122	34	24	4	146	200
<i>Col. totales</i>	UFC/ml	528	190	306	454	496	310	252	244	328	244	480	400	150	212	668	3000
<i>SST</i>	(mg/L)	1	7	9	10	11	6	3	5	4	2	7	24	46	17	13	130
<i>DQO</i>	(mg/L)	19	10,3	ND	ND	29,5	ND	ND	24,4	ND	5,1	ND	ND	ND	ND	37,6	40

\*Los recuadros en rojo exceden el límite permisible de cada parámetro

Realizado por: Solano, Daniel, 2024

En base en los parámetros fisicoquímicos calculamos el ICA, donde se obtienen puntuaciones entre 69 y 88 (Figura 2). La mayoría de puntos muestreados en la cuenca del río Quimi, obtuvieron valores superiores a 71, lo que otorga una categoría de calidad de agua “muy buena”. No obstante, el punto 13, ubicado en la subcuenca del río Wawayme, obtuvo un valor de 69 situándose en la categoría “buena” calidad de agua.

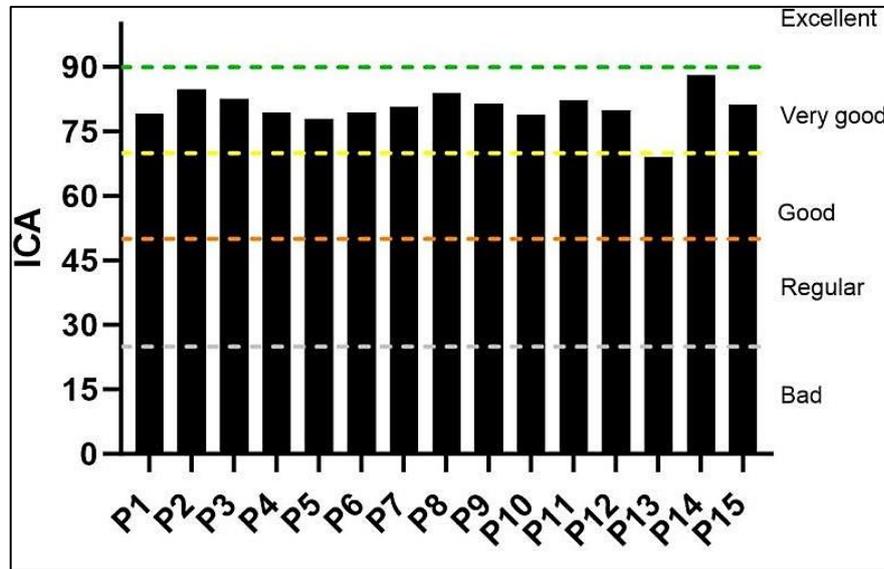
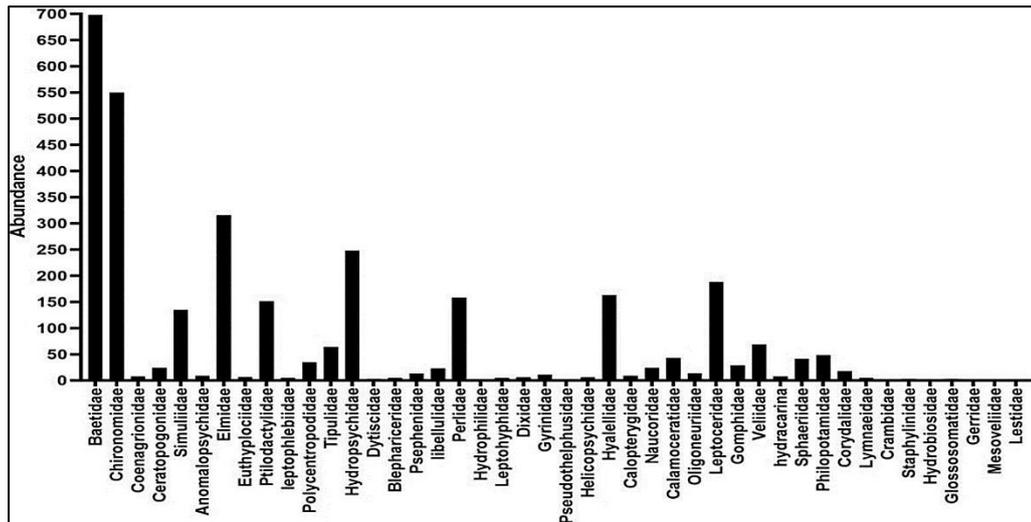


Figura 2-1: Resultados de calidad para cada punto de muestreo de acuerdo al índice de calidad del agua (ICA).

Realizado por: Solano, Daniel, 2024.

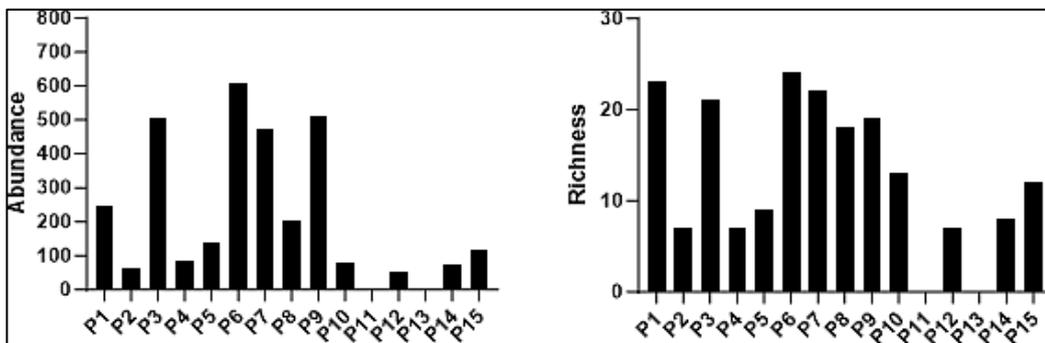
## 2.2. Macroinvertebrados

Se colectaron un total de 3156 macroinvertebrados en los diferentes puntos de la cuenca, donde se encontraron 44 familias. *Beatidae* fue la familia más abundante, con un total de 698 individuos. Esto representa un 22% del total (Figura 3), mientras que, las familias *Pseudothelphusidae*, *Hydrobiosidae* y *Lestidae* fueron las menos abundantes. Cada familia tenía al menos un solo individuo, lo que representa un 0.1% del total.



**Figura 2-2:** Abundancia de individuos reportados en cada familia de macroinvertebrados  
**Realizado por:** Solano, Daniel, 2024.

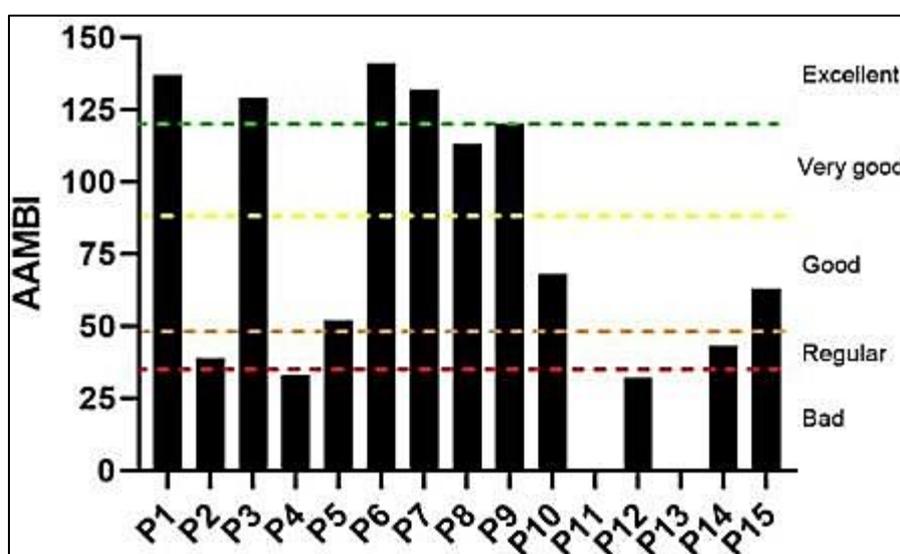
El sitio P6 tuvo la mayor abundancia de individuos (609), mientras que en los sitios con menor abundancia fueron P11 y P13 no se encontraron macroinvertebrados (Figura 4a). La riqueza familiar fue mayor en los sitios P1, P3, P6 y P7, que superan las 20 familias en cada punto. Por otra parte, los sitios con menor valor de riqueza son P2, P4 y P12, cada uno con un valor de 7 familias, sin contar con los puntos P11 y P13, donde no se encontró macroinvertebrados (Figura 4b).



**Figura 2-3:** Resultados de abundancia y riqueza para cada punto de muestreo a) Abundancia y b) Riqueza  
**Realizado por:** Solano, Daniel, 2024.

La evaluación de la calidad del agua basada en el índice AAMBI (Figura 5) mostró que el 60% de los sitios se encuentra entre los rangos de buena hasta excelente, lo que indica buena calidad del agua, mientras que el 40% restante tiene puntuaciones entre regular y mala, lo que indica una mala calidad del agua (figura 5). Los sitios P1, P3 pertenecientes a las sub cuenca del Río Tundayme y los puntos P6 y P7 de la sub cuenca del Río Quimi, fueron clasificados como excelente calidad de agua. Los puntos P8 y P9 de

la cuenca media de sub cuenca del Río Quimi tuvieron clasificación de muy buena. Por otro lado, el punto P5 de la parte baja de la sub cuenca del Río Quimi y P15 de la parte baja de la sub cuenca del Río Wawayme se clasificaron como buena. Para los puntos P2 perteneciente a la sub cuenca del Río Tundayme y el P14 de la sub cuenca del río Wawayme su clasificación fue regular. Todos los demás puntos presentaron mala calidad de agua según el AAMBI, algunos como el P11 y P13 denotaron una ausencia total de macroinvertebrados, ambos puntos ubicados en la sub cuenca del Río Wawayme, lo que puede estar relacionado con las altas concentraciones de metales encontradas en estos sitios como es el caso del punto P13 por su cercanía al proyecto minero [35] y en el caso del P11 puede darse por el efecto negativo que tienen las estructuras como puentes o canales a la comunidad de macroinvertebrados [17].



**Figura 2-4:** Resultados de calidad para cada punto de muestreo de acuerdo a los índices AAMBI (*Andean-Amazon Biotic Index*)  
 Realizado por: Solano, Daniel, 2024.

### 2.3 Metales

Los estándares de calidad del agua fueron superados por al menos uno de los siguientes metales en todos los sitios: Cd, Cu, Zn, Al, Mn y Ni (Tabla 6). El sitio con el mayor número de metales que superaron los estándares de calidad fue el P13. El Cu estuvo por encima de los estándares de calidad para todos los sitios, donde el P13 fue el punto con mayor concentración de este metal. El Al estuvo por encima del límite de contaminación en el 66% de los sitios.

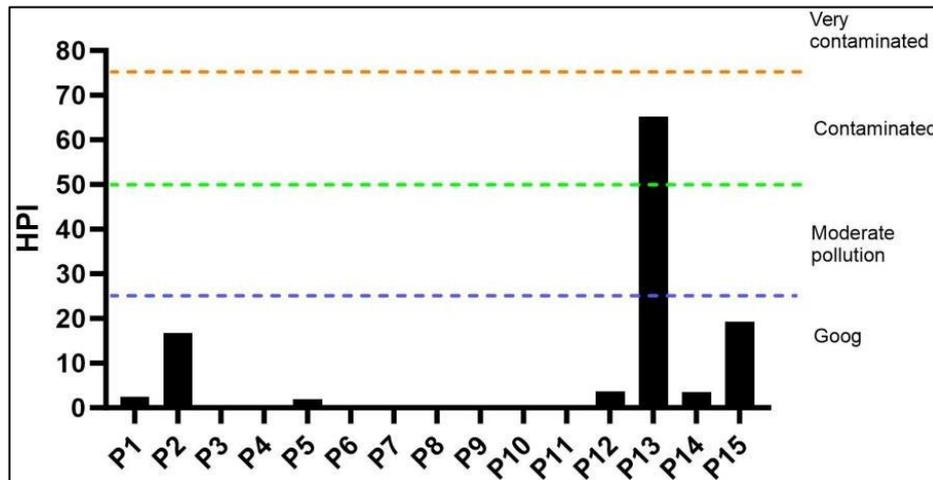
**Tabla 2-2:** Valores de los metales presentes en muestras de agua medidos en los diferentes puntos de muestreo, Los valores resaltados con rojo están por encima de los Criterios de Calidad del Agua para la Protección de la Vida Acuática TULSMA

Parámetro	Unidad	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	TULSMA
Arsénico	ug/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,05
Boro	ug/L	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,75
Bario	ug/L	0,042	0,06	0,12	0,1	0,037	0,127	0,086	0,028	0,17	0,029	0,028	0,157	0,081	0,1229	0,072	1
Cadmio	ug/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,001
Cromo	ug/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,032
Cobre	ug/L	0,019	0,14	0,012	0,012	0,016	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,02	4,96	0,029	0,11	0,005
Zinc	ug/L	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,3	0,02	0,03	0,03
Plomo	ug/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001
Plata	ug/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,01
Aluminio	ug/L	0,29	0,1	0,24	0,27	0,36	0,08	0,08	0,2	0,09	0,23	0,1	0,21	1,12	0,22	0,4	0,1
Berilio	ug/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,1
Cobalto	ug/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,084	0,002	0,002	0,2
Manganeso	ug/L	0,02	0,55	0,02	0,21	0,04	0,003	0,006	0,005	0,008	0,008	0,002	0,6	6,424	0,053	0,16	0,1
Níquel	ug/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,031	0,002	0,002	0,025
Selenio	ug/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,02	0,002	0,002	0,001

\*Los recuadros en rojo exceden el límite permisible de cada parámetro

Realizado por: Solano, Daniel, 2024

La evaluación de la calidad del agua basada en el índice HPI (Figura 6) mostró que la mayoría de sitios obtuvieron valores < 25, por lo que se encuentra en los rangos de muy buena, lo que indica buena calidad del agua. Mientras que el punto 13, al poseer un valor >50, se encuentra en la categoría de contaminada, por lo que indica que es un agua contaminada por metales pesados (figura 6).

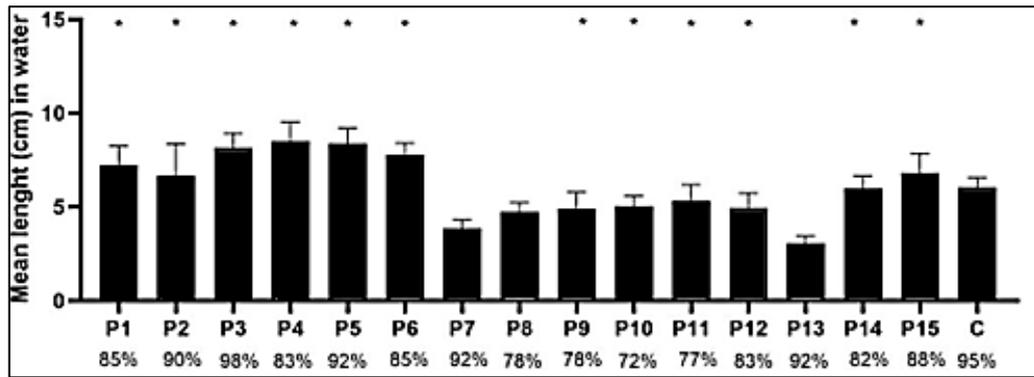


**Figura 2-5:** Resultados de calidad para cada punto de muestreo de acuerdo al índice de Contaminación por Metales Pesados (HPI).

Realizado por: Solano, Daniel, 2024

## 2.4 Fitotoxicidad

Las tasas de germinación de las semillas de *L. sativa* fueron del 72 al 98% en las muestras de agua y del 95% en el control experimental. Con respecto a la fitotoxicidad del agua (Figura 7), las semillas de los sitios P1 (85%, germinación), P2 (90%, germinación), P3 (98%, germinación), P4 (83%, germinación), P5 (92%, germinación), P6 (85%, germinación) y P15 (88%, germinación) mostraron un mayor crecimiento de las raíces, con respecto al control. Mientras que los puntos P7 (92%, germinación), P8 (78%, germinación), P9 (78%, germinación), P10 (72%, germinación), P11 (77%, germinación), P12 (83%, germinación), P13 (92%, germinación) y P14 (82%, germinación) mostraron un menor crecimiento de las raíces, con respecto al control.



**Figura 2-6:** Resultados de los bioensayos realizados en las pruebas de *Lactuca sativa*  
**Realizado por:** Solano, Daniel, 2024.

Los datos representan la longitud media  $\pm$  la desviación estándar, (\*) presenta diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) los números debajo de las barras muestran los porcentajes de germinación ( $n = 20$ ).

## 2.5 Índice integrador

Los diferentes LOE se utilizaron para clasificar los diferentes sitios de muestreo según el nivel de impacto o degradación. Los resultados mostraron que los sitios que tuvieron los puntajes más altos P3 (19,13), P6 (18,25) y P1 (18,11) que equivale al 4,37%, 8,73% y 9,45% de degradación, lo que indica los impactos ecológicos más bajos en comparación con los otros sitios. Por otro lado, los sitios P13 (10,55), P11 (13,06) y P12 (14,13) fueron los más afectados por las diferentes fuentes de contaminación, cada uno con un porcentaje de degradación del ecosistema de 47%, 34% y 29,35% (tabla 5), también esto se puede observar en la (figura 8).

Las líneas de investigación como parámetros fisicoquímicos, metales en agua y fitotoxicidad presentan valores altos; es decir, indicadores de mejor calidad. Mientras que la evaluación por vida acuática mediante macroinvertebrados es el indicador más sensible, con valores bajos que claramente son afectados por las actividades antropogénicas en el área de estudio.

**Tabla 2-3:** Análisis matricial integrativo de cuatro LOEs

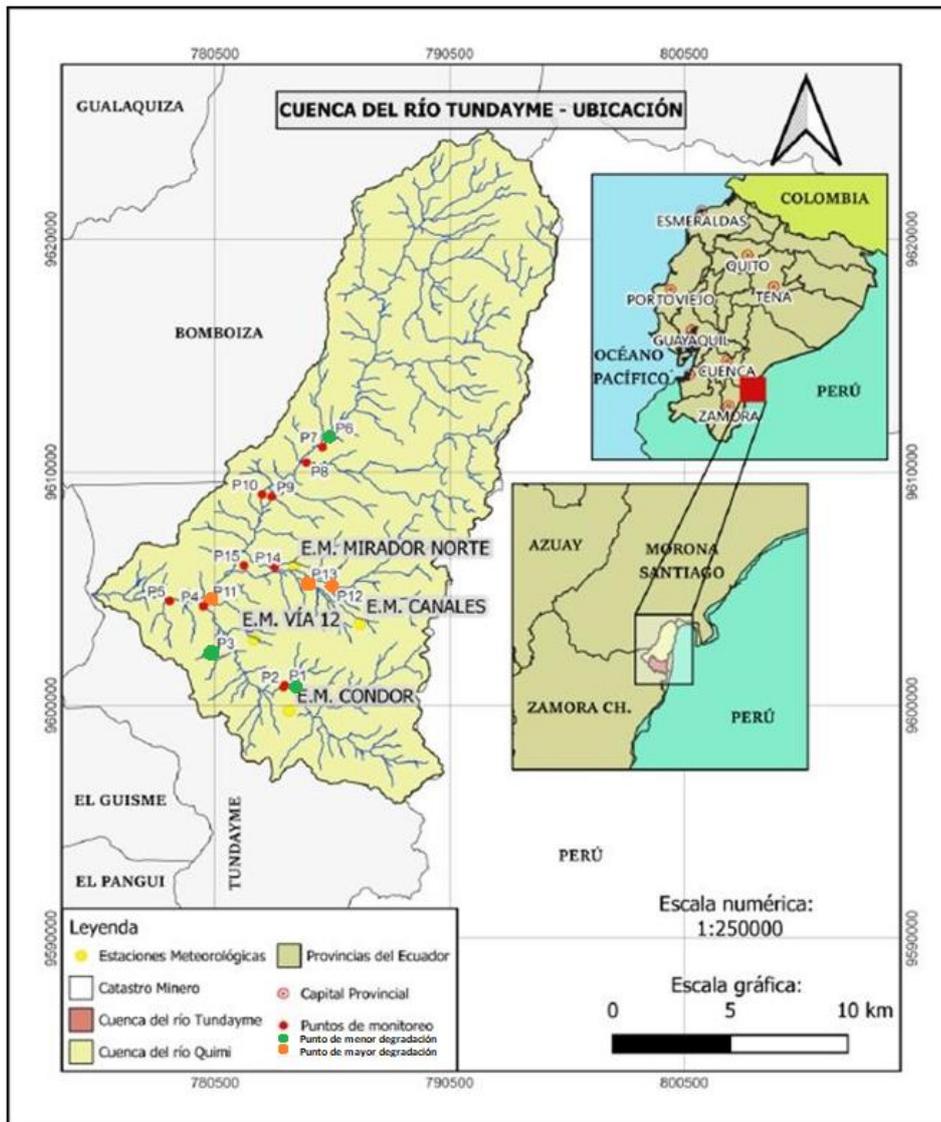
Sites	Ica	(Aambi)	Toxicity	Hpi	Total	% Degradation
P1	3.99	5	4.25	4.9	18,11	9,45
P2	4.27	1.35	4.56	4.33	14,52	27,40
P3	4.17	5	4.96	5	19,13	4,37
P4	4.01	1.13	4.15	5	14,29	28,56
P5	3.93	2.65	4.66	4.92	16,16	19,18
P6	4	5	4.25	5	18,25	8,73
P7	4.07	5	4.66	5	18,73	6,33
P8	4.23	4.7	3.96	5	17,89	10,56
P9	4.11	4.99	3.96	5	18,06	9,70
P10	3.98	2.83	3.66	5	15,46	22,68
P11	4.15	0	3.91	5	13,06	34,70
P12	4.03	1.1	4.15	4.85	14,13	29,35
P13	3.50	0	4.66	2.39	10,55	47,26
P14	4.44	2.19	4.1	4.86	15,60	22,01
P15	4.10	2.94	4.4	4.23	15,67	21,65

\*Los recuadros en verde muestran el punto con menor porcentaje de degradación.

\*Los recuadros en rojo muestran el punto con mayor porcentaje de degradación.

**Realizado por:** Solano, Daniel, 2024.

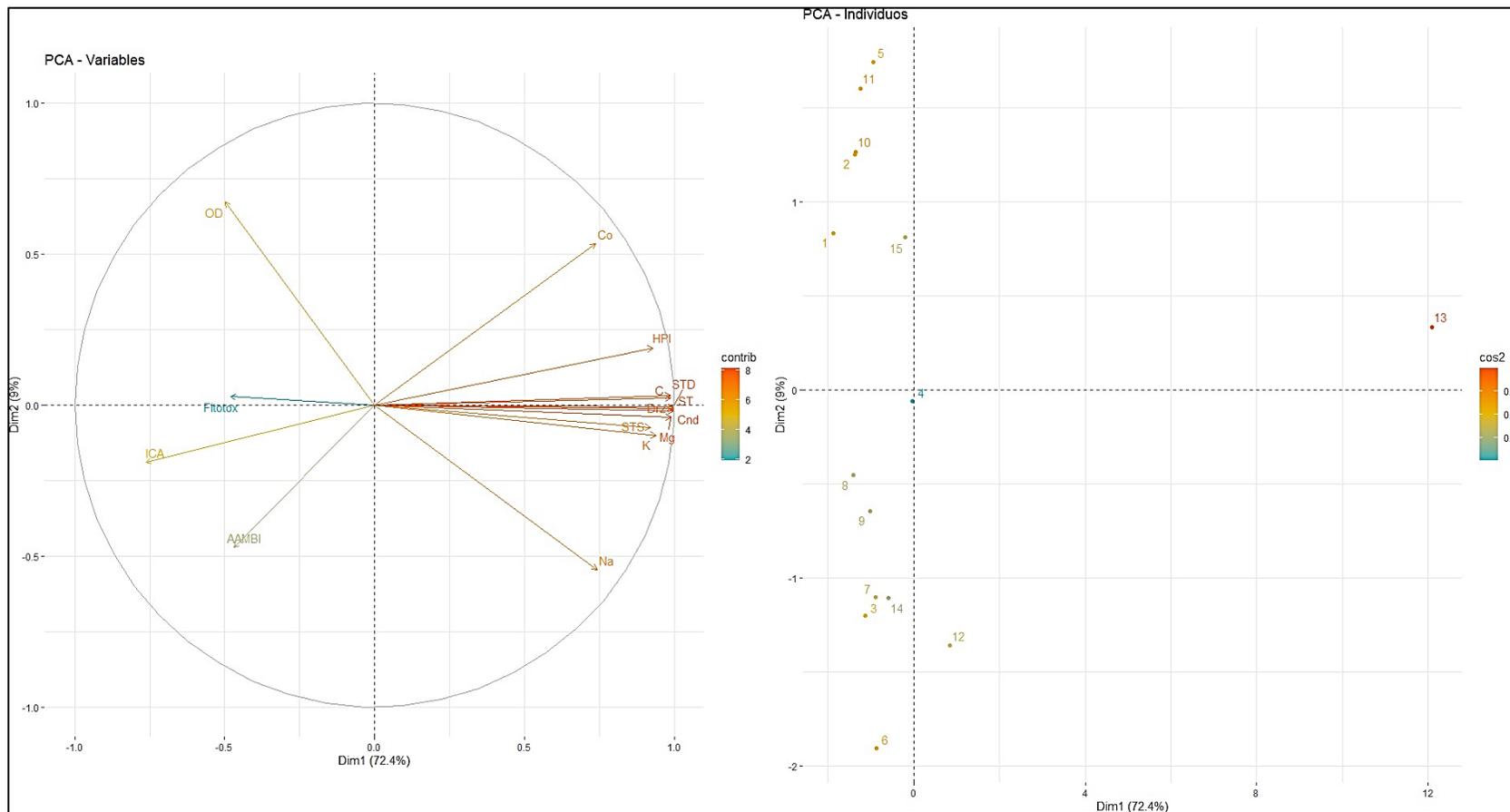
Parámetros fisicoquímicos (ICA), monitoreo de macroinvertebrados con el Índice Biótico Andino-Amazonico (AAMBI), evaluación de toxicidad con bioensayos (IG) y concentraciones de metales (HPI). Los sitios resaltados son los valores de menor degradación y de mayor degradación.



**Figura 2-7:** Localización de los puntos de muestreo, de verde los de menor degradación y los naranjas de mayor degradación.  
**Realizado por:** Solano, Daniel, 2024.

## 2.6 Análisis PCA

Para las muestras de agua (Figura 9), la Dim1 representó el 72% de la varianza de los datos y la Dim2 explicó la variación restante 9% de la varianza de los datos. Los sitios P1, P2, P5, P10, P11 y P15 se correlacionaron altamente con las concentraciones de OD. El P13 está fuertemente relacionado con las variables de conductividad, Calcio, STD, ST, dureza, manganeso, y tiene una menor relación con las variables de color, HPI, STS, sodio y potasio, El P4 está influenciado por la fitotoxicidad, los punto P7, P8, P9 y P14 tienen relación con el índice AAMBI. Para los puntos P3 y P6 el ICA es la variable con más relación y por último el punto P12 se relaciona con las variables del sodio y el AAMBI.



**Figura 2-8:** Análisis PCA para el agua.  
 Realizado por: Solano, Daniel, 2024.

### 3. DISCUSIÓN

Las crecientes presiones antropogénicas, como la minería metálica han contribuido significativamente en la alteración dinámica de los ecosistemas acuáticos. Esta actividad extractivista provoca impactos ambientales directos como la deforestación y alteración hidro morfológica de los ríos [3]. Mediante una evaluación integradora llevada a cabo en este estudio, combinando múltiples LOEs, demuestra que la minería de escala industrial tiene un amplio impacto significativo en la calidad del agua dulce en la cuenca del río Quimi. Los impactos identificados variaron en cuanto a su naturaleza y magnitud en los diferentes sitios de muestreo.

La alteración de los parámetros fisicoquímicos como el OD, turbidez, pH y color, exhibió variaciones significativas entre los diferentes puntos de muestreo. Este fenómeno sugiere la presencia de una carga constante de sedimentos potencialmente contaminados con metales en los ríos. Lo que pueden llegar a ser una fuente de contaminación crónica [41]. La minería de cobre a escala industrial, ejecutada con maquinaria pesada, desencadenó la erosión de las riberas, dando a una transformación notable en el paisaje [19]. La disminución de los niveles de OD a valores bajos plantea la preocupante posibilidad de hipoxia y muerte de organismos acuáticos. Estos niveles bajos de OD indican en el estado de la calidad de agua [42].

Factores del ambiente como la temperatura, OD, conductividad y el pH determinan los parámetros de distribución y composición de los macroinvertebrados. El índice AAMBI reportó un valor de 73, mientras que Galarza determinó un valor superior a 80 en zonas inmersas por minería [38]. De acuerdo con los macroinvertebrados presentes y los valores de los índices de calidad de agua de los puntos evaluados se tiene que los sitios como P3, P6, P7 y P9 exhibieron mejor calidad biológica de la zona estudiada. Se asocia que estos sitios poseen las condiciones fisicoquímicas y ecológicas óptimas para el desarrollo de una variedad de fauna de macroinvertebrados, al no estar expuestas directamente a actividades mineras. Mientras que, el P13 y P11 presentan un estado de pobre en comparación de otros, una característica común es una mayor turbidez en el agua [43] (Tabla 3).

La ausencia prolongada de macroinvertebrados indica un grado elevado de perturbación ambiental y también puede interpretarse como un indicador de advertencia de los

efectos generalizados de la minería local. Los resultados confirmaron que la contaminación del agua y los sedimentos derivados de la minería tienen efectos negativos directos sobre las comunidades de invertebrados bentónicos, reduciendo la abundancia y riqueza de especies y modificando la estructura de la comunidad [44], todos los sitios clasificados como de impacto moderado a alto tuvieron ausencia total o baja abundancia de la mayoría de los taxones de macroinvertebrados, con la excepción de la familia Chironomidae. Esto es consistente con otros estudios que mostraron un predominio de quironómidos en sitios contaminados por metales [45].

En sitios donde se ha reportado una alta fitotoxicidad, como es el caso del P13, se observó una baja presencia o nula en el índice AAMBI. Este dato resalta los efectos tóxicos de la contaminación de la minería por cobre, que impacta a múltiples componentes del ecosistema, desde los productores primarios hasta consumidores [46]. Esta afectación tiene como consecuencia directa la alteración en parámetros fisicoquímicos del agua por esta actividad antropogénica, reduciendo la calidad del hábitat acuático y la disponibilidad de recursos para aquellos organismos que dependen de estos ecosistemas [47].

Se demostró que hay puntos en los que las concentraciones de metales en el agua, tanto los considerados esenciales como los no esenciales para los sistemas biológicos, puede causar graves daños a la vida acuática al afectar la fisiología reproductiva de peces e invertebrados, inducir carcinogenicidad, genotoxicidad y causar efectos adversos en los sistemas endocrinos, como el hígado necrosis y, en última instancia, la muerte [48,49]. Por ejemplo, los metales que sobrepasan los límites permisibles son Cu, Cd, Zn, Al, Ni, los cuales a niveles elevados afectan potencialmente en los procesos metabólicos, generando toxicidad [50]. Las concentraciones altas, como en el P13 representan una potencial amenaza en la pérdida de integridad del ecosistema acuático, comprometiendo la biota acuática y salud humana. Mora, et al, [51] demostraron que la cuenca del Río Zamora al estar directamente relacionado la minera Chinapinzta mostro niveles mayores de Mn, Zn, Pb y Cu y menores concentraciones de Al. Además, los metales, pueden ser transportados a las terrazas de los ríos y afectan el crecimiento de las plantas en los sistemas fluviales y suelos [52].

Los ensayos de fitotoxicidad con *L. sativa* (Figura 8) indicaron que la mayoría de sitios demostraron crecimientos por encima de la muestra control ( $p < 0.05$ ), excepto los puntos P7, P8 y P13. Otros estudios corroboran estos resultados utilizando diferentes tipos de

semillas con diferentes tipos de sustratos para los bioensayos [53,54]. Además, se informa que la presencia de estos metales como Cu, Pb, Zn, Ni y Cd, se asocia al crecimiento o inhibición de plántulas en áreas contaminadas [20]. Por otro lado, los contaminantes también pueden estimular el crecimiento de las semillas conocido como hormesis, a altas dosis de concentración, se esperaría la inhibición de la germinación como el P13, por sus niveles elevados de metales. Según Capparelli et al [19], expone que las altas concentraciones de Cd, puede ser provocadas por la contaminación antropogénica. Galarza et al. (2021), y Chancay et al. (2020) atribuyeron este comportamiento a un exceso de nutrientes y materia orgánica en las muestras de agua [39,42]. Por lo tanto, los alto niveles de metales encontrados en los puntos de estudio y la fitotoxicidad en algunas muestras indican que es necesario prestar atención a la contaminación por metales en el medio ambiente.

Por lo que, este estudio al usar LOE se logró evaluar los impactos significativos de los ecosistemas acuáticos en la cuenca del río Quimi. Al integrar índices complementarios para evaluar la calidad del agua como parámetros fisicoquímicos, macroinvertebrados bentónicos, metales presentes en agua y fitotoxicidad nos permitieron entender de una manera holística la perturbación de los puntos de muestreo. Además, la comparación con la normativa de legislación TULSMA, se conocieron los límites permisibles de los sitios de muestreo.

## CONCLUSIONES

El enfoque de múltiples líneas de evidencia utilizado en este estudio, para evaluar la salud de los ecosistemas en la cuenca del río Quimi proporciona una visión integral y robusta de los impactos de la minería a gran escala. La combinación de datos biológicos, químicos y físicos ha permitido identificar patrones y tendencias significativas en la salud de los ecosistemas de agua dulce. Los resultados obtenidos en el estudio muestran que en la subcuenca del río Wawayme (785518,6 - 9605221,9) se encuentran los puntos de mayor porcentaje de degradación del ecosistema (P12, P13, P14 y P15), siendo estos puntos los más cercanos al proyecto minero, demostrando que existe una alteración al ecosistema por la actividad extractivista con coordenada de inicio.

Los bioindicadores han demostrado ser factores de estrés relevantes, por ejemplo, en la carencia de macroinvertebrados como es el caso del punto 11 y 13, el cual ha tenido mayor impacto por esta actividad antropogénica.

Con base en los resultados obtenidos en este estudio de análisis integrador, se sugiere la adopción de un enfoque que utilice múltiples líneas de evidencia (LOEs) para evaluar la salud del ecosistema acuático. Los indicadores biológicos, como los ensayos de toxicidad y los índices de macroinvertebrados, se revelaron como herramientas eficaces, de bajo costo y sensibles para la detección de contaminantes. Este estudio ha demostrado que al aplicar diversas LOEs, se logra obtener una comprensión más completa del impacto de las actividades antropogénicas, como la minería, en los ecosistemas acuáticos.

El enfoque de múltiples niveles de organización ecológica (LOE) no solo ha permitido la clasificación de las zonas según su nivel de degradación ambiental, sino que también resalta la importancia de establecer objetivos concretos para la conservación y restauración de dichas áreas. La recomendación clave es la implementación de un monitoreo continuo en las cuencas afectadas por la minería, utilizando indicadores como macroinvertebrados, parámetros físico-químicos, ensayos Fito toxicológicos con semillas de *Lactuca Sativa* y la evaluación de metales pesados en el agua.

Esta estrategia integral no solo proporciona una visión más detallada de la calidad del agua y la salud del ecosistema, sino que también se establece como una medida

efectiva para gestionar y mitigar los impactos ambientales a largo plazo de la minería de cobre a nivel industrial en la región amazónica. En última instancia, este enfoque promueve la sostenibilidad y contribuye a la preservación de los valiosos ecosistemas acuáticos en un contexto de desarrollo industrial.

El análisis del índice integrador agrupó los sitios P1, P3, P6 y P7, como los grupos menos amenazados, siendo el P3 el de mejor estado. Por otro lado, los sitios P11 y P13, son los de peor estado, lo que indica malas condiciones del ecosistema de agua dulce.

La importancia de la región Amazónica para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, se enfatiza la necesidad de un mayor control sobre la expansión de la minería y la implementación de prácticas de monitoreo ambiental sostenibles. Este enfoque integrador no solo mejora nuestra comprensión de los efectos de la actividad minera, sino que también proporciona una base sólida para la toma de decisiones claves, contribuyendo así a la preservación a largo plazo de estos valiosos ecosistemas.

## REFERENCIAS

1. Moulatlet GM, Yacelga N, Rico A, Mora A, Hauser-Davis RA, Cabrera M, et al. A systematic review on metal contamination due to mining activities in the Amazon basin and associated environmental hazards. *Chemosphere*. 2023;339: 139700. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.139700
2. Moulatlet GM, Yacelga N, Rico A, Mora A, Hauser-Davis RA, Cabrera M, et al. A systematic review on metal contamination due to mining activities in the Amazon basin and associated environmental hazards. *Chemosphere*. 2023;339: 139700. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.139700
3. William Sacher. Revisión crítica parcial del “ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA FASE DE BENEFICIO DEL PROYECTO MINERO DE COBRE MIRADOR” de la empresa Ecuacorriente, Ecuador. 2011.
4. Asner GP, Tupayachi R. Accelerated losses of protected forests from gold mining in the Peruvian Amazon. *Environmental Research Letters*. 2016;12: 094004. doi:10.1088/1748-9326/aa7dab
5. SÁNCHEZ-VÁZQUEZ L, ESPINOSA MG, EGUIGUREN MB. PERCEPTION OF SOCIO-ENVIRONMENTAL CONFLICTS IN MINING AREAS: THE CASE OF THE MIRADOR PROJECT IN ECUADOR. *Ambiente & Sociedade*. 2016;19: 23–44. doi:10.1590/1809-4422ASOC129708V1922016
6. TULSMA. Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente. 31/03/2006. Quito. Título y artículo agregados por Decreto Ejecutivo No. 1589, publicado en Registro Oficial 320 de 25 de Julio del 2006. 2003.
7. Uddin MdG, Nash S, Olbert AI. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecol Indic*. 2021;122: 107218. doi:10.1016/j.ecolind.2020.107218
8. Ma Z, Li H, Ye Z, Wen J, Hu Y, Liu Y. Application of modified water quality index (WQI) in the assessment of coastal water quality in main aquaculture areas of Dalian, China. *Mar Pollut Bull*. 2020;157: 111285. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111285
9. Brown R, McClelland N, Deininger R, Tozer R. A water quality index-do we dare? 1970.
10. Villa-Achupallas M, Rosado D, Aguilar S, Galindo-Riaño MD. Water quality in the tropical Andes hotspot: The Yacuambi river (southeastern Ecuador). *Science of The Total Environment*. 2018;633: 50–58. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.165
11. Suárez Thelma S. Macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos de la calidad del agua en el Rio Gil González y tributarios más importantes, Rivas, Nicaragua. *Universidad y Ciencia*. 2015;6: 38–46. doi:10.5377/uyc.v6i9.1958
12. Sotomayor G, Hampel H, Vázquez RF, Goethals PLM. Multivariate-statistics based selection of a benthic macroinvertebrate index for assessing water quality in the Paute River basin (Ecuador). *Ecol Indic*. 2020;111: 106037. doi:10.1016/j.ecolind.2019.106037
13. Van Echelpoel W, Forio MAE, Van Butsel J, Lock K, Utreras JAD, Dominguez-Granda LE, et al. Macroinvertebrate functional feeding group structure along an impacted tropical river: The Portoviejo River (Ecuador). *Limnologica*. 2018;73: 12–19. doi:10.1016/j.limno.2018.10.001
14. Luisa Fernanda ÁA. Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 2005.
15. Pabón Guerrero SE, Benítez Benítez R, Sarria Villa RA, Gallo Corredor JA. Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre ciencia e*

- ingeniería. 2020;14: 9–18. doi:10.31908/19098367.1734
16. Jiménez-Oyola S, Chavez E, García-Martínez M-J, Ortega MF, Bolonio D, Guzmán-Martínez F, et al. Probabilistic multi-pathway human health risk assessment due to heavy metal(loid)s in a traditional gold mining area in Ecuador. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2021;224: 112629. doi:10.1016/j.ecoenv.2021.112629
  17. V. Capparelli M, Cabrera M, Rico A, Lucas-Solis O, Alvear-S D, Vasco S, et al. An Integrative Approach to Assess the Environmental Impacts of Gold Mining Contamination in the Amazon. *Toxics.* 2021;9: 149. doi:10.3390/toxics9070149
  18. Sankhla MS, Kumari M, Nandan M, Kumar R, Agrawal P. Heavy Metals Contamination in Water and Their Hazardous Effect on Human Health-A Review. *SSRN Electronic Journal.* 2016. doi:10.2139/ssrn.3428216
  19. Capparelli MV, Moulatlet GM, Abessa DM de S, Lucas-Solis O, Rosero B, Galarza E, et al. An integrative approach to identify the impacts of multiple metal contamination sources on the Eastern Andean foothills of the Ecuadorian Amazonia. *Science of The Total Environment.* 2020;709: 136088. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136088
  20. Chan-Keb CA, Agraz-Hernández CM, Perez-Balan RA, Gómez-Solano MI, Maldonado-Montiel TDNJ, Ake-Canche B, et al. Acute toxicity of water and aqueous extract of soils from Champotón river in *Lactuca sativa* L. *Toxicol Rep.* 2018;5: 593–597. doi:10.1016/j.toxrep.2018.05.009
  21. Altenburger R, Brack W, Burgess RM, Busch W, Escher BI, Focks A, et al. Future water quality monitoring: improving the balance between exposure and toxicity assessments of real-world pollutant mixtures. *Environ Sci Eur.* 2019;31: 12. doi:10.1186/s12302-019-0193-1
  22. Backhaus T, Brack W, Van den Brink PJ, Deutschmann B, Hollert H, Posthuma L, et al. Assessing the ecological impact of chemical pollution on aquatic ecosystems requires the systematic exploration and evaluation of four lines of evidence. *Environ Sci Eur.* 2019;31: 98. doi:10.1186/s12302-019-0276-z
  23. CCME CC of M of the E. GUIDANCE MANUAL FOR OPTIMIZING WATER QUALITY MONITORING PROGRAM DESIGN. 2015.
  24. Sandes T, Ward R, Loftis J, Steele T, Adrian D, Yevjevich V. *Design of Networks for monitoring Water Quality.* Littleton, Colo., U.S.A: Water Resources Publications; 1983.
  25. INEN. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. TÉCNICAS DE MUESTREO. 2013.
  26. APHA. 9222 MEMBRANE FILTER TECHNIQUE FOR MEMBERS OF THE COLIFORM GROUP. 2017.
  27. Nong X, Shao D, Zhong H, Liang J. Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method. *Water Res.* 2020;178: 115781. doi:10.1016/j.watres.2020.115781
  28. Alvear D, Ramos M, Montaña D, Chancay J, Carrión R, Chancay J, et al. Efecto de las actividades humanas sobre ríos de zonas cársticas en la Amazonía Andina. 2022.
  29. Noori R, Berndtsson R, Hosseinzadeh M, Adamowski JF, Abyaneh MR. A critical review on the application of the National Sanitation Foundation Water Quality Index. *Environmental Pollution.* 2019;244: 575–587. doi:10.1016/j.envpol.2018.10.076
  30. Gabriels W, Lock K, De Pauw N, Goethals PLM. Multimetric Macroinvertebrate Index Flanders (MMIF) for biological assessment of rivers and lakes in Flanders (Belgium). *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters.* 2010;40: 199–207. doi:10.1016/j.limno.2009.10.001
  31. Damanik-Ambarita M, Everaert G, Forio M, Nguyen T, Lock K, Musonge P, et al. Generalized Linear

- Models to Identify Key Hydromorphological and Chemical Variables Determining the Occurrence of Macroinvertebrates in the Guayas River Basin (Ecuador). *Water (Basel)*. 2016;8: 297. doi:10.3390/w8070297
32. Domínguez E, Fernández H. *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: sistemática y biología*. 2009.
  33. Darrigran G. Los moluscos bivalvos. Darrigran GA, editor. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP); 2013. doi:10.35537/10915/32168
  34. Palma A. *Guía para la identificación de invertebrados acuáticos*. 2018.
  35. Remeteiová D, Ružičková S, Mičková V, Laubertová M, Slezáková R. Evaluation of US EPA Method 3052 Microwave Acid Digestion for Quantification of Majority Metals in Waste Printed Circuit Boards. *Metals (Basel)*. 2020;10: 1511. doi:10.3390/met10111511
  36. Prasad B, Bose J. Evaluation of the heavy metal pollution index for surface and spring water near a limestone mining area of the lower Himalayas. *Environmental Geology*. 2001;41: 183–188. doi:10.1007/s002540100380
  37. Giri S, Singh AK. Assessment of Surface Water Quality Using Heavy Metal Pollution Index in Subarnarekha River, India. *Water Qual Expo Health*. 2014;5: 173–182. doi:10.1007/s12403-013-0106-2
  38. Young BJ, Rizzo PF, Riera NI, Torre V Della, López VA, Molina CD, et al. Development of phytotoxicity indexes and their correlation with ecotoxicological, stability and physicochemical parameters during passive composting of poultry manure. *Waste Management*. 2016;54: 101–109. doi:10.1016/j.wasman.2016.05.001
  39. Galarza E, Cabrera M, Espinosa R, Espitia E, Moulatlet GM, Capparelli M V. Assessing the quality of amazon aquatic ecosystems with multiple lines of evidence: the case of the Northeast Andean foothills of Ecuador. . 2021.
  40. Contento M. *Estadística con aplicaciones en R*. 2018.
  41. Chapman D V., Bradley C, Gettel GM, Hatvani IG, Hein T, Kovács J, et al. Developments in water quality monitoring and management in large river catchments using the Danube River as an example. *Environ Sci Policy*. 2016;64: 141–154. doi:10.1016/j.envsci.2016.06.015
  42. Chancay Juseth, Carrillo H, Martínez D, Mena G. *Diagnostico integral previo al plan de manejo de los recursos hidricos y acuaticos de la cuenca del rio Muchacho*. 2020.
  43. López Mendoza S, Huertas Pineda DF, Jaramillo Londoño ÁM, Calderón Rivera DS, Díaz Arévalo JL. Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua del río Teusacá (Cundinamarca, Colombia). *Ingeniería y Desarrollo*. 2022;37: 269–288. doi:10.14482/inde.37.2.6281
  44. Ruiz-García A, Márquez-Rodríguez J, Ferreras-Romero M. Implications of anthropogenic disturbance factors on the Trichoptera assemblage in a Mediterranean fluvial system: Are Trichoptera useful for identifying land-use alterations? *Ecol Indic*. 2012;14: 114–123. doi:10.1016/j.ecolind.2011.06.026
  45. Smolders AJP, Lock RAC, Van der Velde G, Medina Hoyos RI, Roelofs JGM. Effects of Mining Activities on Heavy Metal Concentrations in Water, Sediment, and Macroinvertebrates in Different Reaches of the Pilcomayo River, South America. *Arch Environ Contam Toxicol*. 2003;44: 314–323. doi:10.1007/s00244-002-2042-1
  46. Bojsen BH, Jacobsen D. Effects of deforestation on macroinvertebrate diversity and assemblage structure in Ecuadorian Amazon streams. *Arch Hydrobiol*. 2003;158: 317–342. doi:10.1127/0003-

9136/2003/0158-0317

47. Mereta ST, Boets P, De Meester L, Goethals PLM. Development of a multimetric index based on benthic macroinvertebrates for the assessment of natural wetlands in Southwest Ethiopia. *Ecol Indic.* 2013;29: 510–521. doi:10.1016/j.ecolind.2013.01.026
48. Viana LF, Cardoso CAL, Lima-Junior SE, Suárez YR, Florentino AC. Bioaccumulation of metal in liver tissue of fish in response to water toxicity of the Araguari-Amazon River, Brazil. *Environ Monit Assess.* 2020;192: 781. doi:10.1007/s10661-020-08696-2
49. Jiménez-Oyola S, Escobar Segovia K, García-Martínez M-J, Ortega M, Bolonio D, García-Garizabal I, et al. Human Health Risk Assessment for Exposure to Potentially Toxic Elements in Polluted Rivers in the Ecuadorian Amazon. *Water (Basel).* 2021;13: 613. doi:10.3390/w13050613
50. Mestanza-Ramón C, Mora-Silva D, D'Orío G, Tapia-Segarra E, Gaibor ID, Esparza Parra JF, et al. Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM): Management and Socioenvironmental Impacts in the Northern Amazon of Ecuador. *Sustainability.* 2022;14: 6854. doi:10.3390/su14116854
51. Mora A, Jumbo-Flores D, González-Merizalde M, Bermeo-Flores SA, Alvarez-Figueroa P, Mahlknecht J, et al. Heavy Metal Enrichment Factors in Fluvial Sediments of an Amazonian Basin Impacted by Gold Mining. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2019;102: 210–217. doi:10.1007/s00128-019-02545-w
52. Sastre J, Sahuquillo A, Vidal M, Rauret G. Determination of Cd, Cu, Pb and Zn in environmental samples: microwave-assisted total digestion versus aqua regia and nitric acid extraction. *Anal Chim Acta.* 2002;462: 59–72. doi:10.1016/S0003-2670(02)00307-0
53. Campos BG, Cruz ACF, Buruaem LM, Rodrigues APC, Machado WTV, Abessa DMS. Using a tiered approach based on ecotoxicological techniques to assess the ecological risks of contamination in a subtropical estuarine protected area. *Science of The Total Environment.* 2016;544: 564–573. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.11.124
54. Bohórquez-Echeverry P, Campos-Pinilla C. ASSESSMENT OF *Lactuca sativa* AND *Selenastrum capricornutum* LIKE INDICATORS OF WATER TOXICITY. 2007.

## ANEXOS

### ANEXO A. Criterios de clasificación del Índice de calidad del agua ICA.

Valores	Calidad Biológica	Color
91-100	Excelente	Azul
71-90	Buena	Verde
51-70	Media	Amarillo
26-50	Mala	Naranja
0-25	Muy Malo	Rojo

Realizado por: Solano, Daniel, 2024

### Anexo B. Criterios de clasificación de la calidad del agua del índice AAMBI.

Valores	Calidad Biológica	Color
>120	Excelente	Azul
90-120	Muy Buena	Verde
50-89	Buena	Amarillo
36-49	Regular	Naranja
<35	Mala	Rojo

Realizado por: Solano, Daniel, 2024.