



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“ANÁLISIS DE LOS PARÁMETRO (FÍSICO, QUÍMICO Y
BIOLÓGICO) EN EL RÍO CUNUYACU, CANTÓN LATACUNGA,
PROVINCIA DE COTOPAXI, PERÍODO 2025”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de
Ingenieras Ambientales

Autoras:

Jacho Dias Silvana Elizabeth
Palomo Barrionuevo Paola Fernanda

Tutor:

Andrade Valencia José Antonio

LATACUNGA – ECUADOR
Marzo 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Jacho Dias Silvana Elizabeth, con cédula de ciudadanía No. 0503625469 y Palomo Barrionuevo Paola Fernanda, con cédula de ciudadanía No. 0503663825, declaramos ser autoras del presente Proyecto de Investigación: **“ANÁLISIS DE LOS PARÁMETRO (FÍSICO, QUÍMICO Y BIOLÓGICO) EN EL RÍO CUNUYACU, CANTÓN LATACUNGUA, PROVINCIA DE COTOPAXI, PERÍODO 2025”**, siendo el Ingeniero Ph.D. José Antonio Andrade Valencia , Tutor del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 12 de febrero del 2026

Silvana Elizabeth Jacho Dias
C.C: 0503625469
ESTUDIANTE

Palomo Barrionuevo Paola Fernanda
C.C: 0503663825
ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **Jacho Dias Silvana Elizabeth**, identificada con cédula de ciudadanía **0503625469** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. – **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**ANÁLISIS DE LOS PARÁMETRO (FÍSICO, QUÍMICO Y BIOLÓGICO) EN EL RÍO CUNUYACU, CANTÓN LATACUNGUA, PROVINCIA DE COTOPAXI, PERÍODO 2025**”, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Octubre 2021 - Marzo 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Ing. José Antonio Andrade Valencia, Ph.D.

Tema: “**ANÁLISIS DE LOS PARÁMETRO (FÍSICO, QUÍMICO Y BIOLÓGICO) EN EL RÍO CUNUYACU, CANTÓN LATACUNGUA, PROVINCIA DE COTOPAXI, PERÍODO 2025**”

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 12 días del mes de febrero del 2026.

Silvana Elizabeth Jacho Dias

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CEDENTE

LA CESIONARIA

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **Palomo Barrionuevo Paola Fernanda**, identificada con cédula de ciudadanía **0503663825** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**ANÁLISIS DE LOS PARÁMETRO (FÍSICO, QUÍMICO Y BIOLÓGICO) EN EL RÍO CUNUYACU, CANTÓN LATACUNGUA, PROVINCIA DE COTOPAXI, PERÍODO 2025**”, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Octubre 2021 - Marzo 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Ing. José Antonio Andrade Valencia, Ph.D.

Tema: “**ANÁLISIS DE LOS PARÁMETRO (FÍSICO, QUÍMICO Y BIOLÓGICO) EN EL RÍO CUNUYACU, CANTÓN LATACUNGUA, PROVINCIA DE COTOPAXI, PERÍODO 2025**”

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- f) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- g) La publicación del trabajo de grado.
- h) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- i) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- j) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 12 días del mes de febrero del 2026.

Palomo Barrionuevo Paola Fernanda

LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el título:

“ANÁLISIS DE LOS PARÁMETRO (FÍSICO, QUÍMICO Y BIOLÓGICO) EN EL RÍO CUNUYACU, CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI, PERÍODO 2025”, de Jacho Dias Silvana Elizabeth y Palomo Barrionuevo Paola Ffernanda, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del Aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la Pre defensa.

Latacunga, 12 de febrero del 2026

Ing. José Antonio Andrade Valencia, Ph.D.
C.C: 0502524481
DOCENTE TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, los postulantes: Jacho Dias Silvana Elizabeth y Palomo Barrionuevo Paola Fernanda, con el título del Proyecto de Investigación: **“ANÁLISIS DE LOS PARÁMETRO (FÍSICO, QUÍMICO Y BIOLÓGICO) EN EL RÍO CUNUYACU, CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI, PERÍODO 2025”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 12 de febrero del 2026

Ing. Marco Antonio Rivera Moreno, Mg.
C.C: 0501518955
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Ing. Andrés Sebastián Moreno Avila, Mg.
C.C: 0503220063
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Lic. Manuel Patricio Clavijo Ceballos, Mg.
C.C: 0501444582
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a toda mi familia, porque juntos hemos crecido, soñado y aprendido el verdadero significado de la vida.

A mis padres, por estar siempre a mi lado brindándome su apoyo incondicional, sin importar el cansancio o los desvelos. Gracias por acompañarme siempre con amor y por ser mi mayor inspiración.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi, especialmente a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales y a la carrera de Ingeniería Ambiental, por los conocimientos, la formación y las enseñanzas brindadas a lo largo de mi preparación académica.

A mi querido hermano, a mi cuñada y a mis adorados sobrinos, quienes han sido un apoyo muy importante a lo largo de este camino. Gracias por cada momento compartido, por su cariño, su paciencia y por la alegría que siempre traen a mi vida. Su compañía, sus palabras de ánimo y su presencia constante han sido un regalo invaluable en cada etapa de este proceso. Su amor y apoyo me han dado fuerzas para seguir adelante y alcanzar mis metas.

A todas las personas que me acompañaron durante este importante recorrido, expreso mi más sincero y profundo agradecimiento por cada palabra de aliento, cada consejo oportuno y cada enseñanza compartida. Sus gestos, aunque en ocasiones parecieran pequeños, dejaron una huella imborrable en mi vida y fueron fundamentales en mi crecimiento personal y académico. Gracias por creer en mí, por su apoyo constante y por motivarme a seguir adelante incluso en los momentos más desafiantes.

De manera especial, manifiesto mi gratitud a mi tutor de tesis, el Ingeniero José Antonio Andrade Valencia, por su valiosa orientación, su compromiso inquebrantable y su acompañamiento académico a lo largo de mi formación universitaria. Su guía, dedicación y confianza fueron pilares esenciales para culminar con éxito esta etapa tan significativa de mi vida profesional.

Silvana Elizabeth Jacho Dias

AGRADECIMIENTO

Quiero dedicar este logro con todo mi corazón a mi madre, Victoria Barrionuevo, quien ha sido el pilar fundamental en mi vida. Gracias por tu amor incondicional, por tu paciencia, tus consejos y por enseñarme con tu ejemplo el valor del esfuerzo, la perseverancia y la humildad.

Mamá, este trabajo no solo representa el final de una etapa académica, sino también el resultado de todos los sacrificios que has hecho por mí. Cada paso que he dado ha sido posible gracias a tu apoyo, tus palabras de aliento y la confianza que siempre depositaste en mí, incluso en los momentos más difíciles.

Gracias por estar siempre a mi lado, por creer en mis sueños y por motivarme a seguir adelante cuando sentía que no podía más. Este logro también es tuyo, porque sin ti nada de esto habría sido posible

Paola Fernanda Palomo Barrionuevo

DEDICATORIA

*A mi madre, **Germania Piedad Dias Moscoso** quien con su fortaleza de acero sostiene y guía mi camino a quien amo y por quien he logrado cumplir mis sueños agradezco tus palabras de aliento, de lucha y amor incondicional, esta meta la entrego a ti quien ha sido lo mejor que tengo en mi vida.*

*A mi padre, **Héctor Oswaldo Jacho Cajas** quien ha sido mí, amigo, compañero y cómplice en todas las etapas de mi vida a logrado marcar mi camino universitario, me ha demostrado que las fortalezas vienen de las luchas silenciosas, su sacrificio diario, su dedicación constante e incondicional, su valentía y entrega a lo largo de vida.*

A mis hermanas las cuales han sido mis compañeras de vida les agradezco por caminar conmigo a lo largo de mis etapas llenas de alegrías y tristezas. A mis sobrinos quienes con sus inocencias han logrado un significado de amor y cariño constante.

Silvana Elizabeth Jacho Dias

DEDICATORIA

Agradezco profundamente a mi madre, quien ha sido mi mayor inspiración, fortaleza y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Su esfuerzo, sacrificio y amor constante han sido el motor que me impulsó a no rendirme y a seguir adelante hasta alcanzar esta meta tan importante.

A mi familia, por su comprensión, paciencia y palabras de aliento en los momentos más difíciles. Gracias por creer en mí, por acompañarme en este proceso y por ser el pilar fundamental que sostiene cada uno de mis logros.

A mi docente, por su guía, dedicación y conocimientos compartidos a lo largo de este trabajo de investigación. Su orientación fue clave para culminar con éxito esta tesis y fortalecer mi formación profesional.

Paola Fernanda Palomo Barrionuevo

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: “ANÁLISIS LOS PARAMETROS (FÍSICO, QUÍMICO Y BIOLÓGICO) EN EL RÍO CUNUYACU, CANTÓN LATACUNGUA, PROVINCIA DE COTOPAXI, PERÍODO 2025”.

Autoras:

Jacho Dias Silvana Elizabeth
Palomo Barrionuevo Paola Fernanda

RESUMEN

La investigación actual analizó la condición sanitaria y ecológica del río y estableció una línea base para el manejo local. Los propósitos fueron: (i) analizar parámetros físicos, químicos, microbiológicos y biológicos; (ii) diagnosticar condiciones del recurso hídrico; y (iii) elaborar una propuesta de conservación. Se utilizó un diseño observacional descriptivo transversal en cuatro puntos (P1 Locoá, P2 U.E. Trajano Naranjo, P3 La Laguna y P4 U.E. Ramón Barba). La turbidez, la temperatura, el pH, la conductividad y el oxígeno disuelto se midieron en el sitio. En el laboratorio se llevaron a cabo análisis de DQO, DBO₅, fosfatos, nitratos y nitritos. Además de coliformes termotolerantes, mediante filtración de membrana (SM 9222-D). La calidad del agua (ICA) y la condición ecológica (ABI), basadas en macroinvertebrados bentónicos, se combinaron para determinar la calidad de la condición. La degradación se pone de manifiesto en los resultados: el ICA fue muy malo en P1–P3 (24,51; 24,75; 22,54) y malo en P4 (28,97), todos por debajo del umbral 50. El ABI reportó una calidad deficiente en P1 (21) y condiciones pésimas en P2-P4 (11). Se observó un alto nivel de turbidez (15-55 NTU) y una baja concentración de oxígeno disuelto (2,8-4,8 mg/L), además de un incremento longitudinal en los fosfatos (de 0,06 mg/L en P1 a 0,18 mg/L en P4). Los coliformes fueron <1 UFC/100 mL (no se detectaron). Se concluye que el Cunuyacu muestra un deterioro biológico y fisicoquímico continuo, con la posibilidad de una eutrofización localizada. Se propone una estrategia de recuperación basada en reducción de cargas orgánicas y nutrientes, restauración ribereña, monitoreo hidrobiológico permanente y fortalecimiento de la gobernanza local, orientada a mejorar los valores de ICA y ABI y revertir el estado crítico identificado.

Palabras clave: bioindicadores acuáticos, calidad del agua, contaminación difusa, escorrentía agrícola, ríos altoandinos.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES

THEME: “ANALYSIS OF THE PARAMETERS (PHYSICAL, CHEMICAL, AND BIOLOGICAL) IN THE CUNUYACU RIVER, LATACUNGUA DISTRICT, COTOPAXI PROVINCE, PERIOD 2025”

Authors:

Jacho Dias Silvana Elizabeth
Palomo Barrionuevo Paola Fernanda

ABSTRACT

The current research analyzed the sanitary and ecological condition of the river and established a baseline for local management. The purposes were: (i) to analyze physical, chemical, microbiological and biological parameters; (ii) diagnose water resource conditions; and (iii) develop a conservation proposal. A cross-sectional descriptive observational design was used in four points (P1 Locoá, P2 U.E. Trajano Naranjo, P3 La Laguna y P4 U.E. Ramón Barba). Turbidity, temperature, pH, conductivity, and dissolved oxygen were measured at the site. In the laboratory, analyses of COD, BOD₅, phosphates, nitrates and nitrites were carried out. In addition to thermotolerant coliforms, by membrane filtration (SM 9222-D). Water quality (AQI) and ecological condition (ABI), based on benthic macroinvertebrates, were combined to determine condition quality. The degradation is evident in the results: the AQI was very bad in P1–P3 (24.51; 24.75; 22.54) and bad in P4 (28.97), all below threshold 50. The ABI reported poor quality in P1 (21) and poor conditions in P2-P4 (11). A high level of turbidity (15-55 NTU) and a low concentration of dissolved oxygen (2.8-4.8 mg/L) were observed, in addition to a longitudinal increase in phosphates (from 0.06 mg/L in P1 to 0.18 mg/L in P4). Coliforms were <1 CFU/100 mL (not detected). It is concluded that Cunuyacu shows a continuous biological and physicochemical deterioration, with the possibility of localized eutrophication. A recovery strategy based on the reduction of organic and nutrient loads, riparian restoration, permanent hydrobiological monitoring and strengthening of local governance is proposed, aimed at improving the values of ICA and ABI and reversing the identified critical state.

Keywords: aquatic bioindicators, water quality, diffuse pollution, agricultural runoff, high Andean rivers.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	iii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	v
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	vii
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	viii
<i>AGRADECIMIENTO</i>	ix
<i>AGRADECIMIENTO</i>	x
<i>DEDICATORIA</i>	xi
<i>DEDICATORIA</i>	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. JUSTIFICACIÓN.....	3
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	5
5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	5
6. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	7
6.1 Objetivo general	7
6.2 Objetivos específicos.....	7
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS	8
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA.....	9
8.1 Calidad del agua	9
8.2 Parámetros fisicoquímicos de evaluación.....	10
8.2.1 Temperatura, pH y conductividad eléctrica	11
8.2.2 Nutrientes: nitratos, nitritos y fósforo	11

8.2.3	Turbidez y sólidos suspendidos totales (SST)	12
8.2.1	Límites permisibles de calidad de agua	13
8.2.1	Normas técnicas y protocolos analíticos	13
8.3	Indicadores biológicos: macroinvertebrados acuáticos	14
8.3.1	Importancia ecológica de los macroinvertebrados	14
8.3.2	Clasificación taxonómica y funcional	14
8.3.3	Índices biológicos modernos aplicables en los Andes	15
8.3.4	Estudios recientes sobre macroinvertebrados en ríos altoandinos	16
8.4	Factores de alteración de la calidad del agua	16
8.4.1	Actividades agrícolas y contaminación difusa	17
8.4.2	Descargas domésticas y expansión urbana	17
8.4.3	Deforestación y degradación de zonas riparias	17
8.4.4	Cambio climático y variabilidad hidrológica	18
8.4.5	Interacciones sinérgicas de los factores de alteración	18
8.5	Enfoques teóricos aplicados	19
8.5.1	Enfoque ecosistémico	19
8.5.2	Enfoque de resiliencia ecológica	19
8.5.3	Enfoque de integridad ecológica	20
8.5.4	Enfoque de gestión integrada de cuencas hidrográficas (GICH)	20
8.6	Marco legal y normativo	21
8.6.1	Marco constitucional del recurso hídrico	21
8.6.2	Normativa legal nacional aplicable	21
8.6.3	Normativa ambiental secundaria: calidad del agua	22
9.	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	23
10.	ÁREA DE ESTUDIO	24
11.	METODOLOGÍA	25
11.1	Diseño de investigación	25

11.2	Población y muestra	26
11.3	Técnicas de recolección de datos.....	27
11.3.1	Selección de puntos y temporalidad	27
11.3.2	Protocolo general de muestreo	27
11.3.3	Parámetros fisicoquímicos	28
11.3.4	Parámetros microbiológicos	29
11.3.5	Muestreo biológico de macroinvertebrados	29
11.1	Técnicas de análisis de datos	30
11.1.1	Índices biológicos	30
11.1	Transformación de parámetros en subíndices de calidad	33
11.1	Instrumentos	34
11.1	Procedimiento de recolección de datos	35
12.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	37
A)	Analizar los parámetros Físicos, Químicos y Biológicos existentes en el Rio Cunuyacu.	
	37	
12.1	Parámetros físicos.....	37
12.1.1	Temperatura	38
12.1.2	Conductividad eléctrica	39
12.1.3	Sólidos disueltos totales (TDS)	39
12.1.4	Oxígeno disuelto (OD)	40
12.1.5	Turbidez	40
12.2	Parámetros químicos	41
12.2.1	Nitritos (NO₂⁻)	42
12.2.2	Nitratos (NO₃⁻)	43
12.2.3	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	44
12.2.4	Demanda bioquímica de oxígeno (DQO)	45
12.2.5	Fosfatos (PO₄³⁻)	46

12.3	Parámetros microbiológicos	46
12.4	Índice de calidad de agua (ICA)	48
12.5	Parámetros biológicos	49
12.5.1	Composición taxonómica del punto 1	50
12.5.2	Composición taxonómica del Punto 2	51
12.5.3	Composición taxonómica del Punto 3	51
12.5.4	Composición taxonómica del Punto 4	52
12.5.5	Índice Biótico Andino (ABI)	52
12.5.6	Índice Shannon	54
B)	Diagnosticar las condiciones actuales del recurso hídrico del Río Cunuyacu	54
12.6	Descripción general del muestreo	54
12.6.1	Mapa de uso y cobertura del suelo	55
12.6.1	Temperatura	56
12.6.2	Precipitación	58
12.6.3	Mapa hipsométrico y red hidrográfica de la subcuenca Cutuchi	59
12.7	Comportamiento integrado de los índices	60
12.8	Caracterización por punto de muestreo	61
C)	Elaborar una propuesta de conservación del río Cunuyacu.	62
13.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
14.	BIBLIOGRAFÍA	83
15.	ANEXOS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Área de estudio – Río Cunuyacu</i>	25
Figura 2. Diagrama de flujo de la recolección de datos	36
Figura 3. <i>Concentración promedio de nitritos (NO_2^-)</i>	43
Figura 4. <i>Concentración de nitratos (NO_3^-)</i>	44
Figura 5. <i>Gradiente longitudinal de Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	45
Figura 6. <i>Gradiente longitudinal de Fosfatos (PO_4^{3-})</i>	46
Figura 7. Variación del ICA por punto de muestreo	49
Figura 8. Variación por punto del índice ABI.....	53
Figura 9. Mapa de uso de suelo rio Cunuyacu	55
Figura 10. Mapa de temperatura.....	57
Figura 11. Mapa de precipitación.....	58
Figura 12. Mapa de la subcuenca del río Cutuchi	59
Figura 13. Gradiente longitudinal de la calidad del agua.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Beneficiarios del proyecto	5
Tabla 2. Actividades y sistemas de tareas	8
Tabla 3. Componentes fundamentales de la calidad del agua	10
Tabla 4. <i>Parámetros fisicoquímicos, sus unidades y valores guía</i>	12
Tabla 5. Comparación de límites permisibles de calidad del agua.....	13
Tabla 6. Grupos tróficos funcionales y respuestas ecológicas en sistemas andinos.....	15
Tabla 7. Clasificación ecológica del índice BMWP-Andino.....	15
Tabla 8. Factores contemporáneos de alteración de la calidad del agua en sistemas altoandinos.....	18
Tabla 9. Componentes simbólicos y ecológicos.....	20
Tabla 10. Dimensiones semióticas de la GICH	20
Tabla 11. Criterios de calidad para cuerpos de agua superficiales tipo B	22
Tabla 12. Parámetros físicos (campo – in situ).....	28
Tabla 13. Parámetros químicos (laboratorio)	28
Tabla 14. Microbiología	29
Tabla 15. Clasificación del ABI General.....	31
Tabla 16. Clasificación del ICA General según SNET	33
Tabla 17. Instrumentos /herramientas.....	34
Tabla 18. Resultados promedio de parámetros físicos	37
Tabla 19. Parámetros químicos del agua en los puntos de muestreo	42
Tabla 20. Concentración de coliformes fecales por punto de muestreo	47
Tabla 21. Valores del Índice de Calidad del Agua (ICA)	48
Tabla 22. Localización geográfica de muestreo del río Cunuyacu.....	55
Tabla 23. índices ABI e ICA por punto de muestreo	60
Tabla 24. Plan operativo de control de contaminación difusa.....	69

Tabla 25. Plan operativo de restauración ribereña y de hábitat	70
Tabla 26. Plan operativo de ordenamiento territorial	71
Tabla 27. Plan operativo de educación y participación	72
Tabla 28. Plan operativo de gobernanza.....	73
Tabla 29. Indicadores del programa de monitoreo, umbrales y metas	75
Tabla 30. Fase I (1–2 años): Intervención inmediata y fortalecimiento institucional	76
Tabla 31. Fase II (3–5 años): Restauración ecológica y ordenamiento territorial.....	77
Tabla 32. Fase III (6–10 años): Ajustes adaptativos y sostenibilidad	77
Tabla 33. Costos referenciales por línea estratégica.....	78
Tabla 34. Principales riesgos de la propuesta y medidas de mitigación.....	80

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título

-Análisis de los parámetros (físico, químico y biológico) en el Río Cunuyacu, Cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, periodo 2025.

Fecha de inicio:

-octubre 2025

Fecha de finalización:

-marzo 2026

Lugar de ejecución.

-La Laguna

-Ignacio flores

-Latacunga

-Cotopaxi

- Zona 17 Sur

Institución, unidad académica y carrera que auspicia

-Universidad Técnica de Cotopaxi

-Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

-Ingeniería Ambiental

Nombres de equipo de investigadores

-Tutor: PhD. José Antonio Andrade Valencia

-Lector 1 (presidente): Ing. Marco Antonio Rivera Morenos

-Lector 2: Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila

-Lector 3: M.Sc. Manuel Patricio Clavijo Cevallos.

-Jacho Dias Silvana Elizabeth

- Palomo Barrionuevo Paola Fernanda

Área de Conocimiento.

-Recursos Hídricos.

Línea de investigación:

-Análisis, conservación y aprovechamiento racional de la biodiversidad, fauna y recursos naturales para el desarrollo sustentable y la prevención de desastres naturales.

Línea de Vinculación:

-Sostenibilidad ambiental. Gestión de recursos naturales, Educación y comunicación para el desarrollo humano y social.

2. INTRODUCCIÓN

La calidad del agua de los sistemas fluviales representa un componente fundamental de la salud ecológica de los ecosistemas acuáticos y de los servicios ecosistémicos que proporcionan a las poblaciones humanas y a la biodiversidad (Matovelle et al., 2024). En los Andes ecuatorianos, las fuentes de agua dulce que se originan en los altos relieves andinos constituyen recursos hídricos esenciales para el consumo humano, el riego agrícola, la producción de energía y el mantenimiento de complejos procesos biológicos (Alcívar et al., 2025; Sinchiguano et al., 2023). Sin embargo, estas cuencas están sujetas a crecientes presiones antropogénicas, incluyendo actividades agrícolas, caudales urbanos y cambios en el uso del suelo, que alteran la calidad fisicoquímica y biológica del agua (Iza, 2020; Liñero et al., 2016).

La evaluación de la calidad del agua es un desafío multidimensional que requiere la integración de parámetros fisicoquímicos tradicionales, como el pH, el oxígeno disuelto, la turbidez y los nutrientes, con indicadores biológicos que reflejan respuestas ecológicas a las perturbaciones (Vargas et al., 2023). En este contexto, los macroinvertebrados acuáticos se han utilizado ampliamente como bioindicadores eficaces debido a su sensibilidad diferencial a la contaminación y su relativa permanencia en hábitats lóticos (Procel et al., 2025). La riqueza, composición y estructura trófica de las comunidades macroinvertebradas constituyen métricas biológicas que permiten caracterizar la salud ecológica de ríos y arroyos, complementando las mediciones fisicoquímicas (Moreno & Sagñay, 2024; Vargas et al., 2023).

En Ecuador, varios estudios han aplicado índices bióticos, como el BMWP-Col y otros índices multimétricos adaptados a la región andina, para evaluar la calidad de los ríos bajo diferentes niveles de impacto antropogénico (Cangás, 2025; Liñero et al., 2016; Vargas et al., 2023). Estas evaluaciones, realizadas en cuencas altas andinas y microcuencas, han reportado variaciones significativas en la calidad del agua asociadas tanto a las condiciones naturales (altitud, clima) como a las actividades humanas (agricultura, asentamientos urbanos), subrayando la necesidad de sistemas de monitoreo continuo y caracterización integrada (Sinchiguano et al., 2023; Vargas et al., 2023).

A pesar de los avances en las metodologías de evaluación, todavía existen lagunas en el conocimiento sobre el estado actual de ríos como el Cunuyacu en la provincia de Cotopaxi, donde los patrones espaciales y temporales de la calidad del agua y su relación con la estructura de los macroinvertebrados no han sido suficientemente caracterizados. Esta carencia limita la formulación de estrategias de gestión ambiental basadas en pruebas científicas sólidas. Por ello, es imprescindible desarrollar investigaciones que integren las dimensiones fisicoquímicas y

biológicas de la calidad del agua en las cuencas andinas altas, proporcionando una base sólida para la conservación de los recursos hídricos y la sostenibilidad regional.

Si bien este estudio proporciona una caracterización del estado actual del río Cunuyacu, aún existen vacíos importantes que deben ser abordados en futuras investigaciones. Se recomienda realizar monitoreos estacionales para identificar cambios a lo largo del año, así como ampliar la evaluación a parámetros no incluidos, como metales pesados, pesticidas y contaminantes emergentes. Así mismo, es esencial socializar estos resultados con la comunidad local, juntas de agua y autoridades parroquiales y cantonales para que sirvan de base para políticas públicas, estrategias de manejo integrado del recurso hídrico y medidas preventivas ante posibles impactos ambientales; la participación de los actores locales fortalecerá la gobernanza del agua y orientará futuras investigaciones hacia las necesidades reales del territorio.

3. JUSTIFICACIÓN

A pesar de su gran vulnerabilidad a las acciones humanas, los ríos altoandinos son una de las mayores fuentes de agua dulce para áreas rurales y urbanas, pero aún están insuficientemente investigados en comparación con otros ecosistemas. Un estudio reciente acerca de métodos para evaluar la calidad del agua en los ríos montañosos de los Andes ha llegado a la conclusión de que hay una falta de índices adaptados a las condiciones ecológicas andinas y que también hay escasez de investigaciones sistemáticas, lo que dificulta la administración informada de estos sistemas (Matovelle et al., 2024).

En estas circunstancias, es crucial la evaluación conjunta de parámetros biológicos, fisicoquímicos en el río Cunuyacu para reducir parcialmente esa falta de información en la región de Cotopaxi. En particular, en los Andes de Ecuador, los índices bióticos y las métricas estructurales del hábitat han mostrado que las cuencas afectadas por la minería, la agricultura y la urbanización sufren un deterioro a la vez de la calidad fisicoquímica y de la integridad ecológica (Armijos et al., 2025).

La falta de un seguimiento sistemático en ríos secundarios, por ejemplo, el Cunuyacu, significa que las autoridades locales toman decisiones basadas en información incompleta o anticuada. Esto incrementa la posibilidad de una degradación silenciosa del recurso hídrico y los servicios ecosistémicos relacionados. Por lo tanto, producir información acerca de la calidad del agua para el año 2025 es un requerimiento específico en términos ambientales y de planificación territorial en el cantón Latacunga. El estudio se enmarca en una línea establecida que sugiere examinar la calidad del agua mediante la combinación de indicadores bioquímicos

y parámetros fisicoquímicos, sobre todo macro y micro invertebrados, que han demostrado ser muy susceptibles a los contaminantes en ecosistemas lóticos (Ríos et al., 2014a).

La creación de índices particulares para la región andina, tal como el Índice Biótico Andino (ABI) o el índice IMEERA, pone de manifiesto que los planteamientos biológicos tienen que adaptarse a las características de altitud, temperatura y composición taxonómica propias de estos ríos (Villamarín et al., 2013). En términos prácticos, es indispensable monitorear de manera sistemática la calidad del agua para proteger los ecosistemas y tomar decisiones sobre el manejo ambiental y el control de la contaminación (Chapman & Sullivan, 2022).

Investigaciones en ríos de los Andes peruanos y ecuatorianos han demostrado que la fusión de indicadores biológicos y fisicoquímicos hace posible determinar orígenes de impacto y establecer prioridades para las acciones de gestión, incluso en escenarios con escasez de recursos para el monitoreo medioambiental (Custodio & Chávez, 2019).

Siguiendo esta línea, el estudio del río Cunuyacu no simplemente medirá la condición actual del recurso hídrico, sino que también creará una base técnica que va a ser empleada por las comunidades, entidades de control y el gobierno local para elaborar programas de seguimiento de tendencias con el tiempo, supervisión de descargas y restauración.

Asimismo, la comparación de los parámetros adquiridos con las leyes en vigor en Ecuador proporciona un valor aplicado extra, ya que posibilita establecer el nivel de cumplimiento de normas de calidad para diferentes usos del agua. Según la experiencia en otras cuencas andinas, emplear los índices biológicos junto con los límites normativos ayuda a determinar segmentos críticos y a priorizar acciones de saneamiento o protección (Ríos et al., 2014a; Villamarín et al., 2013).

Por último, la investigación se alinea de manera explícita con la Agenda 2030 y diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En su objetivo de desarrollo sostenible 6, las Naciones Unidas proponen la disminución de la polución y el fortalecimiento del control y manejo sustentable del recurso como vías para mejorar la calidad del agua. El ODS 11 fomenta comunidades y ciudades sustentables, lo que incluye la disminución del impacto medioambiental provocado por los asentamientos humanos, como es el manejo apropiado de aguas residuales y desechos (CEPAL, 2019). Y, el ODS 15, por su parte, destaca la importancia de proteger y restaurar los ecosistemas terrestres e interiores de agua dulce, como ríos y humedales, que son esenciales para la biodiversidad y la capacidad de adaptación ecológica.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

La investigación beneficia a la población que habita en el área de influencia directa del río Cunuyacu, provincia de Cotopaxi, cantón Latacunga; la información presentada en la Tabla 1 generada servirá de base para la gestión ambiental local, el seguimiento de la calidad del agua y la toma de decisiones por las autoridades y comunidades usuarias del recurso hídrico.

Tabla 1.

Beneficiarios del proyecto

Beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos
Parroquia de Ignacio Flores	Cantón Latacunga
Hombres: 7.184 Hb.	Hombres: 106.010 Hb.
Mujeres: 7.700 Hb.	Mujeres: 111.251 Hb.
Total: 14.884 Hb.	Total: 217.261 Hb.

Nota. Elaborado con base en datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos. Población por sexo al nacer, según provincia, cantón y área de residencia. (INEC 2022).

5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En la provincia de Cotopaxi, la calidad del agua superficial ha sido analizada en algunas investigaciones académicas, siendo el río Cutuchi uno de los principales cuerpos de agua del cantón Latacunga, que pertenece a la cuenca del río Pastaza; un estudio fisicoquímico y microbiológico a lo largo de cinco puntos de muestreo determinó que tres no cumplen con los límites máximos permisibles de la normativa ambiental ecuatoriana (TULSMA), por altos niveles de turbidez (hasta 180.2 NTU), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅ hasta 55.7 mg/L) y coliformes fecales (hasta 3115.5 NMP/100 mL) en sus tramos medio y bajo, donde se descargan cargas orgánicas e inorgánicas de origen urbano y agrícola. Usando el índice de calidad del agua (ICA-NSF), estos tramos fueron catalogados como "regular" en la parte alta y "malo" en las zonas media y baja, mostrando un deterioro influenciado por presiones antropogénicas en la cuenca (Sinchiguano et al., 2023). La calidad del agua en los ecosistemas altos andinos de Ecuador enfrenta una degradación creciente debido a la combinación de actividades humanas, deforestación, expansión urbana y agricultura intensiva. Estas presiones generan una alteración en las condiciones fisicoquímicas de los ríos y, en consecuencia, afectan a la composición y estructura de las comunidades biológicas, especialmente los macroinvertebrados acuáticos, que actúan como indicadores sensibles de la contaminación (Liñero et al., 2016; Vargas et al., 2023).

En el caso del río Cunuyacu, situado en el cantón de Latacunga, provincia de Cotopaxi, las observaciones preliminares e informes locales del Gobierno Autónomo Descentralizado

(GAD) de Latacunga señalan impactos medioambientales derivados de vertidos de aguas residuales domésticas y agrícolas, la acumulación de sedimentos y la deforestación de sus orillas. Estos factores han provocado una reducción en la transparencia del agua, alteraciones en los niveles de oxígeno disuelto y un aumento de la concentración de nutrientes, lo que puede conducir a procesos de eutrofización (Sinchiguano et al., 2023).

El problema de la calidad del agua no solo implica un riesgo ecológico, sino también una amenaza para la seguridad hídrica y la salud pública de las comunidades rurales que dependen directamente del río para sus actividades domésticas y agrícolas. Diversos estudios realizados en ríos altos andinos han demostrado que los cuerpos de agua cercanos a zonas urbanas y agrícolas presentan niveles más altos de contaminación orgánica y menor diversidad biológica, en comparación con tramos conservados o protegidos (Matovelle et al., 2024; Vargas et al., 2023).

A nivel nacional, la Estrategia Nacional de Calidad del Agua (ENCA) reconoce que menos del 40% de los cuerpos de agua monitorizados cumplen con los estándares de calidad para el consumo humano o riego (MSP, 2016). En Cotopaxi, los sistemas de monitorización presentan lagunas significativas de información en ríos secundarios como el Cunuyacu, lo que impide establecer una base fiable sobre su estado ecológico y evolución temporal.

La ausencia de estudios integrales que combinen indicadores fisicoquímicos con índices biológicos adaptados al contexto andino constituye una brecha crítica en la gestión ambiental regional. La literatura enfatiza que la implementación de metodologías mixtas como el índice biótico BMWP-Col o el Índice Biótico Andino (ABI) permite una evaluación más precisa del estado ecológico de los ríos, especialmente en zonas de alta montaña (Alcívar et al., 2025; Liñero et al., 2016; Procel et al., 2025).

Por lo tanto, el problema central de esta investigación radica en la falta de información actualizada y sistemática sobre la calidad del agua del río Cunuyacu, considerando tanto los parámetros fisicoquímicos como biológicos, lo que permite determinar el grado de alteración ambiental y su cumplimiento con la normativa ecuatoriana vigente (TULSMA, 2017). Esta ausencia de datos limita la formulación de estrategias de gestión ambiental, la toma de decisiones informada y la implementación de acciones de conservación y restauración de ríos. En consecuencia, la investigación busca responder a una necesidad específica: establecer un diagnóstico técnico-científico del estado actual del río Cunuyacu como herramienta de apoyo para la gestión sostenible de los recursos hídricos en el cantón de Latacunga.

6. OBJETIVOS DEL PROYECTO

6.1 Objetivo general

Analizar los parámetros (físicos, químicos y biológicos) en el río Cunuyacu, en el cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, durante el periodo 2025.

6.2 Objetivos específicos

- i. Diagnosticar las condiciones actuales del recurso hídrico del río Cunuyacu.
- ii. Analizar los parámetros físicos, químicos y biológicos existentes en el río Cunuyacu.
- iii. Elaborar una propuesta de conservación del río Cunuyacu.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS

Tabla 2.

Actividades y sistemas de tareas

Objetivo específico	Método	Actividades principales	Resultados esperados
1. Diagnosticar las condiciones actuales del recurso hídrico del río Cunuyacu.	Método observacional descriptivo de corte transversal. Técnicas: medición in situ y análisis básico de agua superficial.	1. Definir cuatro puntos representativos del cauce principal del río (P1–P4). 2. Realizar una campaña de muestreo en condiciones hidrológicas estables. 3. Medir in situ los parámetros físicos: temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto (OD).	Línea base de la condición física del recurso hídrico.
2. Analizar los parámetros físicos, químicos y biológicos del río Cunuyacu.	Método observacional con comparación espacial. Técnicas: medición multiparamétrica, análisis de laboratorio y caracterización biológica.	1. Determinar en laboratorio los parámetros químicos: DBO ₅ , DQO, nitratos (NO ₃ ⁻) y nitritos (NO ₂ ⁻). 2. Analizar coliformes fecales mediante el método de filtración por membrana. 3. Colectar macroinvertebrados bentónicos mediante red tipo kick o Surber. 4. Identificar macroinvertebrados a nivel de familia y cuantificar su abundancia. 5. Analizar la estructura comunitaria mediante el índice de diversidad de Shannon–Wiener.	Conjunto de parámetros físicos, químicos, microbiológicos y biológicos caracterizados por punto de muestreo.
3. Elaborar una propuesta de conservación del río Cunuyacu.	Método propositivo con enfoque técnico-ambiental. Técnicas: análisis integrador de resultados, revisión normativa y formulación de medidas de gestión ambiental.	1. Integrar los resultados físicos, químicos, microbiológicos y biológicos obtenidos en el diagnóstico. 2. Identificar las principales problemáticas ambientales y fuentes de contaminación. 3. Revisar lineamientos de gestión y conservación establecidos en la normativa ambiental vigente (TULSMA, Libro VI). 4. Formular estrategias de conservación, prevención y mitigación ambiental. 5. Proponer medidas de monitoreo y seguimiento del recurso hídrico.	Propuesta técnica de conservación del río Cunuyacu con estrategias de manejo, prevención, mitigación y monitoreo ambiental.

Fuente: Elaboración propia.

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA

8.1 Calidad del agua

La calidad del agua es un atributo esencial de los ecosistemas acuáticos y un indicador clave de sostenibilidad medioambiental. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018), el concepto de calidad del agua se define como el conjunto de características físicas, químicas, biológicas y microbiológicas que determinan su idoneidad para un uso particular. Este enfoque reconoce que el agua no es una sustancia químicamente pura, sino un sistema dinámico en el que los procesos naturales y las actividades humanas influyen simultáneamente en su composición (Matovelle et al., 2024).

En el campo de la ecología acuática, la calidad del agua se entiende como una expresión del equilibrio entre los componentes bióticos y abióticos del ecosistema (Allan, 2004). Parámetros fisicoquímicos, como el pH, la temperatura o el oxígeno disuelto, determinan las condiciones básicas para la vida acuática; mientras que los parámetros biológicos, representados por macroinvertebrados, algas o microorganismos, reflejan el estado ecológico resultante de estas condiciones (Rosenberg & Resh, 1993).

En contextos andinos altos, como la cuenca del río Cunuyacu, factores climáticos, altitud y actividades antrópicas (agricultura, urbanización y deforestación) generan variabilidad natural y espacial en los parámetros de calidad (Sinchiguano et al., 2023). Los ríos de montaña presentan características únicas: flujos fluctuantes, bajas temperaturas y alta oxigenación, condiciones que favorecen la diversidad biológica y la autopurificación, pero que también los hacen vulnerables a cambios en el uso del suelo (Liñero et al., 2016; Vargas et al., 2023).

Desde la perspectiva del ecosistema, la calidad del agua es un indicador sintético de integridad ecológica, entendido como la capacidad de un ecosistema para mantener su estructura, composición y funciones frente a perturbaciones. Esto implica que un río con alta integridad ecológica conserva su biodiversidad, sus procesos de ciclo de nutrientes y su capacidad de resiliencia, mientras que un río degradado presenta alteraciones en su estructura trófica, pérdida de hábitats y disminución de la calidad del agua.

Según el Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), la calidad del agua en Ecuador se evalúa mediante parámetros fisicoquímicos (pH, oxígeno disuelto, conductividad, nutrientes), parámetros microbiológicos (coliformes fecales) y biológicos (macroinvertebrados bentónicos), con referencia al Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI (TULSMA, 2017). Estos componentes se combinan para generar un diagnóstico completo, que se interpreta en relación con el tipo de uso del recurso

(consumo humano, agrícola, recreativo o preservación de la vida acuática).

En la Figura 1 se representa la forma en que interactúan conceptualmente los principales factores que definen la calidad del agua, donde las condiciones fisicoquímicas influyen directamente en la estructura biológica del sistema, la cual responde a las presiones antrópicas y a los procesos naturales de regulación.

La calidad del agua no es, por lo tanto, un valor único y absoluto, sino un estado variable que es resultado de la interacción entre los flujos externos y los procesos internos del ecosistema. Los estudios de monitoreo hídrico en Ecuador (Alcívar et al., 2025; Cangás, 2025; Liñero et al., 2016) coinciden en que las zonas de cabecera, menos intervenidas, tienen buenos valores de oxígeno disuelto, baja conductividad y alta diversidad biológica, mientras que los tramos medios y bajos, intervenidos por agricultura y ciudades, presentan alta concentración de nutrientes y baja diversidad de macroinvertebrados, por lo que la calidad del agua es un indicador para evaluar la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y su capacidad para generar servicios ecosistémicos; en el caso del río Cunuyacu, se busca establecer si sus condiciones actuales cumplen con los estándares ecológicos definidos en la legislación nacional y si la integridad del ecosistema se ve afectada por las actividades humanas. De manera sintética se expone los componentes fundamentales en la Tabla 3.

Tabla 3.

Componentes fundamentales de la calidad del agua

Dimensión	Parámetros representativos	Indicadores	Relevancia ecológica
Fisicoquímica	Temperatura, pH, OD, conductividad, nutrientes	Índice de calidad fisicoquímica	Condiciones básicas del hábitat
Microbiológica	Coliformes fecales, E. coli	NMP/100 mL	Contaminación fecal y riesgo sanitario
Biológica	Macroinvertebrados, algas, peces	BMWP-Col, Shannon H'	Estado ecológico e integridad biológica
Normativa	Límites de TULSMA y OMS	Cumplimiento regulatorio	Evaluación legal y de gestión ambiental

Fuente: Elaboración propia a partir de OMS (2018), TULSMA (2017), y Vargas et al. (2023).

8.2 Parámetros fisicoquímicos de evaluación

Los parámetros fisicoquímicos son indicadores para diagnosticar la calidad del agua y representan la primera evaluación del estado ecológico de un cuerpo de agua, ya que determinan el equilibrio entre los procesos naturales y las actividades humanas y permiten detectar tendencias de deterioro ambiental (Baird et al., 2017); además, proporcionan una evaluación numérica reproducible que apoya la interpretación biológica a través de índices ecológicos. En los ecosistemas altoandinos, los parámetros fisicoquímicos presentan alta

variabilidad espacial y temporal, influenciados por la hidrología, temperatura ambiental y actividades humanas localizadas a lo largo del cauce (Vargas et al., 2023).

8.2.1 Temperatura, pH y conductividad eléctrica

La temperatura es una variable maestra en los sistemas acuáticos, ya que determina la solubilidad de los gases, la viscosidad del agua, las tasas metabólicas de los organismos y la velocidad de las reacciones químicas. En ríos de montaña, las bajas temperaturas suelen ir asociadas a elevadas concentraciones de oxígeno disuelto, lo que favorece la estabilidad ecológica (Liñero et al., 2016), pero la deforestación y la disminución del caudal pueden provocar calentamientos localizados que alteran los procesos biológicos. El pH mide la acidez o alcalinidad del agua y es un factor determinante para la homeostasis de los organismos acuáticos; valores fuera del rango 6.5-8.5 pueden afectar a la disponibilidad de nutrientes y aumentar la toxicidad de metales como el aluminio o el cobre (Colley & Smith, 2001). En cuencas agrícolas, las aguas generalmente son ligeramente alcalinas por la escorrentía de restos de fertilizantes; la CE da una idea de la concentración total de sales e iones disueltos en el agua; un aumento de la CE puede ser indicativo de lixiviación de suelos, descargas urbanas o infiltración de aguas residuales (Smith et al., 1999). Los ríos andinos tienen valores menores a 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en condiciones naturales, pero valores superiores a 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ya señalan contaminación difusa (Sinchiguano et al., 2023).

8.2.2 Nutrientes: nitratos, nitritos y fósforo

Los nutrientes inorgánicos (nitrógeno y fósforo) son vitales para el crecimiento vegetal, pero en exceso causan eutrofización y deterioran la calidad del agua; las principales fuentes antrópicas son la agricultura intensiva, los fertilizantes, la ganadería y las aguas residuales domésticas (Custodio & Chávez, 2019; Smith et al., 1999). Los nitratos (NO_3^-) son muy solubles y se transportan fácilmente por escorrentía, mientras que los nitritos (NO_2^-) son intermediarios en la oxidación del amonio y son tóxicos incluso en bajas concentraciones (APHA, 2017). El fósforo total (P-T) proviene de detergentes y fertilizantes, y provoca eutrofización al estimular el crecimiento de algas, alterando el equilibrio trófico de los ríos. En los Andes ecuatorianos, los límites máximos permisibles para estos nutrientes están dados por el TULSMA (2017):

i. Nitratos: $\leq 10 \text{ mg/L}$

ii. Nitritos: $\leq 0.1 \text{ mg/L}$

iii. Fósforo total: $\leq 0.1 \text{ mg/L}$

Sobrepasar estos valores puede causar florecimientos excesivos de algas, agotamiento de oxígeno y muerte de organismos acuáticos susceptibles (Vargas et al., 2023).

8.2.3 Turbidez y sólidos suspendidos totales (SST)

La turbidez es la dispersión de la luz por partículas suspendidas en el agua; los sólidos suspendidos totales (SST) son una medida de la cantidad de material particulado, y ambos son indicadores de erosión, escorrentía y deforestación en las áreas de captación (Colley & Smith, 2001). En ríos altoandinos la turbidez se eleva en época de lluvias por el arrastre de sedimentos y los flujos superficiales. Un incremento constante de SST puede alterar la fotosíntesis de algas y macrofitas, cambiar los hábitats bentónicos y disminuir la transparencia del agua (Matovelle et al., 2024). Por ejemplo, estudios recientes en el río Cutuchi (Sinchiguano et al., 2023) y en el río Diablo Sacha (Alcívar et al., 2025) demuestran que los valores de turbidez se multiplican hasta por cinco entre la estación seca y la lluviosa, lo que demuestra que la calidad del agua está directamente relacionada con la estacionalidad de las lluvias. Estos parámetros se identifican en la Tabla 4 a continuación.

Tabla 4.

Parámetros fisicoquímicos, sus unidades y valores guía

Parámetro	Unidad	Valor óptimo	Valor de referencia	Relevancia ecológica
Temperatura	°C	≤ 25	≤ 30	Controla procesos metabólicos
pH	–	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	Influye en la biodisponibilidad de nutrientes
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	≥ 6	≥ 5	Indicador de condiciones aeróbicas
DBO ₅	mg/L	≤ 5	≤ 5	Representa carga orgánica
Conductividad eléctrica	μS/cm	≤ 1,000	≤ 1,000	Refleja sales disueltas
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	≤ 10	≤ 10	Controla eutrofización
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	≤ 0.1	≤ 0.1	Tóxico para organismos acuáticos
Fósforo total	mg/L	≤ 0.1	≤ 0.1	Favorece proliferación de algas
Turbidez	UNT	≤ 10	≤ 5–10	Determina transparencia del agua
Sólidos suspendidos totales	mg/L	≤ 50	≤ 50	Indica erosión y arrastre de partículas

Fuente: Elaboración propia con base en TULSMA (2017), OMS (2018) y Baird et al. (2017).

8.2.1 Límites permisibles de calidad de agua

La Tabla 5 presenta una comparación entre los valores guía establecidos por la norma ecuatoriana y los referentes internacionales.

Tabla 5.

Comparación de límites permisibles de calidad del agua

Parámetro	Unidad	Ecuador – TULSMA	OMS	Interpretación ecológica
pH	–	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	Rango óptimo para organismos acuáticos
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	≥ 6	≥ 5	Niveles adecuados de oxigenación
DBO ₅	mg/L	≤ 5	≤ 5	Indicador de carga orgánica
Conductividad eléctrica	μS/cm	≤ 1,000	≤ 1,000	Refleja concentración de sales disueltas
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	≤ 10	≤ 10	Previene eutrofización
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	≤ 0.1	≤ 0.1	Evita toxicidad aguda
Fósforo total	mg/L	≤ 0.1	≤ 0.1	Limita crecimiento de algas
Coliformes fecales	NMP/100 mL	≤ 0	0	Indicador sanitario crítico
Sólidos suspendidos totales	mg/L	≤ 50	≤ 50	Indica erosión y transporte de sedimentos
Temperatura	°C	≤ 25	≤ 30	Controla procesos metabólicos y gases

Fuente: Elaboración propia con base en TULSMA (2017) y OMS (2018).

8.2.1 Normas técnicas y protocolos analíticos

Los métodos de muestreo, conservación y análisis del agua siguen estándares internacionales reconocidos; en particular, este estudio se basa en el manual Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Baird et al., 2017), una referencia mundial para laboratorios ambientales. Además, la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:2013 establece los procedimientos para el muestreo y la preservación de muestras de agua, incluyendo los tipos de envases, preservantes y condiciones de transporte, garantizando la validez y reproducibilidad de los resultados de campo y laboratorio.

El apego al marco legal nacional e internacional en la investigación del río Cunuyacu asegura la coherencia metodológica y la validez legal de los resultados; el monitoreo de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos se ajustará a los límites del TULSMA (2017) y la OMS (2018), garantizando la comparabilidad y validez global de los datos; el uso de los principios de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos y del ODS 6 fortalece la orientación hacia la sostenibilidad, la participación comunitaria y la protección de los ecosistemas altoandinos, en línea con las metas nacionales de gestión hídrica del MAATE.

8.3 Indicadores biológicos: macroinvertebrados acuáticos

Los macroinvertebrados bentónicos son hoy por hoy una de las herramientas más poderosas para evaluar integralmente la calidad ecológica del agua, ya que son un reflejo de la condición del ecosistema a través del tiempo, reaccionando a cambios físicos, químicos y estructurales del hábitat (Hora et al., 2025; Sotomayor et al., 2025).

La evaluación biológica multimétrica (EBM) usando comunidades de macroinvertebrados es usada por programas de monitoreo en Ecuador, Perú y Colombia como complemento a los indicadores fisicoquímicos (Lafuente et al., 2025). Los macroinvertebrados acuáticos (insectos, crustáceos, moluscos, anélidos, entre otros) son sensibles a la contaminación, poco móviles y están ampliamente distribuidos en los ríos altoandinos, lo que los convierte en bioindicadores para detectar gradientes de alteración antropogénica (González et al., 2025; Mir et al., 2025).

8.3.1 Importancia ecológica de los macroinvertebrados

Los macroinvertebrados desempeñan roles vitales en los ecosistemas lóticos, como descomponedores de materia orgánica, recicladores de nutrientes y flujo de energía en las redes tróficas (Praeg et al., 2025; Sotomayor et al., 2025). Su diversidad taxonómica y funcional se asocia con la complejidad del hábitat y la estabilidad hidrológica; los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera (EPT) siguen siendo considerados como los más sensibles a la contaminación orgánica y química, por lo que su presencia en altas proporciones es señal de ecosistemas saludables y bien oxigenados (Escobar et al., 2025; Hora et al., 2025).

Por el contrario, taxones tolerantes como Chironomidae, Tubificidae o Simuliidae dominan en ríos con bajos niveles de oxígeno, enriquecidos en nutrientes o cubiertos por sedimentos finos, situación característica de ríos alterados por agricultura, aguas residuales domésticas o minería (Ortiz et al., 2025; Pantiga et al., 2025). Según Kaijser et al. (2025), los metaanálisis globales muestran que la pérdida de diversidad de macroinvertebrados se debe principalmente a tres presiones sinérgicas: aumento de temperatura, contaminación por nutrientes y fragmentación del hábitat.

8.3.2 Clasificación taxonómica y funcional

En la práctica científica actual los macroinvertebrados se identifican generalmente hasta familia, un punto de equilibrio entre precisión y aplicabilidad en terreno (Hora et al., 2025), pero la tendencia actual es usar la diversidad funcional (rasgos biológicos) en los análisis para comprender las respuestas ecológicas de las comunidades (Sotomayor et al., 2025). Los GTF originalmente propuestos por Cummins y adaptados para sistemas neotropicales han sido ajustados para los Andes como se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6.

Grupos tróficos funcionales y respuestas ecológicas en sistemas andinos

Grupo trófico funcional (GTF)	Función ecológica principal	Respuesta ante alteración	Familias representativas
Trituradores (Shredders)	Fragmentación de materia orgánica gruesa	Disminuyen en ríos con pérdida de bosque ribereño	Leptoceridae, Tipulidae
Raspadores (Scrapers)	Consumo de perifiton y algas	Sensibles al aumento de turbidez y sedimentación	Elmidae, Glossosomatidae
Recolectores (Collectors)	Consumen detritos finos y materia en suspensión	Aumentan en ríos eutrofizados	Chironomidae, Simuliidae
Filtradores (Filterers)	Filtran partículas orgánicas suspendidas	Toleran condiciones moderadas de contaminación	Hydropsychidae
Depredadores (Predators)	Regulación trófica, control de poblaciones	Mantienen abundancia estable	Perlidae, Dytiscidae

Fuente: Adaptado de Sotomayor et al. (2025) y Hora et al. (2025).

8.3.3 Índices biológicos modernos aplicables en los Andes

Los índices biológicos son capaces de medir la calidad ecológica a partir de la composición de macroinvertebrados, y se han afinado al combinarse con métricas de diversidad funcional, resistencia y sensibilidad local.

a) Índice BMWP-Andino

El BMWP-Andino es una reciente adaptación del tradicional BMWP-Col, calibrado para los Andes tropicales (Hora et al., 2025), y lo validó en ríos auríferos de montaña en Perú, donde halló una alta correlación ($r = 0.84$) entre su puntaje y la concentración de nitratos, demostrando su efectividad en condiciones de montaña. Los nuevos rangos de interpretación se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7.

Clasificación ecológica del índice BMWP-Andino

Rango Andino	BMWP-	Calidad biológica	Estado ecológico	Interpretación ambiental
> 120		Excelente	Alta integridad	Ecosistema sin perturbación
81–120		Buena	Integridad moderada	Ligeras alteraciones agrícolas
41–80		Regular	Baja integridad	Impacto urbano o agrícola
10–40		Mala	Degradada	Alta carga orgánica
< 10		Muy mala	Severamente degradada	Ecosistema eutrofizado

Fuente: Hora et al. (2025), *Water (Switzerland)*, 17(12), 1724. <https://doi.org/10.3390/w17121724>

b) Índice Biótico Andino (ABI-2024)

El ABI fue revisado por Vimos-Lojano (2025) y Ríos-Touma et al. (2024) para adaptarse a gradientes altitudinales superiores a 3.000 m s. n. m., integrando sensibilidad térmica y presencia de EPT. El índice pondera cada familia por su sensibilidad relativa y se correlaciona con el oxígeno disuelto y la DBO₅. Estudios recientes en Ecuador muestran que el ABI tiende a ser más sensible a los cambios estacionales que el BMWP-Andino (Carvajal et al., 2025).

c) Índice de diversidad Shannon–Wiener (H')

El índice de diversidad Shannon–Wiener (H') continúa siendo un indicador universal de estabilidad ecológica. Lafuente et al. (2025) aplicó este índice en ríos neotropicales y reportó valores $H' > 2.8$ en tramos de referencia, frente a $H' < 1.2$ en zonas con influencia agrícola. Su combinación con el ABI permite estimar la resiliencia ecológica del ecosistema fluvial.

8.3.4 Estudios recientes sobre macroinvertebrados en ríos altoandinos

Los estudios recientes en la región andina han confirmado la utilidad de los macroinvertebrados como indicadores de degradación ambiental y restauración ecológica. Sotomayor et al. (2025) demostró que la diversidad funcional de los macroinvertebrados se correlaciona positivamente con la heterogeneidad del hábitat ($r = 0.78$) y con la cobertura ribereña en ríos del sur del Ecuador. Carvajal et al. (2025) reportó una recuperación del 40 % de las familias EPT tras la restauración de humedales en páramos andinos. Ortiz et al. (2025) identificó umbrales ecológicos específicos para ríos semiáridos andinos, donde los valores BMWP menores a 50 reflejan contaminación moderada persistente. Lafuente et al. (2025) evidenció una marcada influencia estacional, donde la diversidad disminuye en época lluviosa debido al arrastre de materia orgánica y sedimentos. Estos estudios validan el uso conjunto del BMWP-Andino, el ABI-2024 y el índice de Shannon, proporcionando una interpretación integral del estado ecológico.

8.4 Factores de alteración de la calidad del agua

La calidad del agua en los ecosistemas fluviales altoandinos resulta del equilibrio entre procesos naturales (clima, geología, dinámica hidrológica) y presiones antrópicas (uso del suelo, urbanización, contaminación difusa). Cuando estas presiones superan la capacidad de resiliencia del sistema, se desencadena un deterioro progresivo de los componentes

físicoquímicos y biológicos, alterando su integridad ecológica (Feng et al., 2025; Kaijser et al., 2025). Estos procesos interactúan de manera sinérgica, afectando la oxigenación, los nutrientes disueltos, la turbidez y la composición de macroinvertebrados, indicadores clave de la salud ecológica (Ángeles et al., 2024; Terán et al., 2025).

8.4.1 Actividades agrícolas y contaminación difusa

La agricultura sigue siendo la principal fuente de contaminación difusa en las cuencas andinas del Ecuador; el uso masivo de urea, fosfatos y pesticidas genera escorrentías ricas en nitratos (NO_3^-) y fosfatos (PO_4^{3-}), que causan eutrofización y agotan el oxígeno disuelto (Terán et al., 2025). En la cuenca del Guachal (Ecuador), con AHP-GIS se evidenció que el 47 % del territorio agrícola está altamente vulnerable a la contaminación difusa, en áreas de alta pendiente y suelos arenosos. En Cotopaxi, estudios recientes midieron entre 8–13 mg/L de NO_3^- en zonas de cultivos intensivos, sobrepasando el límite de calidad ambiental del TULSMA (Vargas et al., 2023).

8.4.2 Descargas domésticas y expansión urbana

La urbanización periurbana en Latacunga y comunidades adyacentes al Cunuyacu ha incrementado las descargas directas de aguas residuales domésticas sin tratamiento. Estas aguas aportan altas cargas de materia orgánica, coliformes fecales, surfactantes y nutrientes, alterando los valores de DBO_5 , conductividad eléctrica y coliformes termotolerantes. En estudios del río Jucusbamba (Perú), Angeles et al. (2024) evidenció que los tramos urbanos presentaban valores de DBO_5 cinco veces mayores que los sectores rurales, mientras que la riqueza de macroinvertebrados se redujo en un 60 %. De manera similar, el MAATE (2024) reportó que menos del 35 % de las aguas residuales del Ecuador reciben tratamiento previo. Además, la impermeabilización del suelo urbano incrementa la escorrentía y la erosión, promoviendo picos de caudal y transporte de sedimentos, lo que afecta tanto la calidad del agua como la estabilidad geomorfológica de los cauces (Hecht et al., 2024).

8.4.3 Deforestación y degradación de zonas riparias

Las zonas riparias son filtros naturales que atenúan el flujo de sedimentos y nutrientes hacia los ríos; su deforestación eleva la temperatura del agua, la radiación solar y la sedimentación, disminuyendo los hábitats acuáticos (Feng et al., 2025). Por ejemplo, estudios recientes en áreas protegidas de los Andes tropicales encontraron que la pérdida de cobertura vegetal en las riberas puede aumentar la temperatura del agua hasta 3.5°C y disminuir el oxígeno disuelto en 1.5 mg/L (Angeles et al., 2024; Feng et al., 2025), afectando la abundancia

de macroinvertebrados sensibles (EPT) y favoreciendo especies tolerantes como Chironomidae y Tubificidae. Además, la sustitución de vegetación nativa por cultivos o pastizales reduce la conectividad ecológica, altera los ciclos biogeoquímicos y aumenta la erosión de márgenes (Kaijser et al., 2025).

8.4.4 Cambio climático y variabilidad hidrológica

El cambio climático es uno de los factores de alteración más críticos para los ecosistemas altoandinos. Los registros de los últimos 30 años muestran un incremento promedio de 0.23 °C por década en la temperatura media y una mayor irregularidad en los patrones de lluvia (González et al., 2025). Estos cambios afectan la recarga hídrica, la disponibilidad de caudal y los procesos de autodepuración natural de los ríos (Matovelle et al., 2024). Según González et al. (2025), los descensos prolongados de caudal en estaciones secas reducen el tiempo de residencia del agua, concentrando contaminantes y disminuyendo la capacidad de dilución. Kaijser et al. (2025) reporta que los ecosistemas fluviales tropicales de montaña muestran pérdidas promedio de 25–40 % de su biodiversidad bentónica bajo escenarios de incremento térmico y eventos de lluvia extrema.

8.4.5 Interacciones sinérgicas de los factores de alteración

La combinación de presiones agrícolas, urbanas y climáticas produce impactos acumulativos sobre el sistema fluvial. Estas interacciones se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8.

Factores contemporáneos de alteración de la calidad del agua en sistemas altoandinos

Factor de alteración	Fuente principal	Parámetros afectados	Consecuencias ecológicas
Agricultura intensiva	Fertilizantes y pesticidas	↑ NO ₃ ⁻ , ↑ PO ₄ ³⁻ , ↓ OD	Eutrofización, proliferación algal
Urbanización	Aguas residuales domésticas	↑ DBO ₅ , coliformes	↑ Contaminación orgánica, pérdida de biodiversidad
Deforestación ribereña	Tala, ganadería, incendios	↑ Temperatura, ↑ SST	Menor oxigenación, pérdida de hábitat
Cambio climático	↑ Temperatura, ↓ caudal	OD, conductividad, pH	Reducción de resiliencia ecológica
Urbanismo planificado	no Impermeabilización, residuos sólidos	↑ Turbidez, nutrientes	↑ Alteración hidrológica, erosión

8.5 Enfoques teóricos aplicados

El análisis integral de la calidad del agua en ecosistemas fluviales exige un marco teórico que trascienda la medición fisicoquímica y permita interpretar los procesos ecológicos y sociales como sistemas de significación ambiental. Los ríos no solo son flujos hidrológicos, sino textos ecológicos donde cada parámetro (como el oxígeno disuelto o la presencia de macroinvertebrados) representa signos biológicos de equilibrio o degradación (Hemraj & Carstensen, 2025).

En el caso de ríos, se aplican cuatro enfoques contemporáneos:

- i. el enfoque ecosistémico,
- ii. el enfoque de resiliencia ecológica,
- iii. el enfoque de integridad ecológica,
- iv. y el enfoque de gestión integrada de cuencas hidrográficas (GICH).

Estos paradigmas, actualizados entre 2024 y 2026, proporcionan las bases epistemológicas para interpretar la estructura, función y significación ecológica del sistema fluvial andino, conectando los indicadores biológicos con los procesos simbólicos de sostenibilidad y gobernanza ambiental (Vega et al., 2025; Yaulilahua et al., 2025).

8.5.1 Enfoque ecosistémico

El enfoque ecosistémico, definido por la CDB (2020) y recientemente ampliado por Yaulilahua et al. (2025), concibe a los ecosistemas como redes vivas interdependientes, donde las dimensiones ecológicas, culturales y sociales interactúan de manera dinámica. En este marco, la calidad del agua se interpreta como un signo sintético de las relaciones entre los flujos de energía, materia e información que circulan en el territorio (Hemraj & Carstensen, 2025). Los ríos altoandinos se configuran como textos ecológicos de alta fragilidad semántica, donde una mínima alteración en el uso del suelo o en la cobertura vegetal genera un cambio de significado en los indicadores biológicos: la disminución del oxígeno o la pérdida de macroinvertebrados sensibles “hablan” del desequilibrio ecosistémico (Rivera, 2025).

8.5.2 Enfoque de resiliencia ecológica

El concepto de resiliencia ecológica ha evolucionado desde Holling (1973) hacia un enfoque adaptativo basado en la teoría de la complejidad ambiental. De acuerdo con Folke et al. (2010) y Vega et al. (2025), la resiliencia no solo implica la recuperación del sistema tras

una perturbación, sino la capacidad de aprender, reorganizarse y transformar su estructura sin perder funcionalidad. Desde la semiótica ecológica, la resiliencia se lee como un discurso adaptativo del ecosistema: cada respuesta biológica (la recolonización de insectos EPT o la reducción de DBO₅) constituye una narrativa de resistencia frente a la degradación. De tal manera se puede apreciar los componentes y su dimensión semiótica en la Tabla 9.

Tabla 9.

Componentes simbólicos y ecológicos

Componente ecológico	Dimensión semiótica
Diversidad biológica	Polisemia ecológica: múltiples respuestas ante un mismo disturbio
Conectividad longitudinal	Cohesión narrativa del cauce
Autodepuración	Discurso regenerativo natural
Redundancia funcional	Sinónimos ecológicos de estabilidad

8.5.3 Enfoque de integridad ecológica

El enfoque de integridad ecológica, actualizado por Kaijser et al. (2025) y Lai et al. (2026), plantea que un ecosistema conserva su integridad cuando sus signos ecológicos (estructura, función y composición) mantienen coherencia interna. En otras palabras, la integridad ecológica es una gramática ambiental: cuando los signos del río (su biodiversidad, flujos y hábitats) se alteran, el texto ecológico se fragmenta y pierde significado (Hemraj & Carstensen, 2025). En el contexto del río Cunuyacu, los índices ABI, BMWP-Col y el Índice de Diversidad de Shannon funcionan como lexemas biológicos, es decir, unidades significativas del lenguaje ecológico que expresan el nivel de alteración del ecosistema (Ríos et al., 2014).

8.5.4 Enfoque de gestión integrada de cuencas hidrográficas (GICH)

El enfoque GICH, renovado por Mudenda et al. (2025) y Yaulilahua et al. (2025), articula la gestión del agua desde una visión semiótico-sistémica. Considera la cuenca como una unidad de sentido territorial, donde los procesos ecológicos (oferta hídrica, regulación) se vinculan con los procesos sociales (uso, gobernanza, valores simbólicos del agua). De acuerdo con Lai et al. (2026), la gestión integrada moderna incorpora patrones de seguridad ecológica basados en datos multiescalares (geoespaciales, sociales y biológicos) que permiten anticipar vulnerabilidades y diseñar políticas adaptativas. Las dimensiones se exponen la Tabla 10.

Tabla 10.

Dimensiones semióticas de la GICH

Dimensión	Significado operativo
------------------	------------------------------

Biofísica	Integración de procesos ecológicos y climáticos
Socioecológica	Interacción entre actores y ecosistemas
Comunicacional	Traducción del lenguaje científico al social
Política	Gobernanza adaptativa y multiescalar

8.6 Marco legal y normativo

El marco legal que ampara la calidad del agua en Ecuador y a nivel mundial define los parámetros y límites permisibles para proteger el recurso hídrico, la salud humana y los ecosistemas acuáticos.

8.6.1 Marco constitucional del recurso hídrico

En el Ecuador, el agua es un derecho humano y un bien público estratégico, como lo reconoce la Constitución de la República del Ecuador (2008).

El Art. 12 establece:

"El derecho humano al agua es esencial e inalienable". El agua constituye un patrimonio nacional estratégico de uso público, dominio del Estado, inalienable, imprescriptible e inembargable".

Asimismo, el artículo 318 establece que la gestión del agua debe realizarse bajo criterios de sostenibilidad, priorizando el consumo humano y garantizando la conservación de los ecosistemas asociados, mediante una gestión integrada de cuencas hidrográficas. Estas disposiciones constitucionales obligan al Estado y a la sociedad a prevenir la contaminación del agua, proteger las fuentes naturales y asegurar la calidad del recurso hídrico para las generaciones presentes y futuras, constituyendo el fundamento jurídico superior del presente estudio.

8.6.2 Normativa legal nacional aplicable

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (Asamblea Nacional, 2014) aplica el mandato constitucional y define los principios de la gestión integral del recurso hídrico, orientada al Buen Vivir (Sumak Kawsay).

En su artículo 3, la ley le da prioridad al uso del agua para consumo humano, riego para garantizar la soberanía alimentaria, conservación de los ecosistemas acuáticos. Además,

fomenta la participación ciudadana, la planificación por cuencas hidrográficas y el control de la contaminación, las cuales son determinantes para el diagnóstico ambiental del río Cunuyacu.

8.6.3 Normativa ambiental secundaria: calidad del agua

El principal instrumento regulatorio para la evaluación de la calidad del agua en el Ecuador es el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), específicamente:

- Libro VI: De la Calidad Ambiental
- Anexo 1: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes – Recurso Agua (MAATE, 2017).

Esta norma establece los límites máximos permisibles (LMP) para cuerpos de agua superficiales, clasificados según su uso. De acuerdo con esta normativa, el río Cunuyacu corresponde a un cuerpo de agua superficial tipo B, apto para:

- i. Riego agrícola,
- ii. Abrevadero de animales,
- iii. Conservación de flora y fauna acuática,
- iv. Otros no consuntivos.

Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados en el presente estudio se presentan en la Tabla 11 y se compararon con los criterios de calidad establecidos en el Anexo 1 del Libro VI del TULSMA, para establecer el cumplimiento o incumplimiento ambiental por punto de muestreo.

Tabla 11.

Criterios de calidad para cuerpos de agua superficiales tipo B

Parámetro	Unidad	Límite máximo permisible	Significado normativo
Nitratos (NO_3^-)	mg/L	≤ 13	Evita exceso de nutrientes y eutrofización
Nitritos (NO_2^-)	mg/L	≤ 0.20	Controla toxicidad por nitrógeno reducido
DBO ₅	mg/L	≤ 20	Establece carga biodegradable aceptable
DQO	mg/L	≤ 40	Materia orgánica total oxidable
Coliformes fecales	NMP/100 mL	≤ 1000	Uso seguro para riego y abrevadero
pH	—	6.0 – 9.0	Rango adecuado para vida acuática
Temperatura	°C	+3°C sobre temperatura natural	Evita choques térmicos

Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	≤ 1000	Evita sales disueltas en exceso
Turbidez	UNT	≤ 75	Afecta luz y fotosíntesis
Oxígeno disuelto	mg/L	≥ 4.0	Mínimo para vida acuática

Fuente: Libro VI: Calidad Ambiental – Anexo 1: Parámetros de Calidad para Cuerpos de Agua Superficiales.

Además, el Acuerdo Ministerial N.º 097-A (2015) del MAATE establece los procedimientos técnicos para el seguimiento, control y reporte de la calidad del agua, atribuyendo responsabilidades a los Gobiernos Autónomos Descentralizados y a los gestores del recurso hídrico.

9. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

El análisis de los parámetros físicos, químicos y biológicos en el río Cunuyacu, ¿permitirá determinar la calidad actual de sus aguas?

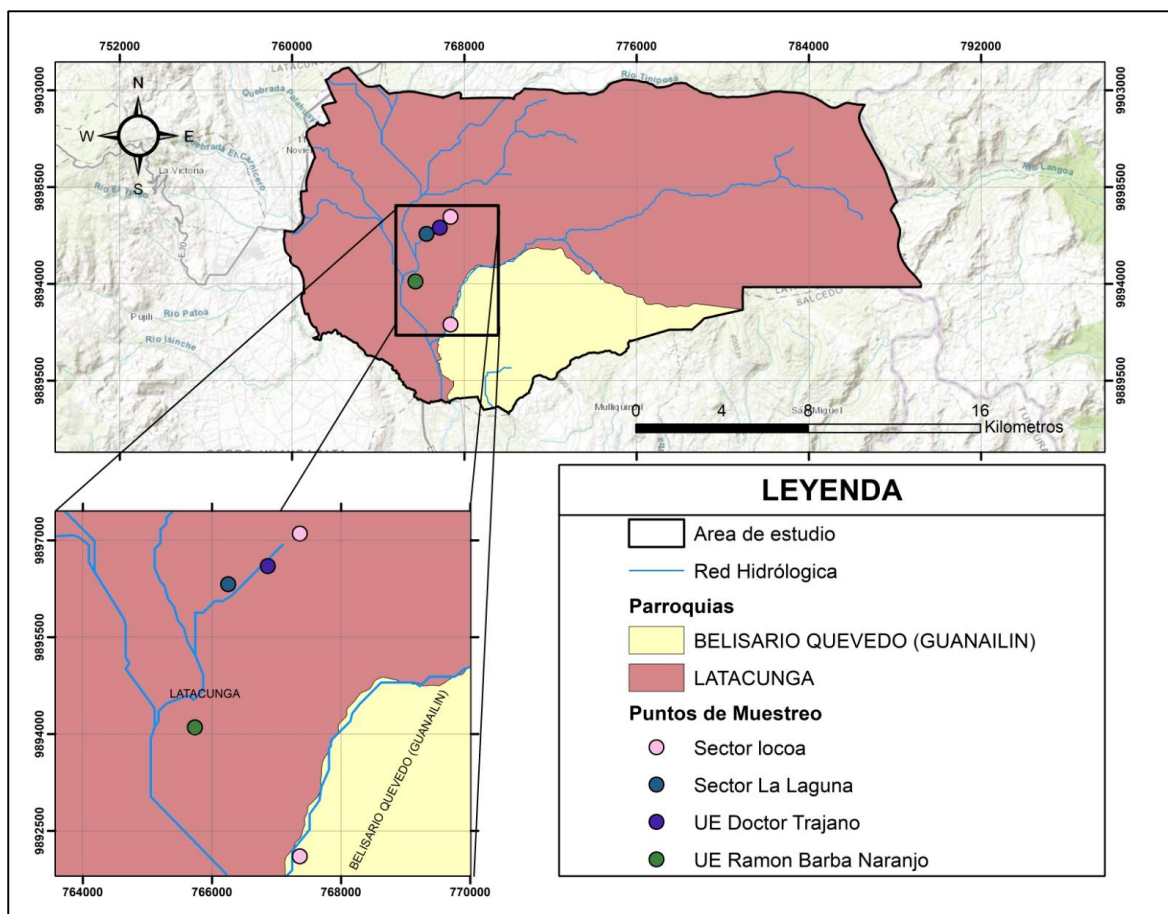
Sí, el análisis de los parámetros físicos, químicos y biológicos del río Cunuyacu permite conocer la calidad actual de sus aguas, ya que estos parámetros son un reflejo de las condiciones ambientales, alteración antrópica y estado ecológico del cuerpo de agua, y la evaluación conjunta de estos parámetros permite detectar cambios en la composición del agua, determinar si cumple con la normativa ambiental y clasificar su calidad según criterios técnicos y científicos, dando un diagnóstico de la situación actual del río.

Estudios realizados en el río Cunuyacu evaluaron parámetros físicos como temperatura, turbidez, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto; parámetros químicos como DBO5, DQO, nitratos, nitritos y fosfatos; y parámetros biológicos basados en macroinvertebrados. Esta combinación metodológica permitió obtener una visión general del estado del recurso hídrico, ya que los parámetros fisicoquímicos muestran el estado inmediato del agua, mientras que los parámetros biológicos reflejan el efecto acumulativo de la contaminación en el tiempo. Los resultados mostraron un deterioro significativo. El índice de calidad del agua (ICA) presentó valores de 24,51; 24,75 y 22,54 para P1, P2 y P3 respectivamente (clasificados como "muy pesima") y 28,97 para P4 (clasificados como "mala"), todos por debajo del umbral mínimo de 50 establecido como referencia. De manera similar, ABI informó una calidad "mala" en P1 (21) y condiciones "terribles" en P2, P3 y P4 (11), lo que indica severos cambios ecológicos. Además, la baja concentración de oxígeno disuelto (2,8-4,8 mg/L) y el aumento longitudinal de fosfato (0,06 mg/L P1 a 0,18 mg/L P4) indican procesos de enriquecimiento de nutrientes. No se detectaron coliformes fecales (<1 UFC/100 ml), la degradación físico-química y biológica indica que el río se ve afectado paulatinamente por actividades agrícolas, escorrentías domésticas y cambios en la vegetación del río.

10. ÁREA DE ESTUDIO

El río Cunuyacu atraviesa la Ciudad de Latacunga en la Provincia de Cotopaxi, en la cuenca alta del río Cutuchi; es un sistema lótico altoandino que se origina en las faldas occidentales del volcán Cotopaxi, entre 3.400 y 3.600 m s. n. m., donde dominan pajonales, humedales y suelos volcánicos recientes. Discurre en sentido longitudinal hasta aproximadamente 2.900 m s. n. m., en una longitud aproximada de 8 a 10 km, hasta alcanzar el río Cutuchi. El Cunuyacu es un río perenne, alimentado por aguas de lluvia y subterráneas; sus caudales son más constantes en la estación seca (junio-septiembre) y aumentan ligeramente en la estación lluviosa (octubre-mayo). Las aguas de los ríos altoandinos tienen temperaturas características entre 10 y 16 °C y están bien oxigenadas por la turbulencia y los fuertes gradientes. En este estudio, el gradiente longitudinal se refiere a la variación progresiva de las condiciones físicas, químicas y biológicas del río desde la cabecera hasta los tramos medios y bajos, asociada al cambio en el uso del suelo y la presión antrópica. La ubicación geográfica, el trayecto del río Cunuyacu y su conexión con la cuenca alta del río Cutuchi se ilustran en la Figura 1, que muestra el área de estudio y el contexto físico del sistema fluvial estudiado.

Figura 1. Área de estudio – Río Cunuyacu



Nota. Elaboración propia a partir de la composición en el software georreferencial QGIS 3.40.

11. METODOLOGÍA

La metodología del estudio se diseñó para obtener información precisa, verificable y reproducible de los parámetros físicos, químicos y biológicos seleccionados para evaluar la calidad del agua del río Cunuyacu en el año 2025, utilizando protocolos técnicos para ríos altoandinos y estándares nacionales e internacionales para el análisis del agua, con mediciones directas en campo y análisis en laboratorio acreditado. La estructura metodológica se basa en experiencias previas de monitoreo hídrico en ríos de la provincia de Cotopaxi, donde la evaluación de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos se ha utilizado como herramienta de diagnóstico de la calidad del agua en sistemas fluviales andinos (Sinchiguano et al., 2023).

11.1 Diseño de investigación

La investigación es de enfoque mixto (cualitativo-cuantitativo) de tipo descriptivo-observacional, ya que solo describe y caracteriza las condiciones actuales de la calidad del agua

del río Cunuyacu a partir de la información recolectada directamente en campo y laboratorio, sin realizar tratamientos ni manipulaciones experimentales ni seguimientos temporales extensos.

Se recolectaron datos directamente en campo y laboratorio, tomando mediciones puntuales de parámetros físicos, químicos, microbiológicos y biológicos para caracterizar el estado actual del río en el periodo de estudio. Estos datos se interpretaron para dar una caracterización ambiental integrada usando valores numéricos y criterios normativos, pero sin diseños experimentales ni inferenciales.

Desde la perspectiva espacial, se realizó un muestreo transversal a lo largo del cauce, determinando cuatro puntos representativos a lo largo del río Cunuyacu: desde una parte de referencia con escasa intervención humana hasta áreas con influencia periurbana y agrícola. Esta distribución espacial posibilita la detección de patrones de cambio y gradientes de modificación medioambiental vinculados con la utilización del suelo y las presiones humanas que se encuentran en la cuenca.

11.2 Población y muestra

La investigación se realizó en el año 2025 y tomó como población de estudio el recurso hídrico superficial del cauce principal del río Cunuyacu, que está situado en la provincia de Cotopaxi, específicamente en el cantón Latacunga. En el marco de los ecosistemas lóticos altoandinos, la población no se entiende como unidades discretas, sino como un sistema continuo de agua en movimiento. Sus propiedades biológicas y fisicoquímicas dependen de la dinámica hidrológica y de los gradientes longitudinales.

El estudio utilizó una muestra compuesta por unidades espaciales, que se representaron mediante cuatro puntos fijos y georreferenciados a lo largo del río Cunuyacu. Se establecieron con el objetivo de capturar un gradiente de alteración desde las zonas de referencia hasta las agrícolas y periurbanas. El muestreo se llevó a cabo en una sola campaña en condiciones de estabilidad hidrológica, las cuales se consideraron representativas del periodo que fue analizado.

11.3 Técnicas de recolección de datos

11.3.1 Selección de puntos y temporalidad

El muestreo se estructuró en cuatro puntos de control distribuidos a lo largo del gradiente longitud 200 del río Cunuyacu, seleccionados por su capacidad para representar las principales condiciones de uso del suelo y las presiones antrópicas de la microcuenca. El Punto 1 (Sector Locoá) se localiza en la parte alta del cauce y corresponde a la zona de cabecera, donde predominan coberturas seminaturales y actividades agrícolas de baja intensidad. El Punto 2 (Unidad Educativa Dr. Trajano Naranjo Iturralde) se ubica en el tramo medio alto, en un entorno de transición donde coexisten áreas agrícolas, infraestructura educativa y asentamientos periurbanos. El Punto 3 (Sector La Laguna) representa el tramo medio bajo y está influenciado por una mayor interacción entre usos agrícolas intensivos y descargas domésticas. Finalmente, el Punto 4 (Unidad Educativa Ramón Barba Naranjo) se sitúa en el tramo inferior del río, donde confluyen los aportes acumulativos de las subcuencas y se manifiestan con mayor intensidad los impactos antrópicos.

Las campañas de muestreo se realizaron bajo condiciones hidrológicas estables, evitando episodios de lluvia intensa en las 48 horas previas, con el propósito de minimizar el efecto de eventos de arrastre puntual y capturar el comportamiento base del sistema. La planificación temporal se orientó a obtener una fotografía integrada de la calidad del agua y de la respuesta biológica en un periodo representativo, sin la interferencia de crecidas extraordinarias.

11.3.2 Protocolo general de muestreo

La toma de muestras se llevó a cabo siguiendo los protocolos nacionales para aguas superficiales y bioindicación, con énfasis en la estandarización de procedimientos entre puntos. En cada sitio se definieron zonas de acceso seguro al cauce y se delimitaron tramos homogéneos en términos de profundidad, velocidad de flujo y tipo de sustrato. Se aplicaron rutinas de enjuague previo de recipientes, preservación inmediata cuando fue necesario y registro sistemático de las condiciones ambientales (hora, estado del tiempo, caudal aparente), de modo que la información química, microbiológica y biológica se obtuviera bajo un mismo marco operativo.

11.3.3 Parámetros fisicoquímicos

Las mediciones in situ y los análisis de laboratorio se emplearon para caracterizar de manera integral la composición fisicoquímica del agua. La determinación en campo se realizó con un equipo multiparamétrico previamente calibrado conforme a los procedimientos establecidos por la American Public Health (Association), garantizando la precisión de los registros. Se midieron temperatura, conductividad eléctrica, pH, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto y potencial redox en cada uno de los puntos de muestreo, tal como se detalla en la Tabla 12.

Tabla 12.

Parámetros físicos (campo – in situ)

Parámetro	Técnica	Instrumento	Unidad	Réplicas
Temperatura	Medición directa	Sonda multiparámetro	°C	3
Conductividad eléctrica	Medición directa	Sonda multiparámetro	μS/cm	3
Sólidos disueltos totales (TDS)	Medición directa	Sonda multiparámetro	mg/L	3
Oxígeno disuelto (OD)	Medición directa	Multiparámetro o Winkler	mg/L	3
Potencial Redox (ORP)	Medición directa	Sonda multiparámetro	mV	3
pH	Medición directa	Sonda multiparámetro	–	3

Nota. Se eligen estos parámetros debido a que son los requeridos por la regulación de Ecuador y son los más aplicados para medir la presión en ríos montañosos, tanto urbana como agrícola.

La recolección de muestras destinadas al análisis de nitratos, nitritos, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅) se efectuó siguiendo estrictamente la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2176:2013 “Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras”, la cual especifica los tipos de envase, los volúmenes mínimos, los preservantes y los tiempos máximos de conservación permitidos. Asimismo, se consideraron los lineamientos nacionales emitidos por Agrocalidad para muestreo de aguas superficiales, que establecen los procedimientos para asegurar la representatividad y evitar la contaminación cruzada. Los análisis se efectuaron en laboratorio mediante métodos estandarizados APHA, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13.

Parámetros químicos (laboratorio)

Parámetro	Método	Instrumento
Nitritos (NO ₂ ⁻)	APHA 4500-NO ₂ ⁻	Espectrofotómetro UV-Vis

Nitratos (NO ₃ ⁻)	APHA 4500-NO ₃ ⁻	Espectrofotómetro UV-Vis
DQO	APHA 5220-D	Digestor + UV-Vis
DBO ₅	APHA 5210-B	Incubadora BOD

Nota. Se eligen estos parámetros debido a que son los requeridos por la regulación de Ecuador y son los más aplicados para medir la presión en ríos montañosos, tanto urbana como agrícola.

La selección de estos parámetros responde a criterios técnicos aplicados de manera consistente en estudios de calidad del agua en ríos andinos, ya que permiten detectar alteraciones vinculadas a actividades agrícolas, asentamientos periurbanos y descargas domésticas.

11.3.4 Parámetros microbiológicos

En lo que respecta al componente microbiológico, se analizó los coliformes termotolerantes (fecales), que constituyen indicadores de contaminación fecal típica en las aguas superficiales los cuales se puede apreciar en la Tabla 14. La técnica principal que se empleó es el método de filtración por membrana, como se explica en Standard Methods (2017). Este procedimiento consiste en filtrar un volumen de agua conocido a través de una membrana de 0,45 µm, incubar en medios selectivos y contar las colonias específicas. La elección de estos parámetros se basa en su importancia para detectar los efectos resultantes de las descargas industriales, agrícolas y domésticas (Rengifo & González, 2020).

Tabla 14.

Microbiología

Parámetro	Técnica	Instrumento laboratorio
Coliformes fecales/E. coli	Filtración por membrana (SM 9222-D)	Bomba de vacío + incubadora

Fuente: *Elaboración propia.*

Con el mismo conjunto de indicadores microbiológicos, se han realizado estudios en la Sierra ecuatoriana para definir la idoneidad del agua y determinar si se cumplen los criterios de calidad establecidos por las regulaciones nacionales.

11.3.5 Muestreo biológico de macroinvertebrados

La evaluación biológica del río Cunuyacu se basó en el muestreo de macroinvertebrados bentónicos presentes en el lecho del cauce. En cada punto se seleccionaron microhábitats representativos del tramo (rápidos, pozas someras y zonas de corriente moderada) y se aplicó una técnica estandarizada de disturbio y captura sobre el sustrato, de manera de abarcar la mayor diversidad de nichos disponible. El material recolectado se

preservó adecuadamente y se sometió luego a un proceso de identificación en laboratorio hasta el nivel de familia, utilizando claves taxonómicas específicas para sistemas altoandinos.

Los registros taxonómicos y de abundancia obtenidos constituyeron la base para el cálculo del Índice Biótico Andino (ABI) y del índice de diversidad de Shannon–Wiener (H'), que en la fase de análisis permiten vincular la respuesta de las comunidades bentónicas con las condiciones de calidad del agua a lo largo del gradiente longitudinal del río.

Se utilizó una red (de aproximadamente 500 μm) adecuada para capturar macroinvertebrados unidos al sustrato. El procedimiento implicó colocar la red río arriba y retirar el sustrato río arriba durante aproximadamente 1 a 3 minutos en cada microhábitat agitación manual de rocas y fregado para aflojar los organismos adheridos y permitir que la corriente los arrastre hacia la red. Este procedimiento se repitió en diferentes puntos de cada estación de muestreo para garantizar la representatividad.

El material recolectado se transfirió cuidadosamente a bandejas de plástico blanco para su inspección preliminar en el campo, donde se retiraron hojas, piedras grandes y material grueso. Luego las muestras se colocaron en botellas de plástico etiquetadas con código de punto, fecha y hora de muestreo y se conservaron con alcohol al 70% para su conservación y transporte al laboratorio.

11.1 Técnicas de análisis de datos

El procesamiento de los datos se desarrolló bajo un enfoque integral que combinó información fisicoquímica, microbiológica y biológica con el fin de evaluar la calidad ambiental del río Cunuyacu desde una perspectiva ecológica y funcional. Todos los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos empleados en el análisis fueron generados mediante mediciones in situ o a través de procedimientos acreditados en laboratorio conforme a la norma ISO/IEC 17025:2017, lo que garantiza la exactitud analítica, la repetibilidad y la trazabilidad metrológica de los resultados obtenidos. La coherencia metodológica entre las distintas líneas de evidencia permitió integrar observaciones químicas con la respuesta biológica de la comunidad bentónica, reduciendo el riesgo de interpretaciones basadas exclusivamente en mediciones puntuales o en criterios normativos aislados.

11.1.1 Índices biológicos

- **Índice Biótico Andino (ABI General)**

La integridad ecológica del sistema se evaluó mediante el Índice Biótico Andino (ABI), desarrollado específicamente para ríos altoandinos y validado en estudios recientes como el aplicado en el río Yasipán (Ponce et al., 2022). Este índice asigna a cada familia de macroinvertebrados un valor de sensibilidad ecológica, reflejando su tolerancia relativa a la alteración orgánica, la variación del hábitat y las fluctuaciones fisicoquímicas del agua. La puntuación del punto de muestreo se obtiene mediante la suma total de los valores asignados a todas las familias registradas, siguiendo la expresión:

$$ABI = \sum_{i=1}^n S_i$$

Donde S_i corresponde a la puntuación ecológica asignada a la familia i , y n es el número total de familias presentes en cada punto de muestreo. Los valores se interpretan siguiendo las categorías utilizada por Jiménez & Suárez (2021) en un estudio previo aplicado en el mismo río. Conforme a esta escala presente en la Tabla 15. Esta categorización permite identificar gradientes de presión ambiental y reconocer patrones de degradación longitudinal característicos de cuencas sometidas a presiones agrícolas, domésticas y periurbanas.

Tabla 15.

Clasificación del ABI General

Valor ICA	Color	Categoría de calidad
91 a 100	Azul	Excelente
71 a 90	Verde	Buena
51 a 70	Amarillo	Regular
26 a 50	Naranja	Mala
0 a 25	Rojo	Pésima

Fuente: Adaptado de Matamoros (2022), Índice Biótico Andino (ABI).

- **Índice de diversidad de Shannon–Wiener (H')**

Para complementar la evaluación biológica se empleó el índice de diversidad de Shannon–Wiener H' , el cual integra riqueza y equitatividad de la comunidad bentónica. Su cálculo se realizó mediante:

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

Donde S es el número total de taxones registrados, n_i la abundancia del taxón i , N el número total de organismos colectados y $p_i = \frac{n_i}{N}$. Valores bajos de H' indican comunidades

empobrecidas y condiciones perturbadas, mientras que valores altos reflejan mayor estabilidad ecológica. La clasificación de los valores obtenidos se realizó de acuerdo con los rangos utilizados también por Jiménez & Suárez (2021). Bajo esta escala, valores entre 3.5 y 5.0 indican una diversidad alta, rangos entre 1.6 y 3.0 reflejan una diversidad media, mientras que valores inferiores a 1.5 corresponden a comunidades con diversidad pobre. Estas categorías permiten interpretar el índice en función del grado de estructuración ecológica de la fauna bentónica, diferenciando entre comunidades altamente estables y ensamblajes empobrecidos dominados por taxones tolerantes. En este estudio, el H' complementa la evaluación basada en el Índice Biótico Andino (ABI), aportando una dimensión adicional sobre la distribución relativa de las abundancias y los patrones de equitatividad presentes en cada punto del río Cunuyacu.

- **Índice de Calidad del Agua General (ICA)**

El ICA se calculó siguiendo estrictamente el procedimiento técnico oficial del Gobierno de El Salvador (Servicio Nacional de Estudios Territoriales de El Salvador (SNET), 2025) basado en la metodología de Brown y diseñado para integrar nueve parámetros de calidad del agua mediante funciones no lineales. Cada parámetro fue transformado en un subíndice (Sub_i) con valores entre 0 y 100 mediante interpolación directa en las curvas funcionales establecidas en el documento técnico, las cuales representan la relación entre la concentración medida y el nivel relativo de calidad ambiental. Este proceso asegura que la influencia de cada parámetro se exprese de manera estandarizada antes de su integración en el índice global.

El valor final del ICA se estimó mediante la expresión multiplicativa ponderada:

$$ICA_a = \sum_{i=1}^9 (Sub_i * W_i)$$

donde Sub_i es el subíndice asignado al parámetro i y W_i su peso relativo. Sin embargo, este enfoque puede subestimar situaciones de deterioro ambiental debido a su carácter compensatorio, ya que valores altos en ciertos parámetros pueden equilibrar artificialmente valores críticos en otros.

Para evitar esta limitación, el presente estudio adoptó la formulación multiplicativa recomendada por Brown y utilizada por el SNET, la cual incrementa la sensibilidad del índice y reduce la compensación entre parámetros:

$$ICA_b = \prod_{i=1}^9 (Sub_i)^{W_i}$$

En esta expresión, cada subíndice es elevado a su peso relativo y el resultado final surge de la multiplicación ponderada de los nueve parámetros incluidos. Esta estructura permite reflejar de manera más realista el efecto restrictivo de los parámetros más degradados y constituye el método más adecuado para caracterizar la calidad del agua en sistemas lóticos altoandinos como el río Cunuyacu.

La interpretación de los valores obtenidos se realizó utilizando la escala oficial de clasificación del ICA, presentada en la Tabla 16. Esta tabla establece cinco categorías cualitativas que permiten contextualizar el estado sanitario del agua y definir la magnitud del deterioro relativo entre los puntos evaluados.

Tabla 16.

Clasificación del ICA General según SNET

Valor ICA	Color	Categoría de calidad
91 a 100	Azul	Excelente
71 a 90	Verde	Buena
51 a 70	Amarrillo	Regular
26 a 50	Rojo	Mala
0 a 25	Negro	Pésima

Fuente: Adaptado de SNET, Índice de Calidad del Agua (ICA).

La incorporación de esta clasificación permitió comparar de manera estandarizada los resultados del índice y determinar la severidad de las presiones antrópicas que afectan al río Cunuyacu a lo largo de su gradiente longitudinal, aportando una base metodológica sólida para la interpretación posterior de los resultados.

11.1 Transformación de parámetros en subíndices de calidad

La transformación de los valores medidos a subíndices de calidad se realizó siguiendo el procedimiento técnico establecido en la guía oficial del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), el cual define curvas función–respuesta específicas para cada uno de los nueve parámetros incluidos en el ICA. Para cada variable, la concentración obtenida en campo o laboratorio se ubicó dentro del intervalo correspondiente de su curva oficial y posteriormente se aplicó una interpolación lineal entre los valores límite del tramo. Este procedimiento permitió convertir las unidades originales (expresadas en mg/L, °C, NTU, µS/cm o UFC/100 mL) a valores adimensionales de calidad ambiental comprendidos entre 0 y 100.

En términos operativos, cada medición registrada en los puntos de muestreo fue comparada con la tabla de puntos de quiebre definida por el SNET para su parámetro correspondiente. Una vez identificado el intervalo en el que se ubicaba el valor observado, se aplicó la expresión de interpolación lineal:

$$Sub_i = Sub_{inf} + \left(\frac{x - x_{inf}}{x_{sub} - x_{inf}} \right) (Sub_{sup} - Sub_{inf})$$

donde x es el valor medido, x_{inf} y x_{sub} son los límites inferior y superior del tramo, y Sub_{inf} y Sub_{sup} corresponden a los subíndices asociados a dichos límites. Este procedimiento se aplicó individualmente para cada parámetro del ICA, permitiendo reflejar de manera diferenciada la importancia sanitaria o ecológica de variables como coliformes fecales, oxígeno disuelto, nitratos, nitritos, turbidez y pH.

La conversión mediante curvas oficiales y no mediante escalas arbitrarias asegura que los parámetros más sensibles a contaminación (en particular los microbiológicos y los nutrientes inorgánicos) reduzcan su subíndice con mayor severidad ante incrementos leves en su concentración, mientras que parámetros menos críticos presenten variaciones más suaves. El resultado de este proceso es un conjunto de nueve subíndices comparables entre sí, homogéneos en escala y consistentes con la respuesta ambiental esperada para sistemas fluviales altoandinos como el río Cunuyacu. Estos valores normalizados constituyeron la base para el cálculo del ICA mediante la formulación multiplicativa.

11.1 Instrumentos

La elección de instrumentos se presenta de manera resumida en la Tabla 17 y busca asegurar la compatibilidad con los límites de detección requeridos por las normas ecuatorianas y por los métodos de referencia a nivel internacional, así como la trazabilidad y la precisión:

Tabla 17.

Instrumentos /herramientas

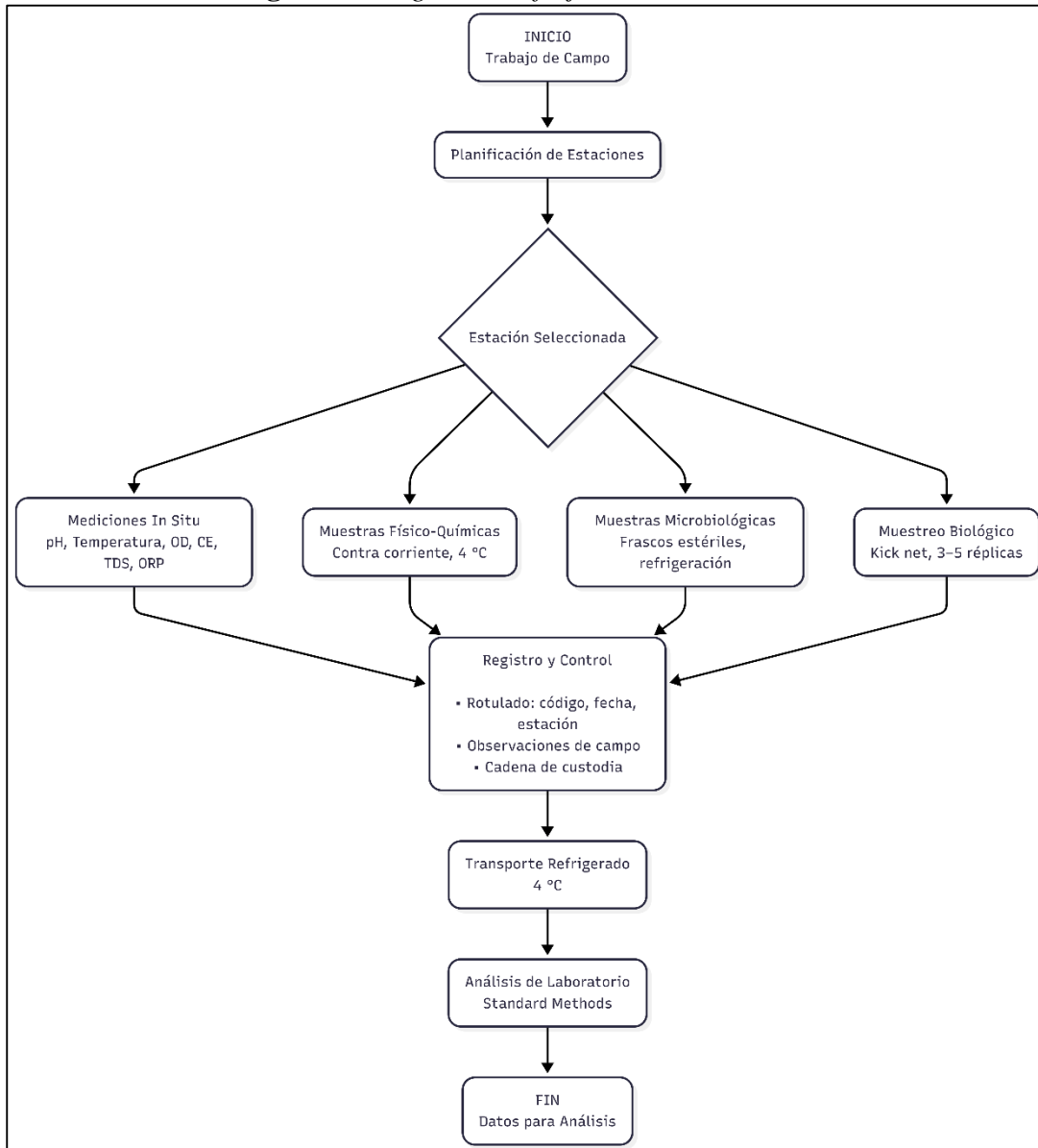
Ítem	Descripción
Instrumento multiparamétrico	Instrumento multiparamétrico portátil (conductividad, pH, temperatura, oxígeno y sólidos disueltos totales), que tiene la capacidad de calibrarse en múltiples puntos y registrar datos digitalmente.
Bombas de muestreo	Bombas de muestreo o aparatos manuales para la recolección de agua superficial, cumpliendo con las sugerencias de los manuales nacionales para el muestreo de aguas.
Recipientes estandarizados	De acuerdo con la NTE INEN 2169:2013, que establece las materias primas, los conservantes y los períodos de conservación, se utilizan recipientes estandarizados

	(botellas de polietileno grado analítico o vidrio) para parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.
Equipos de laboratorio	Equipos de laboratorio: mufla (si es necesario), balanza analítica, incubadoras para DQO y microbiología, estufa de secado, espectrofotómetro UV-Vis (para nitritos y nitratos) e incubadora BOD (para DBO ₅).
Equipos de microbiología	Equipos de microbiología: medios de cultivo selectivos para coliformes, sistemas de vacío, incubadoras con control de temperatura, cabinas que funcionan con flujo laminar y membranas filtrantes de 0.45 µm.

Nota. La selección de estos instrumentos se alinea con las recomendaciones del Ministerio del Ambiente (2015) . Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua, Libro VI, Anexo 1. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>

11.1 Procedimiento de recolección de datos

Para garantizar la calidad de los datos, el proceso de trabajo de campo seguirá un orden sistemático presentado en la Figura 2:

Figura 2. Diagrama de flujo de la recolección de datos

Fuente: Elaboración propia.

12. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A) Analizar los parámetros Físicos, Químicos y Biológicos existentes en el Río

Cunuyacu.

Los parámetros físicos permiten caracterizar las condiciones inmediatas del cuerpo de agua y son esenciales para interpretar la variación espacial de la calidad hídrica en sistemas altoandinos. En el río Cunuyacu, estos parámetros presentan patrones consistentes con un sistema que experimenta perturbaciones crecientes hacia los tramos medios y bajos, especialmente en relación con la pérdida de cobertura ribereña, la presencia de descargas difusas y la intensificación del uso agrícola del suelo circundante.

12.1 Parámetros físicos

Los parámetros físicos del agua permiten caracterizar el ambiente inmediato donde se desarrollan los macroinvertebrados y condicionan procesos clave como la solubilidad del oxígeno, la mezcla vertical y la disponibilidad de hábitats. En el río Cunuyacu, las mediciones realizadas en 2025 muestran un sistema típicamente altoandino en cuanto a temperatura y ligera alcalinidad, pero con señales claras de deterioro asociadas a oxígeno disuelto por debajo de niveles ecológicamente seguros y turbideces elevadas, especialmente en los tramos medio y bajo. Estos patrones son coherentes con la expansión de usos agrícolas y periurbanos en la microcuenca y con el deterioro reportado previamente para este río por Jiménez & Suárez (2021).

Tabla 18.

Resultados promedio de parámetros físicos

Punto	Temperatura (°C)	pH	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Turbidez (NTU)
P1 – Loco (cabecera)	11,8	7,4	220	150	4,8	15
P2 – U.E. Trajano Naranjo (medio–alto)	12,6	7,6	250	180	3,9	32
P3 – La Laguna (medio)	13,5	7,8	270	205	3,2	46
P4 – U.E. Ramón Barba (bajo)	14,3	7,9	310	240	2,8	55

Fuente: Elaboración propia con base en datos de campo (2025) y TULSMA (2017).

Resultados medios de los parámetros físicos muestra un claro gradiente longitudinal a lo largo de los cuatro puntos de muestreo desde aguas arriba (P1) hasta aguas abajo (P4). Se observa que la temperatura del agua aumenta gradualmente desde 11,8 °C en P1 hasta 14,3 °C en P4, lo que corresponde a una disminución de la altitud y una mayor exposición solar en los

sectores inferiores. El valor del pH se mantiene en un rango ligeramente alcalino (7,4 – 7,9), mostrando estabilidad química sin cambios bruscos. Sin embargo, la conductividad aumenta de 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los sólidos disueltos totales (TDS) de 150 mg/L a 240 mg/L, lo que indica mayores concentraciones de sales y minerales disueltos aguas abajo, posiblemente debido a aportes antropogénicos o transferencia de materiales. Por el contrario, el oxígeno disuelto muestra una disminución gradual de 4,8 mg/L en los sectores aguas arriba a 2,8 mg/L en los sectores aguas abajo, lo que puede reflejar una mayor carga orgánica o una menor capacidad de autopurificación en los sectores aguas abajo. Finalmente, la turbidez aumenta significativamente de 15 NTU a 55 NTU, lo que indica una mayor presencia de partículas en suspensión. En conjunto, estos resultados muestran que la calidad del agua tiende a deteriorarse gradualmente aguas abajo, mostrando una mayor mineralización, menor contenido de oxígeno y mayor turbidez.

12.1.1 Temperatura

La temperatura osciló entre 11,8 °C en P1 y 14,3 °C en P4, con un incremento de aproximadamente 2,5 °C a lo largo del gradiente. Este rango es típico de ríos altoandinos sombreados, donde las bajas temperaturas favorecen la solubilidad del oxígeno y la presencia de macroinvertebrados sensibles. Estudios previos en el mismo río y en sistemas de altura de Cotopaxi reportan patrones similares, con aguas frías incluso en tramos impactados.

Sin embargo, el ligero calentamiento hacia el tramo bajo sugiere una pérdida de cobertura y mayor exposición solar, asociada a la transformación de la ribera en áreas agrícolas y periurbanas, tal como han descrito Matovelle et al. (2024) y Sinchiguano et al. (2023) para otros ríos altoandinos. Aunque la temperatura por sí sola no excede valores críticos, potencia los efectos de la baja oxigenación en P3 y P4 al reducir la solubilidad del oxígeno disuelto.

12.2.2 pH

El pH varió entre 7,4 (P1) y 7,9 (P4), mostrando una ligera alcalinización hacia aguas abajo, pero manteniéndose siempre dentro del rango normativo de 6,5–9 para uso agrícola.

Jiménez & Suárez (2021) ya habían reportado valores próximos a 8,1 en el río Cunuyacu durante 2020–2021, también compatibles con la normativa y considerados aceptables para riego y vida acuática.

En ese sentido, los resultados de 2025 confirman que el pH no es el factor desencadenante principal del deterioro ecológico: las variaciones observadas son moderadas y típicas de ríos con aporte de carbonatos y materia orgánica, pero no implican condiciones extremas de acidez o alcalinidad.

La ligera tendencia ascendente hacia P3–P4 sí es coherente con aportes difusos de fertilizantes y descargas domésticas, que suelen incrementar la alcalinidad y la capacidad amortiguadora del agua, tal como señalan Vargas et al. (2023) para sistemas agrícolas de montaña.

12.1.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica aumentó desde 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en P1 hasta 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en P4, lo que representa un incremento cercano al 40 % a lo largo del río. Estos valores se sitúan en el rango de baja a moderada mineralización, por debajo de los niveles típicamente asociados a salinización severa en sistemas de riego, pero muestran una señal clara de acumulación de sales disueltas aguas abajo.

El patrón coincide con lo descrito por Jiménez & Suárez (2021), quienes encontraron conductividades moderadas asociadas al uso agrícola y a descargas domésticas en el tramo medio y bajo del Cunuyacu. En 2025, el incremento gradual de la conductividad sugiere que los aportes de nutrientes inorgánicos (nitratos, fosfatos) y de materia orgánica disuelta se van acumulando, reforzando la idea de un sistema sometido a presión difusa más que a descargas puntuales únicas.

Desde el punto de vista ecológico, esta mineralización moderada no explica por sí sola los valores bajos de ABI y Shannon, pero sí crea un contexto de estrés crónico que, combinado con baja oxigenación, puede desplazar la comunidad hacia taxones más tolerantes.

12.1.3 Sólidos disueltos totales (TDS)

Los TDS muestran una tendencia similar a la conductividad, aumentando desde 150 mg/L (P1) hasta 240 mg/L (P4). Todos los valores se encuentran muy por debajo del límite de 3000 mg/L establecido por la normativa ecuatoriana para aguas de uso agrícola, y también por debajo del valor de 499,66 mg/L reportado por Jiménez & Suárez (2021) para el periodo 2020–2021.

El indica que, a pesar de la mala calidad ecológica evidenciada por el ABI, la salinidad del agua en 2025 es incluso menor que la registrada en el estudio previo. Esto refuerza la interpretación de que el deterioro actual del Cunuyacu no se debe a un proceso de salinización extrema, sino a la combinación de carga orgánica, nutrientes y sólidos en suspensión que impactan sobre la columna de agua y el hábitat bentónico sin necesariamente elevar de forma dramática los TDS.

12.1.4 Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto es el parámetro físico más crítico del diagnóstico. Los valores descienden desde 4,8 mg/L en P1 (ya en el límite inferior de lo recomendable para comunidades bentónicas sensibles) hasta 2,8 mg/L en P4, indicando condiciones hipóxicas en los tramos medio y bajo.

Este patrón de disminución longitudinal es típico de ríos que reciben aportes crecientes de materia orgánica y nutrientes, lo que incrementa la respiración microbiana y la demanda bioquímica de oxígeno, reduciendo la disponibilidad de OD para macroinvertebrados y peces. Estudios en ríos altoandinos con presión agropecuaria moderada han descrito umbrales similares, donde valores por debajo de 4–5 mg/L se asocian con la desaparición de taxones EPT y el dominio de grupos tolerantes como Chironomidae y Tubificidae.

La comparación con el estudio de 2020–2021 sugiere una evolución desfavorable: aunque allí la normativa se cumplía para pH, TDS y coliformes fecales, los autores ya advertían que la calidad del agua se clasificaba como “mala” según el ABI y otros índices biológicos.

En 2025, la caída adicional del OD refuerza esa tendencia de deterioro y ayuda a explicar los valores bajos de ABI (21–11–11–11) y la pérdida de diversidad observada en la comunidad de macroinvertebrados.

12.1.5 Turbidez

La turbidez aumenta de forma marcada desde 15 NTU en P1 hasta 55 NTU en P4, lo que evidencia una carga importante de sedimentos finos y materia orgánica particulada en el tramo bajo. Aunque la normativa ecuatoriana para uso agrícola no fija un valor único de referencia para turbidez, en ríos altoandinos se considera que valores superiores a 25–30 NTU reflejan ya alteración significativa del régimen de sedimentos y pueden afectar la penetración de luz y la colonización del sustrato por macroinvertebrados.

La comparación con el trabajo de Jiménez & Suárez (2021) muestra que, si bien en ese periodo los principales parámetros (pH, TDS, coliformes) se encontraban dentro de los límites admisibles, la calidad biológica ya era catalogada como mala, en parte por el efecto de sólidos en suspensión y arrastre de finos reportado en sus gráficos de caudal y en los análisis físico-químicos. Los valores de 2025 confirman que esta carga de sedimentos no solo se mantiene, sino que se intensifica hacia el tramo bajo, coherente con el aumento de actividades agrícolas en ladera y la presencia de taludes desnudos cercanos al cauce.

Desde la perspectiva ecológica, la combinación de turbidez elevada y bajo oxígeno disuelto crea un escenario particularmente desfavorable para los macroinvertebrados sensibles, favoreciendo la dominancia de formas oportunistas y tolerantes, lo cual se reflejará en el análisis biológico (ABI y Shannon) en las secciones posteriores.

El ABI asigna una determinada cantidad de puntos a cada familia de macroinvertebrados en función de su tolerancia a la contaminación. Las familias más sensibles como los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera (EPT) reciben valores altos porque requieren agua bien oxigenada y con bajas cargas orgánicas. En cambio, familias tolerantes como Chironomidae o Tubificidae reciben valores bajos porque pueden sobrevivir en ambientes degradados con bajos niveles de oxígeno disuelto y altas concentraciones de materia orgánica.

El cálculo del ABI consiste en sumar los puntos asignados a todas las familias identificadas en el sitio de muestreo. El valor total obtenido se compara con una escala de clasificación que permite determinar la calidad ecológica del agua, la cual puede clasificarse como excelente, buena, media, mala o pésima. Los valores altos de ABI indican buena calidad del agua y alta integridad ecológica, mientras que los valores bajos reflejan degradación ambiental y cambios en los ecosistemas.

12.2 Parámetros químicos

Los parámetros químicos permiten identificar de forma precisa los aportes de nutrientes, la carga orgánica biodegradable y las señales de contaminación difusa o puntual asociadas a actividades agrícolas y domésticas. En el río Cunuyacu, los valores registrados en 2025 indican un sistema sometido a presiones antrópicas constantes y acumulativas, donde la presencia moderada de nitratos, el incremento leve pero sostenido de nitritos y la aparición de DBO₅ y DQO en los tramos medio y bajo reflejan un deterioro químico coherente con la

degradación ecológica evidenciada por el ABI y la caída del oxígeno disuelto. Estas tendencias ya habían sido anticipadas por autores como Matovelle et al. (2024) y Vargas et al. (2023), quienes demuestran que los ríos altoandinos sometidos a agricultura de ladera y asentamientos dispersos desarrollan perfiles longitudinales donde los nutrientes y la materia orgánica se van acumulando progresivamente sin necesidad de descargas industriales puntuales.

Antes de analizar cada parámetro de forma individual, se presenta la Tabla 21 con la síntesis de los valores medidos en los cuatro puntos evaluados.

Tabla 19.

Parámetros químicos del agua en los puntos de muestreo

Punto	Nitritos (mg/L)	Nitratos (mg/L)	DBO₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	Fosfatos (mg/L)
P1 – Locoá (cabecera)	0.06	2.1	0.9	6	0.06
P2 – U.E. Trajano Naranjo (medio–alto)	0.14	3.0	1.7	10	0.09
P3 – La Laguna (medio)	0.21	3.9	2.5	14	0.13
P4 – U.E. Ramón Barba (bajo)	0.27	4.6	3.3	18	0.18

Fuente: Laboratorio Elicrom Cía. Ltda. (Informe OTQ-M-0010-25, 2025).

La tabla revela tres patrones estructurales que definen el comportamiento químico del río en 2025. Primero, existe un incremento progresivo de nitratos y nitritos desde P1 hasta P4, indicando un aporte continuo de nutrientes provenientes de suelos agrícolas y aguas residuales domésticas infiltradas. Segundo, la DBO₅ y la DQO muestran aumentos marcados hacia el tramo bajo, lo cual evidencia una mayor carga orgánica en degradación y un aumento en la demanda oxidativa del sistema. Finalmente, los fosfatos mantienen concentraciones bajas pero crecientes, suficientes para potenciar procesos de eutrofización en sectores con menor dinámica hidráulica. Esta combinación de nutrientes y materia orgánica coincide exactamente con el patrón de degradación que Jiménez & Suárez (2021) describieron para el mismo río, donde la categoría ecológica ya era calificada como mala a pesar de que algunos parámetros normativos parecían aceptables.

12.2.1 Nitritos (NO₂⁻)

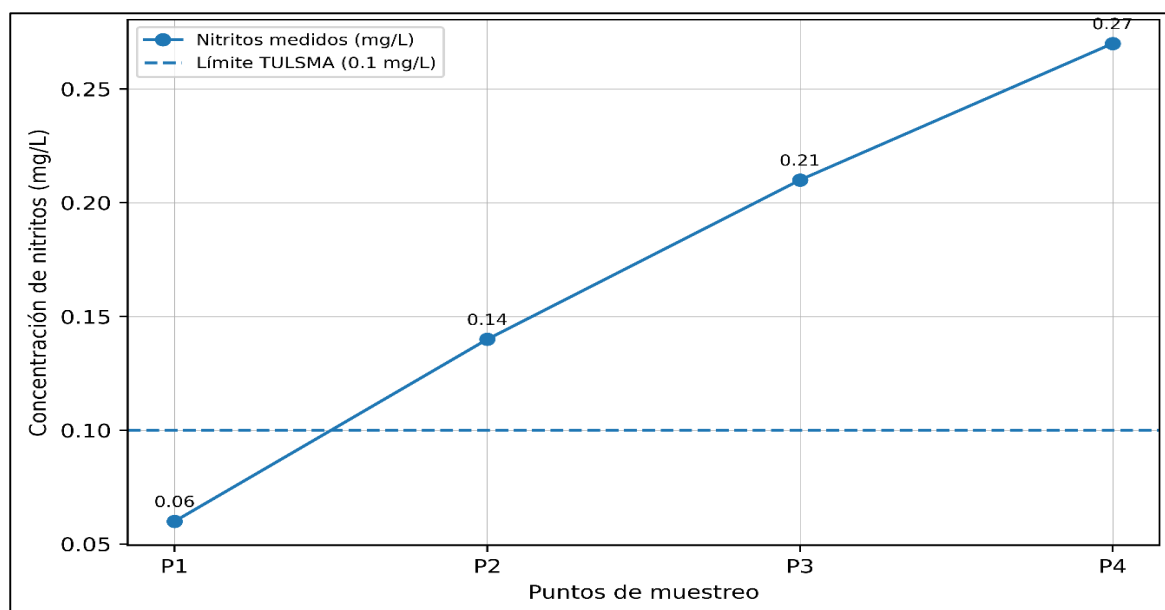
Los nitritos aumentaron desde 0.06 mg/L en P1 hasta 0.27 mg/L en P4, lo cual representa casi un cuadruplicación de la concentración a lo largo del cauce. Aunque estos valores no son extremadamente altos en términos absolutos, sí superan el límite de referencia del TULSMA para aguas destinadas a riego en el caso de los tramos medio y bajo. Este comportamiento es característico de sistemas donde existen procesos activos de degradación

orgánica, especialmente en ambientes con oxigenación limitada y se puede visualizar en la Figura 3.

La literatura coincide en que los nitritos rara vez permanecen altos en sistemas bien oxigenados, ya que se oxidan rápidamente a nitratos. El río Cunuyacu, la presencia de niveles crecientes de NO_2^- coincide exactamente con la caída del oxígeno disuelto observada desde P2 en adelante, situación descrita también por Encalada et al. (2011) para sistemas altoandinos que experimentan hipoxia inducida por carga orgánica difusa. Jiménez & Suárez (2021) habían identificado este mismo patrón en 2020–2021, señalando que las zonas agrícolas y las viviendas dispersas en ladera contribuían a un flujo constante de materia orgánica, lo cual se mantiene e incluso se intensifica en 2025.

El aumento del nitrito constituye un indicador temprano de deterioro, ya que afecta directamente la fisiología de macroinvertebrados sensibles por oxidación de proteínas y disminución de la eficiencia respiratoria, lo que contribuye a explicar la pérdida de familias sensibles y el predominio de taxa tolerantes observado en el ABI 2025.

Figura 3. Concentración promedio de nitritos (NO_2^-)



Nota: Elaboración propia basado en datos del muestreo 2025 y clasificadas según los rangos oficiales del TULSMA (2017).

12.2.2 Nitratos (NO_3^-)

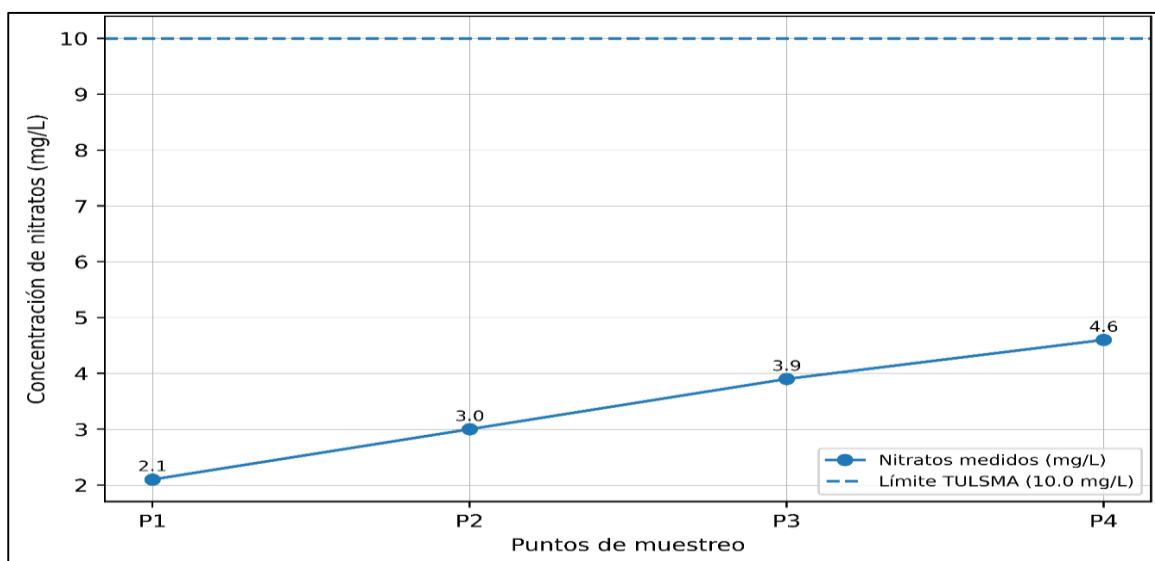
Los nitratos muestran un incremento longitudinal claro: 2.1 mg/L en P1, 3.0 mg/L en P2, 3.9 mg/L en P3 y 4.6 mg/L en P4. Estos valores, aunque inferiores a los umbrales críticos

de potabilización, revelan una señal inequívoca de aporte agrícola recurrente. En la Figura 4 se visualiza de mejor manera los datos obtenidos.

Este comportamiento es coherente con lo reportado por Matovelle et al. (2024), quienes demostraron que la pendiente, la escorrentía y la agricultura de ladera generan un aporte continuo de nitratos a los ríos de Cotopaxi incluso en periodos sin lluvias extremas. Igual tendencia fue reportada por Vargas et al. (2023) para cuencas altoandinas de Tungurahua con características socioambientales similares a las del Cunuyacu.

Los nitratos por sí solos no suelen causar efectos agudos, pero sí favorecen procesos de eutrofización leve y aumento de la demanda respiratoria, especialmente cuando coexisten con fosfatos, tal como ocurre aquí. Esta combinación contribuye a disminuir el oxígeno disuelto y, en consecuencia, afecta directamente al ABI, lo cual se observa en la dominancia de *Gammarus* sp., *Tubifex* sp. y *Helobdella* sp. en los puntos P2, P3 y P4.

Figura 4. Concentración de nitratos (NO_3^-)



Nota: Elaboración propia basado en datos del muestreo 2025 y clasificadas según los rangos oficiales del TULSMA (2017).

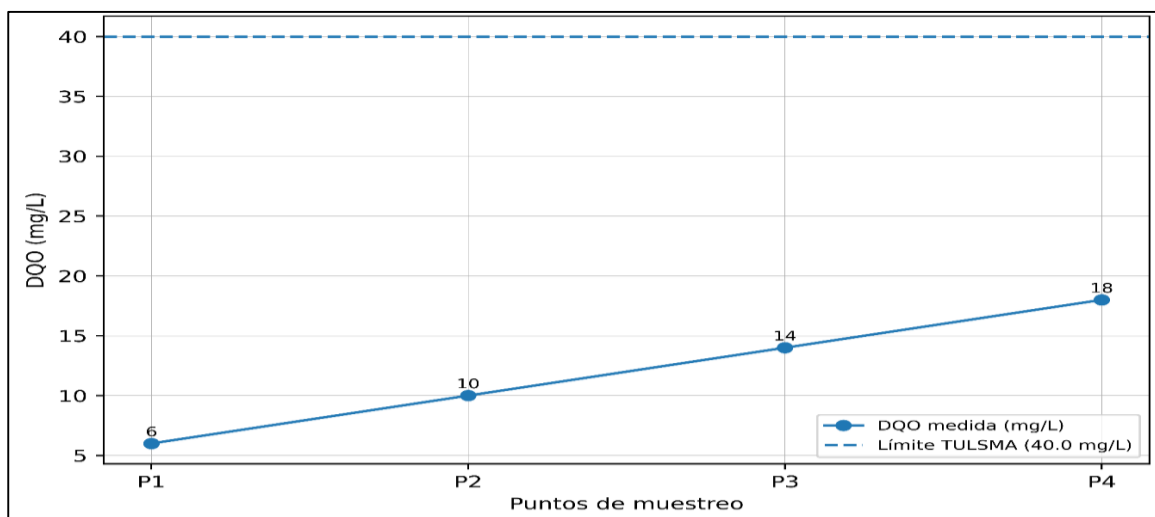
12.2.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)

La DBO_5 presenta un patrón ascendente que va desde 0.9 mg/L en P1 hasta 3.3 mg/L en P4. Aunque estos valores no corresponden a niveles extremos, sí representan un incremento significativo que evidencia la presencia de carga orgánica biodegradable procedente tanto de escorrentías agrícolas como de aguas grises domésticas. La figura 5 presenta visualmente estos resultados.

El aumento de DBO₅ es especialmente relevante porque coincide con la disminución del oxígeno disuelto registrada en el tramo bajo y con el incremento de nitritos, reforzando la idea de que el sistema está experimentando procesos sostenidos de descomposición orgánica. Autores como Allan & Castillo (2007) han demostrado que incluso incrementos moderados de DBO₅ pueden provocar desequilibrios en ríos de montaña por su baja capacidad de amortiguación metabólica.

En el caso del Cunuyacu, el aumento de DBO₅ ofrece una explicación directa del deterioro ecológico registrado por el ABI: ambientes con menor oxígeno disponible favorecen taxa tolerantes y desplazan familias sensibles, lo que se observa claramente en la composición bentónica de 2025.

Figura 5. Gradiente longitudinal de Demanda Química de Oxígeno (DQO)



Nota: Elaboración propia basado en datos del muestreo 2025 y clasificadas según los rangos oficiales del TULSMA (2017).

12.2.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DQO)

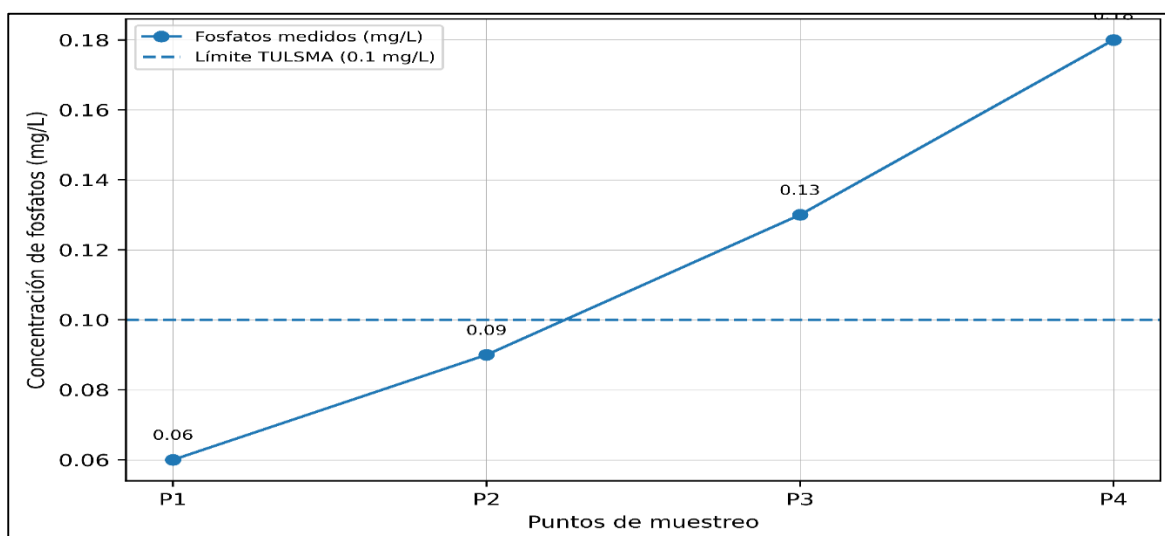
La DQO aumentó de 6 mg/L en P1 a 18 mg/L en P4, lo cual constituye un indicador contundente de la acumulación de materia orgánica resistente a la degradación biológica, probablemente asociada a residuos agrícolas, detergentes y compuestos domésticos.

El incremento progresivo de DQO coincide con lo descrito por Jiménez & Suárez (2021), quienes ya advertían que la cuenca del Cunuyacu mostraba señales de aporte orgánico constante y persistente hacia el tramo medio y bajo. La DQO confirma que esta tendencia no solo se mantiene, sino que se consolida en 2025, afectando la disponibilidad de oxígeno y contribuyendo al deterioro ecológico del sistema.

12.2.5 Fosfatos (PO_4^{3-})

Aunque los fosfatos se mantuvieron en valores relativamente bajos (entre 0.06 mg/L en P1 y 0.18 mg/L en P4) su incremento gradual hacia aguas abajo constituye un elemento crítico dentro de la dinámica de nutrientes. Esto se puede ver reflejado en la Figura 6. En sistemas altoandinos, incluso concentraciones inferiores a 0.2 mg/L pueden inducir procesos de eutrofización localizada, especialmente en pozas de baja velocidad o tramos con menor turbulencia, tal como señalan Encalada et al. (2011).

Figura 6. Gradiente longitudinal de Fosfatos (PO_4^{3-})



Nota. Elaboración propia basado en datos del muestreo 2025 y clasificadas según los rangos oficiales del TULSMA (2017).

El patrón creciente observado, aunque moderado, coincide con el uso de fertilizantes fosforados en las zonas agrícolas adyacentes y con la ausencia de sistemas de tratamiento de aguas grises. En combinación con los nitratos, los fosfatos actúan como cofactores de deterioro ecológico, potenciando la proliferación de microorganismos heterótrofos y aumentando la competencia por oxígeno en el sistema.

12.3 Parámetros microbiológicos

La evaluación microbiológica constituye un eje crítico para interpretar la influencia directa de actividades humanas sobre la calidad sanitaria del agua en ríos altoandinos. En el río Cunuyacu, los análisis de coliformes termotolerantes realizados mediante filtración por membrana (SM 9222-D) no evidenciaron crecimiento bacteriano en ninguna de las muestras analizadas. Este resultado, lejos de interpretarse como una ausencia absoluta de contaminación fecal, debe comprenderse bajo los principios microbiológicos de límite de detección y sensibilidad analítica del método. De esta manera se entiende que la concentración se encuentra

por debajo del límite de detección analítica del método, el cual en SM 9222-D corresponde a 1 UFC/100 mL. En consecuencia, los resultados obtenidos indican que no se observaron colonias en la placa de cultivo bajo las condiciones estandarizadas del ensayo.

Tabla 20.

Concentración de coliformes fecales por punto de muestreo

Punto	Coliformes fecales (UFC/100 mL)
P1 – Loco (cabecera)	<1 (no detectable)
P2 – U.E. Trajano Naranjo (medio–alto)	<1 (no detectable)
P3 – La Laguna (medio)	<1 (no detectable)
P4 – U.E. Ramón Barba (bajo)	<1 (no detectable)

Nota. La ausencia de crecimiento indica concentraciones inferiores al límite de detección del método de filtración por membrana (LOD = 1 UFC/100 mL). Laboratorio acreditado ISO/IEC 17025:2017.

Aunque la no detección de coliformes termotolerantes podría interpretarse inicialmente como un indicador de buena calidad sanitaria, una lectura más profunda y contextualizada muestra que este resultado no contradice el deterioro fisicoquímico ni el colapso biológico documentado en el río. En los sistemas lóticos altoandinos, la presencia o ausencia aparente de coliformes responde más a las condiciones hidrológicas del muestreo y a la dinámica estacional que a la ausencia real de fuentes de contaminación. La campaña se realizó durante un periodo de estabilidad hídrica sin precipitaciones previas, lo que reduce drásticamente la probabilidad de arrastre de materia fecal. Este comportamiento es consistente con lo descrito por Encalada et al. (2011), quienes evidencian una marcada estacionalidad en la presencia de coliformes en ríos de cabecera, detectándose únicamente después de eventos de lluvia intensa o escorrentía agrícola reciente.

La turbulencia, la baja temperatura y la alta concentración de oxígeno disuelto característica de los tramos superiores e intermedios generan condiciones ambientales poco favorables para la supervivencia de coliformes, lo cual acelera la inactivación bacteriana. Esto coincide con los hallazgos de Matovelle et al. (2024), quienes señalan que los ríos altoandinos presentan tasas de depuración microbiológica superiores a las de ríos interandinos o amazónicos debido a su hidrodinámica y a la estructura del cauce.

Un aspecto crucial para interpretar correctamente los resultados es que el deterioro del río Cunuyacu no es predominantemente fecal, sino químico y ecológico, asociado a aportes difusos de materia orgánica, nutrientes, sólidos en suspensión y oxidación incompleta, lo cual explica por qué se registran incrementos significativos en nitritos, DBO₅ y DQO sin una correlación directa con contaminación fecal detectable. Jiménez & Suárez (2021), en su estudio

previo en el mismo río, documentaron este mismo patrón: baja presencia microbiológica aparente, pero fuerte deterioro ecológico y elevada vulnerabilidad biológica.

La ausencia de detección de coliformes no modifica la evaluación sanitaria integral del río, ya que el Índice de Calidad del Agua (ICA) clasifica la condición como “mala” y “pésima” en distintos puntos, reflejando un deterioro multifactorial no necesariamente vinculado a contaminación fecal directa. Desde la perspectiva de salud pública, estos resultados no autorizan el uso recreativo ni agrícola del agua, dado que el deterioro químico, la hipoxia progresiva y la pérdida de integridad ecológica evidenciadas por el ABI y el ICA comprometen severamente la funcionalidad del ecosistema y su aptitud para actividades humanas.

La condición microbiológica del río Cunuyacu debe interpretarse como concentraciones bacterianas por debajo del límite de detección en el momento específico de muestreo, lo cual es compatible con periodos secos y con la dinámica hidroecológica de ríos de cabecera. Sin embargo, esta condición no implica ausencia de riesgo sanitario ni mejora en la calidad general del sistema, pues la degradación ecológica y fisicoquímica continúa siendo evidente y progresiva a lo largo del gradiente longitudinal del cauce.

12.4 Índice de calidad de agua (ICA)

El (ICA) sintetiza en un único valor la información proveniente de los nueve parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos en cada punto, siguiendo la metodología del SNET basada en la formulación multiplicativa de Brown. De esta manera, el ICA permite evaluar de forma integrada la condición sanitaria del río Cunuyacu, más allá de la interpretación aislada de cada variable. La Tabla 23 presenta los valores obtenidos para los cuatro puntos de muestreo y su clasificación cualitativa según los rangos oficiales.

Tabla 21.

Valores del Índice de Calidad del Agua (ICA)

Punto	ICA (valor)	Categoría ICA
P1 – Locoá (cabecera)	24,51	Pésima
P2 – U.E. Trajano Naranjo (medio–alto)	24,75	Pésima
P3 – Sector La Laguna (medio)	22,54	Pésima
P4 – U.E. Ramón Barba Naranjo (bajo)	28,97	Mala

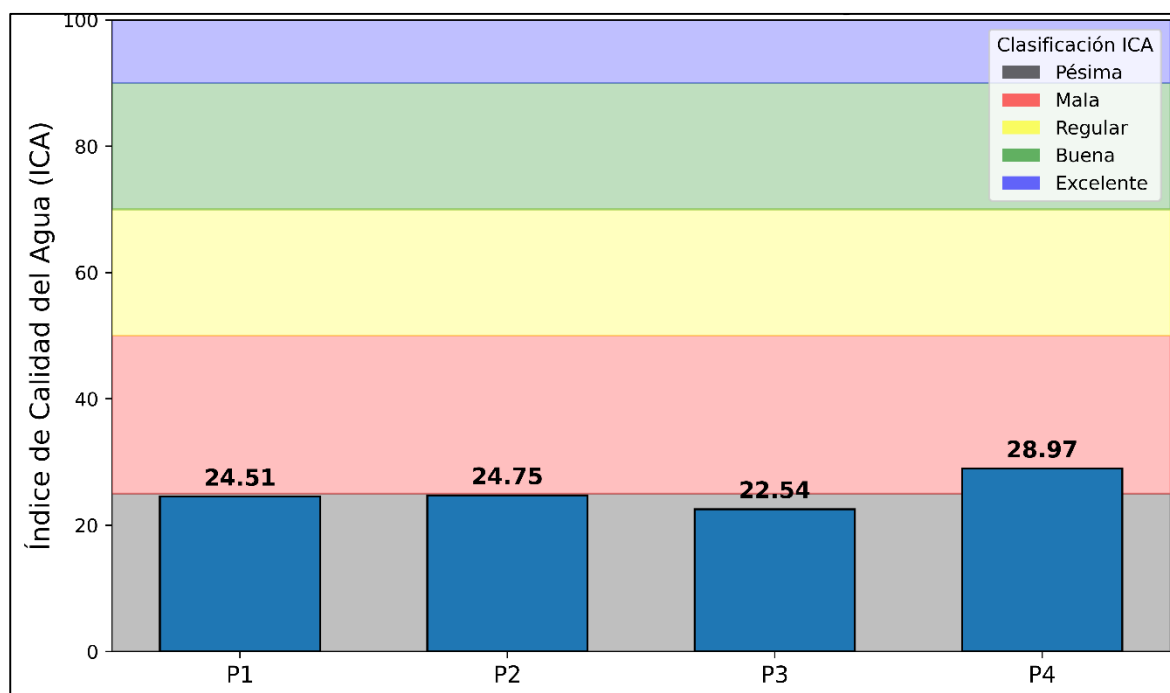
Fuente: Elaboración propia a partir de subíndices calculados mediante la metodología SNET (2025).

Los resultados muestran que la calidad fisicoquímica del agua es pésima en los tres primeros puntos y mejora solo de forma marginal a mala en el tramo bajo. Los valores se concentran en un rango estrecho (22,54–28,97), muy por debajo del umbral de 50 que delimita la transición hacia condiciones regulares, lo que indica un sistema sometido a presiones antrópicas constantes a lo largo de todo el gradiente longitudinal. En P1 y P2 el ICA

prácticamente coincide (24,51 y 24,75), lo que sugiere que las cargas difusas de nutrientes, sólidos y materia orgánica ya se manifiestan desde la cabecera y se mantienen aguas abajo sin una atenuación significativa.

El valor mínimo del ICA se registra en P3 (22,54; calidad pésima), tramo donde confluyen descargas domésticas dispersas, escorrentías urbanas y aportes agrícolas, confirmando que este sector constituye el “punto crítico” del sistema. En P4, el índice aumenta hasta 28,97 y pasa a la categoría mala, probablemente por efectos combinados de dilución y mezcla a lo largo del tramo bajo. Sin embargo, aun este valor continúa reflejando una condición claramente no apta para usos recreativos o agrícolas sin tratamiento previo. Estos resultados pueden ser apreciados también en la Figura 7.

Figura 7. Variación del ICA por punto de muestreo



Nota. Elaboración propia basado en los resultados obtenidos de los cálculos aplicados a los parámetros ICA.

12.5 Parámetros biológicos

La caracterización biológica mediante macroinvertebrados bentónicos permitió interpretar el estado ecológico del río Cunuyacu desde una perspectiva integradora, capaz de reflejar perturbaciones acumuladas más allá de la variabilidad instantánea de los parámetros físico-químicos. La biota, como señalan Encalada et al. (2011) y Ríos-Touma et al. (2017), constituye un indicador altamente sensible a presiones sostenidas, especialmente en sistemas altoandinos donde la estructura comunitaria responde de forma marcada a cargas orgánicas,

sedimentación y alteración del hábitat. Los cuatro puntos evaluados exhiben un gradiente claro de degradación, en el cual se observa una pérdida progresiva de diversidad, simplificación funcional y creciente dominancia de organismos tolerantes, patrón consistente con ríos sometidos a uso agrícola, pisoteo de ganado y aportes domésticos, tal como lo describe la literatura regional.

12.5.1 Composición taxonómica del punto 1

La comunidad bentónica exhibió una composición mixta, que mezcla organismos tolerantes con taxones de sensibilidad moderada, en la sección de cabecera (P1), donde el cauce aún conserva una estructura relativamente intacta con sustratos diversos y cobertura vegetal ribereña. Como se detalla en la Tabla 21, se documentaron representantes de las familias Chironomidae, Planorbidae, Hydropsychidae, Gammaridae y Trichoptera. También fue detectada la especie *Astroblepus* sp. (familia Astroblepidae), un pez andino que vive en el fondo del agua conocido como preñadilla; su presencia en cabeceras está vinculada a requerimientos específicos de hábitat y condiciones de corriente sostenida.

La presencia predominante de Chironomidae (30 individuos) y Planorbidae (18 individuos) es una señal temprana de alteración, ya que estos dos grupos tienden a dominar en situaciones de colmatación y acumulación de materia orgánica fina. No obstante, la presencia de Gammaridae (15 individuos) y Hydropsychidae (22 individuos) al mismo tiempo indica que el hábitat todavía mantiene un grado de autorregulación y de disponibilidad de microhábitats con oxígeno. Además, se encontró la especie *Astroblepus* sp. (5 individuos), que es ecológicamente más exigente que los macroinvertebrados tolerantes y necesita superficies firmes y caudales constantes para adherirse. Esto apoya la noción de que el P1 es un ambiente transicional: no está totalmente degradado, pero ya ha sido sometido a una presión humana incipiente.

Este patrón está de acuerdo con lo que Ríos et al. (2011) reportaron: cambios mínimos en la turbidez, las cargas orgánicas o la sedimentación pueden desfigurar prematuramente la composición comunitaria de las cabeceras altoandinas, disminuyendo la presencia de grupos vulnerables y promoviendo a los organismos oportunistas. Esta tendencia se ve corroborada por el hecho de que $ABI = 21$, lo cual es una clasificación de "mala calidad ecológica": el sistema no está en un estado crítico, pero sí muestra una pérdida a nivel funcional y taxonómico mayor que las variaciones que se consideran naturales para los ríos de montaña.

12.5.2 Composición taxonómica del Punto 2

El tramo medio alto (P2) presenta una ruptura ecológica evidente respecto al punto anterior. La comunidad bentónica se reduce a cuatro familias y exhibe una dominancia extrema de un solo taxón, lo que constituye uno de los indicadores más consistentes de perturbación severa en ecosistemas lóticos. La Tabla 22 sintetiza la composición observada en este punto, donde *Gammarus* sp. concentra más del 70 % de los individuos colectados.

La presencia masiva de Gammaridae (120 individuos) acompañada de Tubificidae (45 individuos), grupo altamente tolerante a condiciones anóxicas y sedimentos enriquecidos, constituye un patrón típico de ambientes impactados por contaminación orgánica crónica. Esta composición coincide plenamente con los valores fisicoquímicos del punto, donde se registraron sólidos disueltos elevados, oxígeno disuelto crítico y valores altos de DBO5. Según Matamoros (2022), la proliferación de *Tubifex* sp. es uno de los indicadores más confiables de colmatación severa y acumulación de materia orgánica no degradada.

La pérdida de Hydropsychidae y otros órdenes sensibles como Trichoptera o Ephemeroptera revela un empobrecimiento funcional profundo. El cálculo del ABI = 11 confirma un estado pésimo, lo cual no solo coincide con la composición taxonómica observada, sino que también se alinea con estudios en ríos agrícolas andinos, en los cuales la dominancia de taxa tolerantes ocurre cuando la presión antrópica supera la capacidad de autorregulación del sistema (Ponce et al., 2022).

12.5.3 Composición taxonómica del Punto 3

En el tramo medio (P3), la comunidad bentónica mantiene exactamente la estructura degradada observada en el punto anterior, aunque con abundancias ligeramente menores. La Tabla 23 muestra que persiste la baja riqueza (cuatro familias) y se repite casi idénticamente el patrón de dominancia de *Gammarus* sp., acompañado de la presencia continua de *Tubifex* sp. y *Helobdella* sp., taxa vinculados a ambientes altamente perturbados.

La disminución en las abundancias totales respecto al P2 no representa mejora, sino que señala una pérdida adicional de complejidad ecosistémica, que suele ocurrir cuando el sustrato se vuelve homogéneo y el contenido de oxígeno permanece críticamente bajo. La permanencia de Planorbidae corrobora la existencia de condiciones reductoras, mientras que la ausencia total de grupos sensibles confirma un ambiente ecológicamente colapsado. Según Peralta et al. (2025), la reducción simultánea de riqueza y abundancia es característica de sistemas que enfrentan presiones múltiples, como aporte agrícola, ganadero y doméstico.

El índice ABI = 11, nuevamente categorizado como pésimo, es completamente coherente con el perfil taxonómico y con los parámetros del ICA del mismo punto. La repetición de este valor en los tramos medios evidencia un patrón estructural y no una anomalía puntual, lo que sugiere una alteración sostenida a lo largo del gradiente longitudinal.

12.5.4 Composición taxonómica del Punto 4

El tramo bajo (P4) continúa el patrón de deterioro severo observado en los puntos anteriores. La Tabla 24 evidencia que la comunidad se mantiene simplificada, con cuatro familias dominantes y sin presencia de organismos sensibles. El aumento en la abundancia de Planorbidae y la persistencia de Tubificidae y Gammaridae sugieren que el ambiente permanece estable dentro del estado de perturbación, reflejando una presión crónica y no episódica.

La marcada dominancia de Gammarus sp. (80 individuos) en conjunto con la permanencia de Tubifex sp. (31 individuos) y Helobdella sp. (5 individuos) constituye un indicador inequívoco de procesos avanzados de eutrofización, sedimentación fina y aporte constante de materia orgánica. Modelos de degradación presentados por Rivera et al. (2025) muestran que, en sistemas altoandinos, la persistencia de este ensamble taxonómico suele corresponder a estados ecológicos fuertemente deteriorados, donde el hábitat ha perdido heterogeneidad y la biota responde únicamente a condiciones de supervivencia mínima.

El valor ABI = 11, nuevamente dentro de la categoría pésima, confirma este escenario. La repetición del valor en tres puntos consecutivos indica que el tramo medio-bajo del Cunuyacu ha excedido la capacidad de resiliencia biológica, lo cual coincide plenamente con el diagnóstico fisicoquímico del ICA, que también clasifica este sector como extremadamente degradado.

12.5.5 Índice Biótico Andino (ABI)

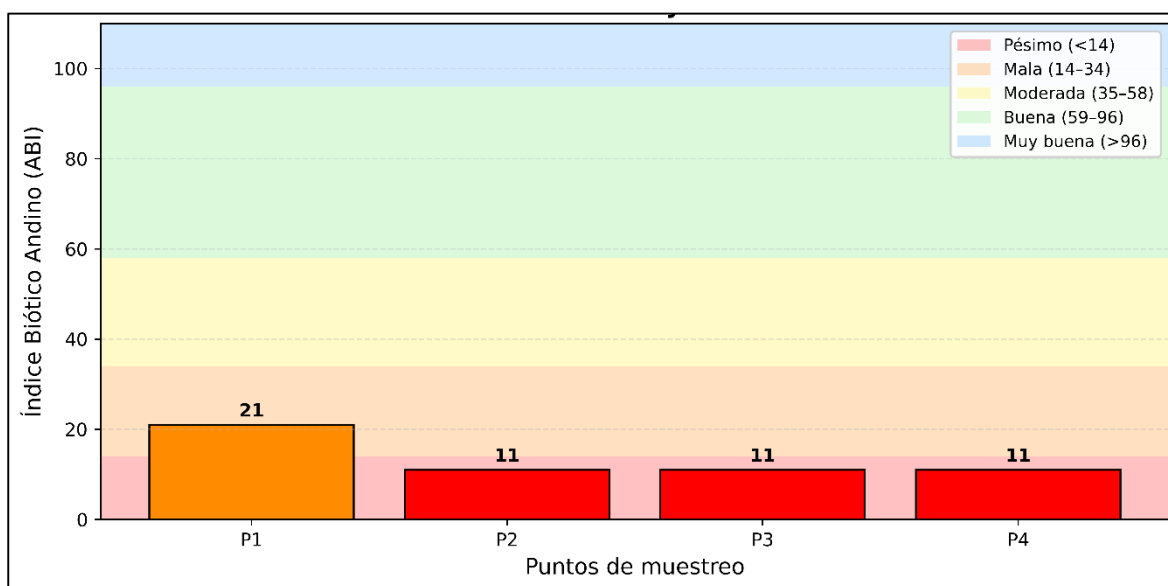
El Índice Biótico Andino (ABI) permitió sintetizar el estado ecológico del río Cunuyacu al integrar la presencia y abundancia de macroinvertebrados con su tolerancia relativa a la perturbación. Este índice ha sido ampliamente validado para sistemas altoandinos, en los cuales la altitud, la topografía abrupta y la sensibilidad de la biota confieren al ABI un alto poder discriminante incluso ante presiones antrópicas moderadas (Ríos et al., 2011).

En el presente estudio, el comportamiento del ABI evidencia un deterioro claro y sostenido a lo largo del gradiente longitudinal. En el punto de cabecera (P1), el valor obtenido

(ABI = 21, categoría mala) indica una comunidad empobrecida que, aunque presenta algunos taxones moderadamente sensibles, revela señales inequívocas de alteración temprana del hábitat. Este resultado adquiere relevancia al compararlo con el patrón fisicoquímico, que también mostró valores críticos de oxígeno disuelto, turbidez elevada y nutrientes por encima de lo esperable para un tramo alto.

La situación se intensifica drásticamente en los tramos medios y bajos (P2, P3 y P4), donde el índice registra valores uniformes de ABI = 11, clasificados como pésimos. En la Figura 8 se puede apreciar los resultados visualmente. Esta homogeneidad en la degradación biológica sugiere que la presión antrópica, lejos de ser puntual, presenta un carácter crónico y extendido, probablemente asociado a descargas domésticas dispersas, escorrentía agrícola y procesos continuos de sedimentación fina. Estos tres sectores comparten la dominancia casi absoluta de macroinvertebrados tolerantes como *Tubifex* sp., *Helobdella* sp. y *Gammarus* sp., mientras que grupos indicadores de buena calidad como Trichoptera, Plecoptera o Ephemeroptera desaparecen por completo desde el segundo punto.

Figura 8. Variación por punto del índice ABI



Nota. Elaboración propia basado en los resultados obtenidos de los cálculos aplicados a los parámetros ICA.

La literatura coincide en que valores tan bajos del ABI reflejan ambientes donde la estructura comunitaria ha colapsado, dando paso a ensamblajes funcionalmente empobrecidos y dominados por organismos oportunistas (Mudenda et al., 2025). En el caso del Cunuyacu, estos valores concuerdan plenamente con los hallazgos del ICA y con los parámetros asociados a desoxigenación, incremento de DBO_5 y solutos totales. La coincidencia entre índices independientes refuerza la interpretación de que el sistema se encuentra en un estado de alteración severa.

12.5.6 Índice Shannon

El índice de Shannon–Wiener (H') se utilizó como medida complementaria para evaluar la diversidad ecológica del sistema, dado que integra tanto la riqueza de taxones como la equitatividad en sus abundancias. Diversos estudios han demostrado que H' es especialmente útil en ríos altoandinos, donde la estructura comunitaria responde de manera rápida a perturbaciones que afectan la heterogeneidad del hábitat (Lai et al., 2026).

El cálculo de H' mostró un patrón descendente a lo largo del gradiente longitudinal que refuerza la lectura proporcionada por el ABI. En la cabecera (P1), donde aún se mantienen cinco familias y una distribución relativamente heterogénea de abundancias, el valor de Shannon se ubicó en torno a niveles bajos pero aceptables para un tramo con intervención incipiente. Sin embargo, en los puntos P2, P3 y P4, la diversidad colapsa debido a la dominancia extrema de uno o dos taxones, principalmente *Gammarus* sp. y *Tubifex* sp., lo que reduce exponencialmente la equidad y homogeniza los ensamblajes bentónicos.

La diversidad en estos tramos medios y bajos permaneció en niveles cercanos al umbral mínimo reportado por la literatura para ecosistemas severamente perturbados. Esta pérdida no es solamente numérica, sino funcional: las estrategias ecológicas predominantes pasan de grupos filtradores y raspadores a organismos detritívoros y tolerantes a condiciones hipóxicas, lo cual confirma la transición hacia un ambiente eutrofizado y con hábitat altamente degradado.

B) Diagnosticar las condiciones actuales del recurso hídrico del Río Cunuyacu

El diagnóstico integral de la calidad del agua del río Cunuyacu permitió caracterizar el estado ambiental del cauce a partir de información fisicoquímica, microbiológica y biológica obtenida en la campaña de campo de 2025. Los resultados se interpretan en relación con la normativa ecuatoriana vigente (TULSMA, 2017) y con la evidencia reciente sobre dinámica ecológica en ríos altoandinos (Matovelle et al., 2024; Vargas et al., 2023; Sinchiguano et al., 2023). En conjunto, los datos confirman la presencia de un gradiente de deterioro vinculado al uso del suelo, con una calidad algo menos comprometida en los tramos de referencia y un incremento de las presiones antrópicas en los sectores agrícola-periurbanos.

12.6 Descripción general del muestreo

El muestreo se realizó en cuatro puntos georreferenciados distribuidos a lo largo del gradiente longitudinal del río, desde la zona de cabecera hasta el tramo bajo, con el propósito de capturar la transición desde condiciones relativamente conservadas hacia sectores sometidos

a mayor presión antrópica. El Punto 1 (Sector Loco) corresponde al tramo alto del río y funciona como referencia local, con cobertura vegetal ribereña continua y mínima presencia de infraestructuras. El Punto 2 (entorno de la U.E. Dr. Trajano Naranjo Iturralde) se ubica en el tramo medio-alto, donde se combinan actividades agrícolas dispersas con infraestructura educativa y circulación vehicular. El Punto 3 (Sector La Laguna) representa un tramo medio expuesto a mayor densidad de viviendas y a escorrentías domésticas, mientras que el Punto 4 (U.E. Ramón Barba Naranjo) se sitúa en el tramo bajo, donde confluyen los aportes acumulativos de las subcuencas y las descargas provenientes de zonas agrícolas y periurbanas.

La Tabla 24 resume la localización geográfica y las principales características de cada sitio de muestreo. La Figura 3 muestra la disposición espacial de los cuatro puntos sobre el cauce principal, evidenciando el descenso altitudinal progresivo y la transición en los usos del suelo. Este diseño espacial es coherente con los enfoques aplicados en otros sistemas andinos, donde la interpretación de la calidad del agua se apoya en gradientes longitudinales que integran la respuesta física, química y biológica del río.

Tabla 22.

Localización geográfica de muestreo del río Cunuyacu

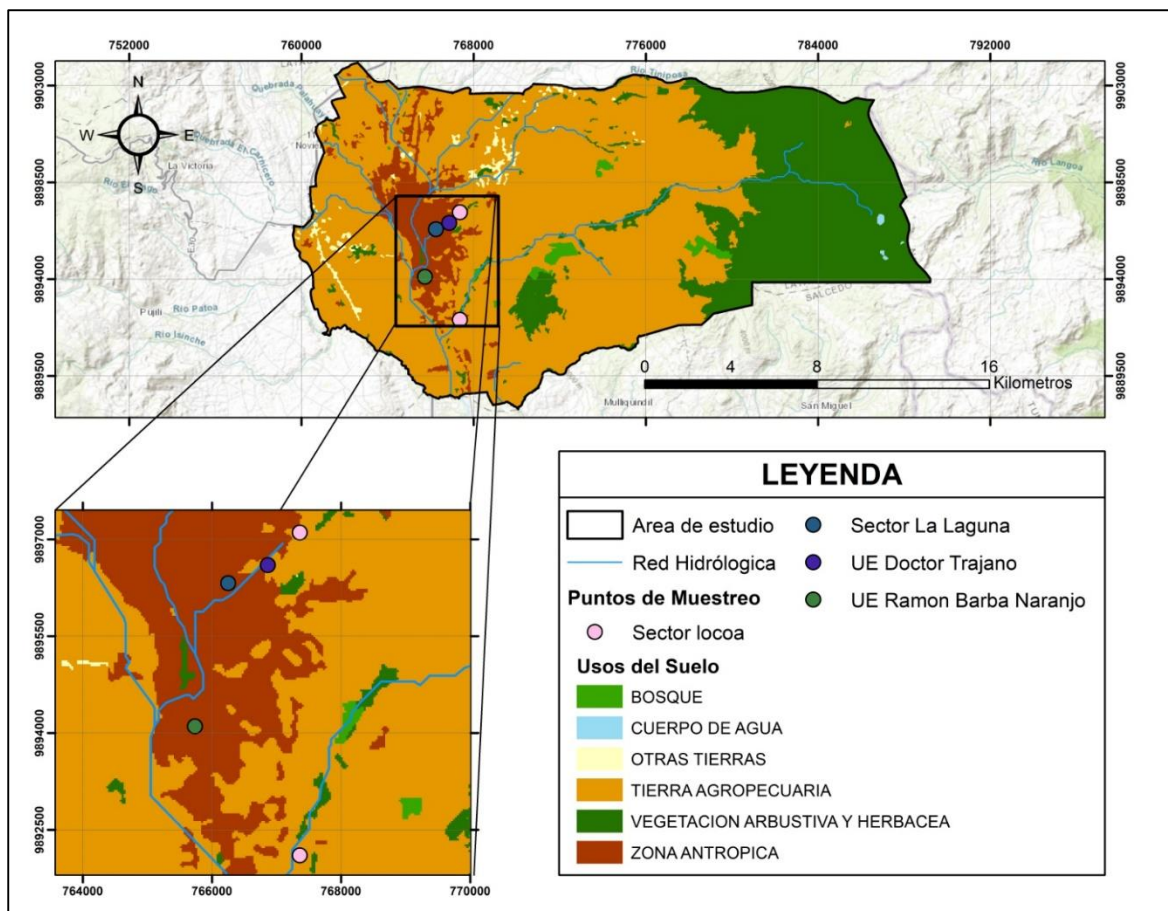
Punto	Nombre / Sector	Latitud / Longitud	Elevación (m s.n.m.)	Descripción general
P1	Sector Loco	-0.9347243, -78.6918736	2789.9 m	Zona alta con mínima intervención; vegetación ribereña continua; referencia ecológica.
P2	Atrás de la Unidad Educativa Dr. Trajano Naranjo Iturralde	-0.9346383, -78.6021238	2782.9 m	Tramo medio-alto; mezcla de actividades agrícolas dispersas y presencia de infraestructura educativa.
P3	Sector La Laguna	-0.9371928, -78.6076513	2784.9 m	Tramo medio; influencia urbana moderada, escorrentías domésticas y presión agrícola.
P4	Unidad Educativa Ramón Barba Naranjo	-0.9391712, -78.6122577	2768.6 m	Tramo bajo; mayor acumulación de impactos antrópicos, escurrimientos agrícolas y periurbanos.

Nota. Elaboración propia con base en medición GPS de campo (2025).

12.6.1 Mapa de uso y cobertura del suelo

El mapa de uso y cobertura del suelo que se encuentra en la Figura 9 ayuda a contextualizar los puntos de muestreo desde el punto de vista ambiental, al determinar cuál es la matriz territorial predominante. El paisaje está formado principalmente por terrenos agrícolas, mezclados con áreas pobladas y consolidadas por el hombre, pequeños parches de vegetación herbácea y arbustiva y zonas boscosas.

Figura 9. *Mapa de uso de suelo río Cunuyacu*



Nota. Elaboración propia en base a la delimitación territorial

Los puntos situados en el sector medio y bajo están inmersos en una matriz mayormente agropecuaria con un área antrópica importante, lo que señala una probabilidad más alta de que se aporten nutrientes, sedimentos y contaminantes provenientes de las actividades agrícolas y domésticas. Por el contrario, el punto del tramo alto tiene más cercanía con coberturas menos cambiadas, lo que fortalece su papel como referencia comparativa en el diseño de la investigación.

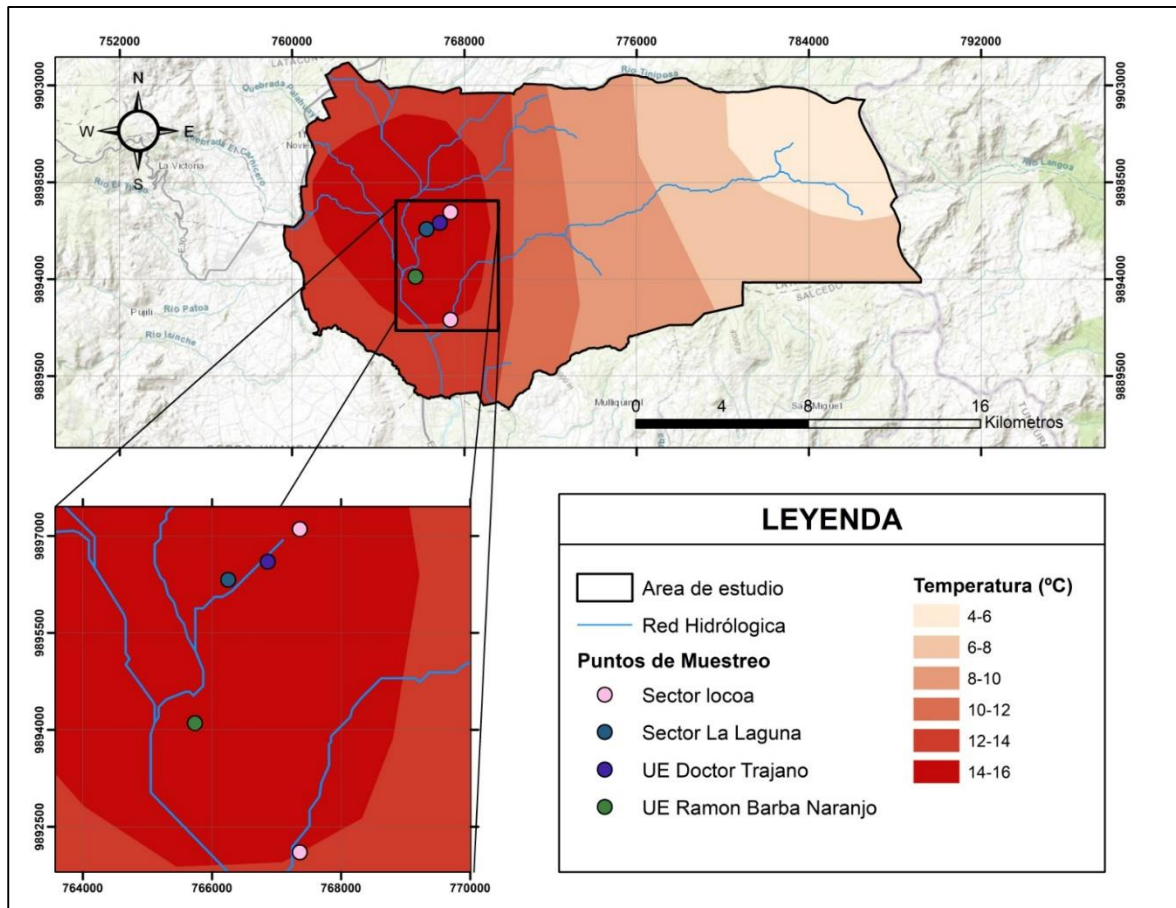
La microcuenca sufre una presión territorial mantenida debido a la fragmentación del bosque y la preponderancia de usos productivos. Desde un punto de vista hidrológico, esta disposición propicia que se acelere la escorrentía superficial, disminuya la infiltración y se trasladen potencialmente cargas contaminantes hacia el cauce principal. Por lo tanto, el mapa muestra una clara relación entre el uso del suelo y la posibilidad de que se altere la calidad del agua a través del gradiente longitudinal.

12.6.1 Temperatura

La Figura 10 presenta un mapa de temperatura que revela una distribución térmica bastante uniforme en el área de estudio inmediata, cuya mayoría se encuentra en el rango de

12 a 16 °C, lo cual coincide con la altitud típica de la zona andina intermedia. Sin embargo, se percibe un ligero gradiente espacial relacionado con la disminución de la altitud en dirección sur.

Figura 10. Mapa de temperatura



Nota. Elaboración propia en base a la delimitación territorial

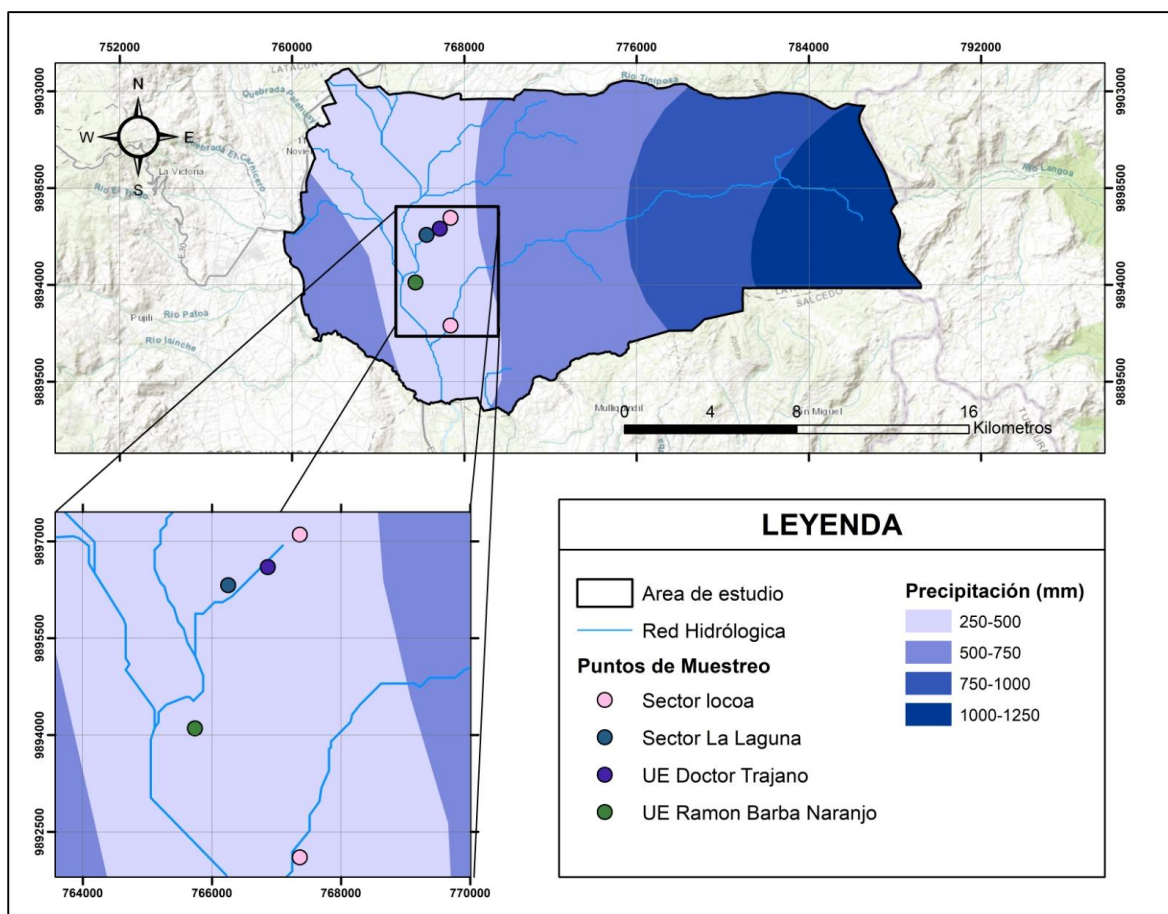
Los puntos de muestreo se colocan en la franja térmica más representativa del sistema, lo que significa que las fluctuaciones fisicoquímicas del agua no dependen de diferencias térmicas extremas, sino de factores antrópicos y relacionados con el uso del suelo. La homogeneidad térmica fortalece la validez del diseño comparativo porque disminuye la interferencia de la temperatura ambiental como una variable que puede causar confusión entre puntos.

Conforme a una visión ecohidrológica, los intervalos térmicos detectados concuerdan con ecosistemas fluviales de montañas medias, en los que la dinámica biogeoquímica puede ser afectada más por cambios locales en el caudal e incluso en la cobertura vegetal que por gradientes térmicos extensos.

12.6.2 Precipitación

En el mapa de precipitación ilustrado en la Figura 11 muestra una distribución espacial que va de 500 a 1000 mm al año en la zona de estudio, aumentando gradualmente hacia el sector oriental de la subcuenca. Los puntos de muestreo están situados en una zona de precipitación moderada, lo que indica condiciones relativamente análogas de aporte hídrico directo.

Figura 11. Mapa de precipitación



Nota. Elaboración propia en base a la delimitación territorial

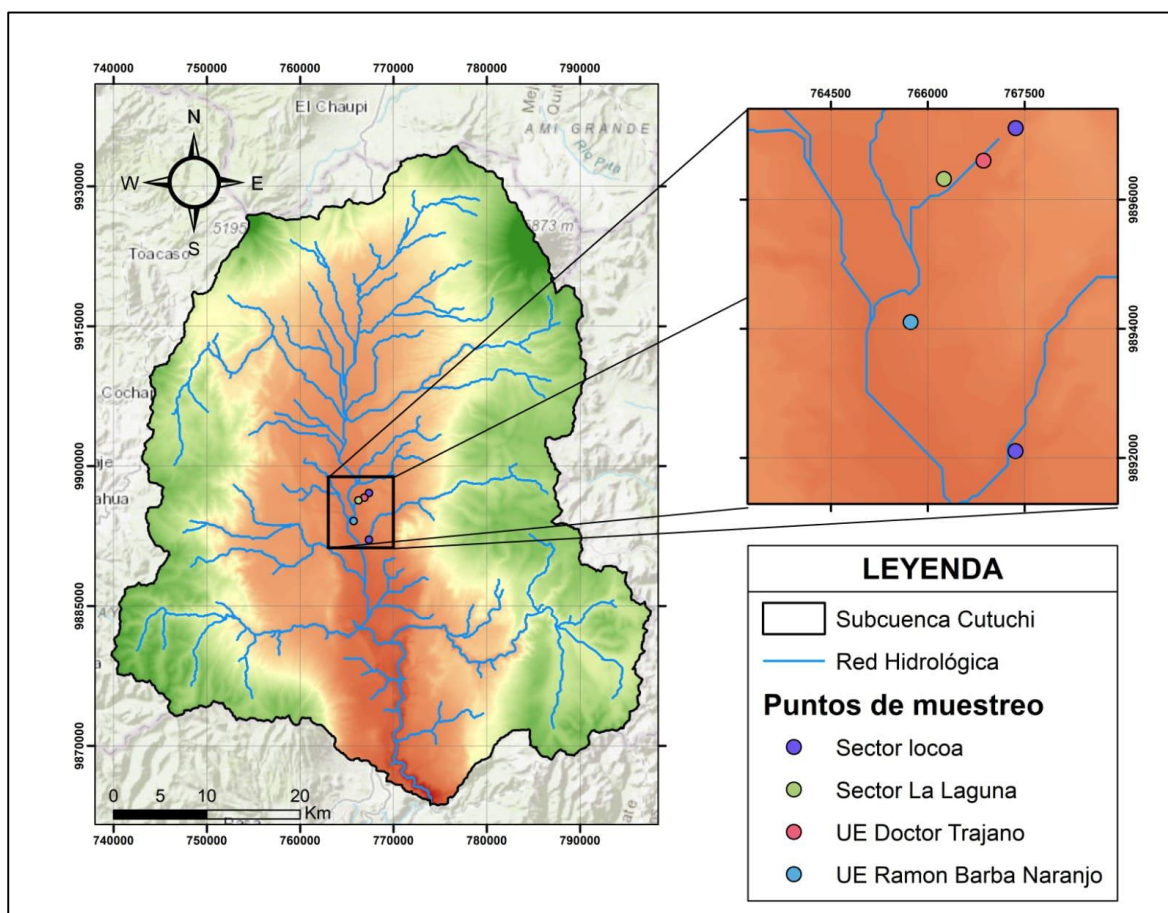
La semejanza relativa en la precipitación hace posible deducir que las disparidades en los parámetros de calidad del agua entre puntos estarían más relacionadas con procesos de escorrentía vinculados al uso del suelo que con diferencias significativas en el régimen de lluvias. No obstante, en situaciones de lluvias fuertes, la existencia de rangos un poco más altos en áreas vecinas podría contribuir con suministros adicionales de caudal y material particulado.

Desde el punto de vista hidrológico, el régimen de precipitación encontrado es adecuado para mantener una red hidrográfica activa y mover contaminantes difusos en situaciones donde la actividad agropecuaria es predominante. Esto tiene un impacto directo en cómo se interpretan los resultados físico-químicos y microbiológicos.

12.6.3 Mapa hipsométrico y red hidrográfica de la subcuenca Cutuchi

La Figura 12 muestra el mapa hipsométrico de la subcuenca Cutuchi, que ubica el área de estudio en un contexto geomorfológico más amplio, con un relieve montañoso y un marcado gradiente altitudinal, así como una red hidrográfica dendrítica muy desarrollada. El río Cunuyacu es un afluente dentro del sistema mayor y, por lo tanto, es parte de esta red.

Figura 12. Mapa de la subcuenca del río Cutuchi



Nota. Elaboración propia en base a la delimitación territorial

La representación altitudinal indica que los puntos de muestreo se encuentran en un área de transición entre zonas con pendientes más pronunciadas y áreas con pendientes moderadas. Es importante esta ubicación, porque las áreas con mayor pendiente propician una energía de flujo y un potencial erosivo más altos, mientras que en los tramos inferiores aumenta la acumulación de aportes que llegan desde subcuencas tributarias.

Los efectos detectados en el sector bajo no se deben solo a fuentes puntuales locales, sino también a la integración acumulativa de procesos tanto hidrológicos como antrópicos en la subcuenca, según lo confirma el contexto regional. Por lo tanto, este mapa fortalece la interpretación sistémica del estudio al conectar en términos de escala local y regional.

12.7 Comportamiento integrado de los índices

Para sintetizar la condición ecológica y sanitaria del río se utilizaron dos indicadores complementarios: el Índice Biótico Andino (ABI) y el Índice de Calidad del Agua (ICA) calculado a partir de los nueve subíndices de la metodología del SNET. La Tabla 23 presenta los valores de ambos índices para cada punto de muestreo y su clasificación cualitativa según las escalas definidas en el marco metodológico.

Tabla 23.

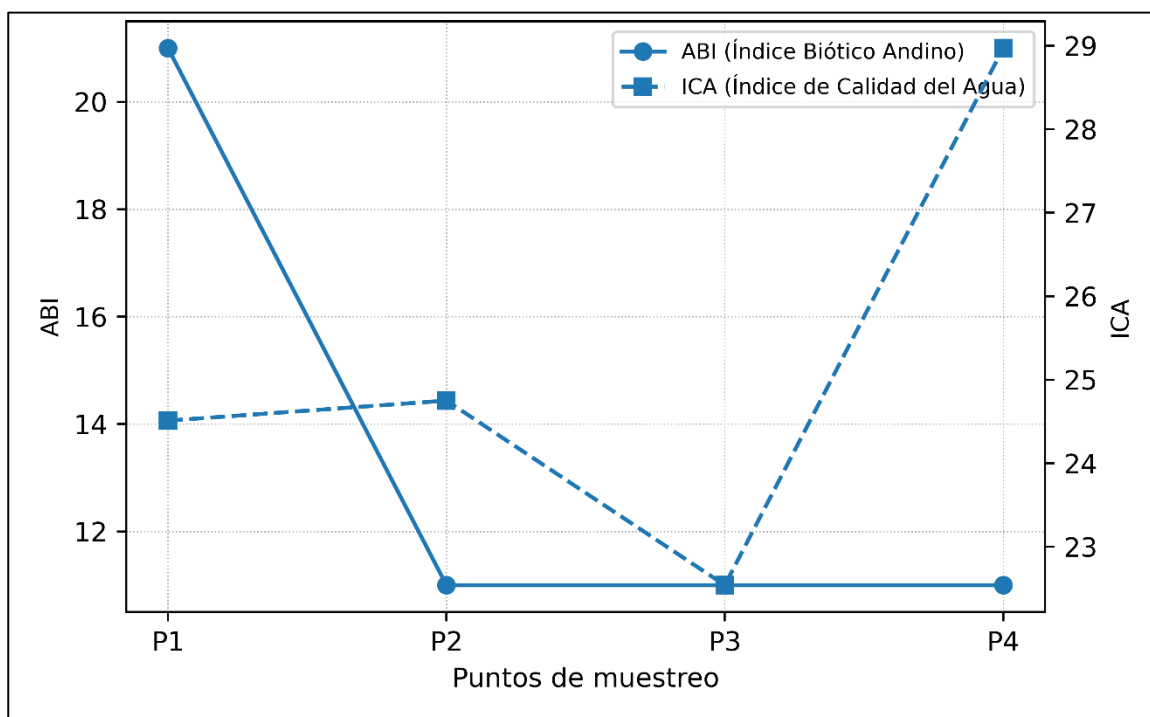
índices ABI e ICA por punto de muestreo

Punto	ABI (valor)	Categoría ABI	ICA (valor)	Categoría ICA
P1 – Locoá	21,0	Mala	24,51	Pésima
P2 – U.E. Trajano Naranjo	11,0	Pésima	24,75	Pésima
P3 – Sector La Laguna	11,0	Pésima	22,54	Pésima
P4 – U.E. Ramón Barba Naranjo	11,0	Pésima	28,97	Mala

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de laboratorio e índices calculados (2025).

Los resultados del ICA muestran que la calidad del agua es pésima en los tres primeros puntos y mejora solo ligeramente a mala en el tramo bajo. Los valores se mantienen en el rango 22–29, claramente por debajo del umbral de 50 que marca el límite entre condiciones malas y regulares. Por su parte, el ABI revela una situación ecológica críticamente degradada en casi todo el cauce: el Punto 1 alcanza una calidad mala (ABI = 21), mientras que los Puntos 2, 3 y 4 registran valores de 11, clasificados como pésimos según la escala adoptada. Este contraste indica que, aunque la calidad físico-química es muy deficiente a lo largo de todo el río, la comunidad de macroinvertebrados refleja un impacto aún más severo y persistente, especialmente en los tramos medio y bajo.

La Figura 13 ilustra el gradiente longitudinal del ABI y del ICA a lo largo de los cuatro puntos de muestreo mediante un gráfico de líneas, lo que permite visualizar la evolución conjunta de la calidad ecológica y de la calidad fisicoquímica. El patrón observado muestra un ligero “mejoramiento” químico relativo en el Punto 4, donde el ICA pasa de valores en torno a 22–25 a casi 29 puntos, posiblemente asociado a procesos de dilución y mezcla aguas abajo. Sin embargo, el ABI permanece invariablemente en niveles pésimos desde el Punto 2 en adelante, lo que sugiere que las comunidades bentónicas no se han recuperado a pesar de las variaciones locales en la carga contaminante. Este desacople entre los índices se puede visualizar en la Figura 19 y confirma que la biota integra el efecto acumulativo de las presiones a lo largo del tiempo y constituye un indicador más sensible del deterioro del ecosistema.

Figura 13. *Gradiente longitudinal de la calidad del agua*

Nota. Elaboración propia con base en medición GPS de campo (2025).

12.8 Caracterización por punto de muestreo

En el Punto 1 (Sector Loco), considerado como segmento de referencia, el valor del ABI (21 puntos, categoría mala) indica que, aunque aún se encuentran familias moderadamente sensibles como Hydropsychidae y Gammaridae, la estructura de la comunidad ya muestra una pérdida importante de taxones altamente sensibles y una presencia relevante de grupos tolerantes como Chironomidae. Desde la perspectiva fisicoquímica integrada en el ICA, el valor de 24,51 ubica la calidad del agua en la categoría pésima, lo que sugiere que las presiones antrópicas sobre el cauce se manifiestan desde etapas tempranas del gradiente, probablemente vinculadas a prácticas agrícolas y a la ausencia de una franja ribereña completamente intacta. La combinación de un ABI malo con un ICA pésimo revela que el tramo de cabecera no constituye un sitio prístino, sino un ambiente ya comprometido que solo conserva parcialmente su integridad ecológica.

En el Punto 2 (entorno de la U.E. Dr. Trajano Naranjo) se observa un deterioro marcado de la integridad biológica: el ABI desciende hasta 11 puntos, clasificándose como pésimo. Esta caída refleja una comunidad dominada por macroinvertebrados tolerantes, con reducción de la riqueza y de la equitatividad. El ICA se mantiene en valores similares a los del Punto 1 (24,75; categoría pésima), lo cual indica que las cargas de nutrientes y sólidos, junto con las

alteraciones físicas del cauce, no solo persisten, sino que se acentúan ligeramente. La coincidencia de un ABI y un ICA pésimos en este tramo sugiere que las presiones agrícolas y periurbanas asociadas al entorno de la unidad educativa generan un impacto significativo tanto sobre la calidad del agua como sobre las comunidades bentónicas.

El Punto 3 (Sector La Laguna) constituye el tramo con la condición química más comprometida, con un ICA de 22,54, también clasificado como pésimo. Este valor indica que la combinación de nutrientes, turbidez y cambios físicos y químicos alcanza su peor expresión en el sector medio del río, donde convergen descargas domésticas difusas y escorrentías urbanas. Biológicamente, el ABI se mantiene en 11 puntos (pésimo), lo que refleja una comunidad simplificada, empobrecida y dominada por organismos altamente tolerantes. La coincidencia de ambas categorías en el nivel más bajo de calidad confirma que el tramo medio es un “punto crítico” del sistema, en el que la capacidad de autodepuración del río resulta claramente insuficiente para contrarrestar las cargas que recibe.

En el Punto 4 (U.E. Ramón Barba Naranjo) se observa un comportamiento ligeramente distinto. El ICA aumenta hasta 28,97, pasando de la categoría pésima a mala, lo que sugiere cierto efecto de dilución o mezcla a lo largo del tramo bajo. No obstante, el ABI permanece en 11 puntos, manteniendo la clasificación de calidad ecológica pésima. Esta divergencia indica que, aunque algunas variables fisicoquímicas mejoran marginalmente aguas abajo, la comunidad de macroinvertebrados continúa reflejando un impacto severo y sostenido, coherente con la acumulación histórica de presiones agrícolas y periurbanas. Desde una perspectiva de gestión, este resultado implica que cualquier estrategia de recuperación del río Cunuyacu deberá considerar no solo la reducción de cargas puntuales y difusas, sino también la restauración del hábitat y de la estructura ecológica del cauce, dado que la biota evidencia un estado de alteración avanzado incluso donde la calidad química muestra ligeros indicios de mejora.

C) Elaborar una propuesta de conservación del río Cunuyacu.

PROPUESTA DE CONSERVACIÓN DEL RÍO CUNUYACU

1. Marco orientador de la propuesta de conservación

1.2. Fundamentación conceptual y normativa

La propuesta de conservación del río Cunuyacu se sustenta en un enfoque ecosistémico que entiende al río como un sistema vivo, dinámico y relacional, en el que confluyen procesos físicos, químicos y biológicos, pero también dimensiones sociales, productivas y culturales. Desde esta perspectiva, la calidad del agua deja de ser un atributo exclusivamente fisicoquímico para convertirse en un indicador integrado de integridad ecológica y de justicia ambiental en el territorio. En el caso del Cunuyacu, esta mirada resulta imprescindible, ya que los cambios registrados en parámetros como nutrientes, oxígeno disuelto, coliformes fecales y composición de macroinvertebrados evidencian un deterioro progresivo a lo largo del gradiente longitudinal, asociado tanto a la expansión de usos urbanos y agrícolas como a la insuficiencia de infraestructura de saneamiento y a la falta de control de descargas.

El sustento normativo de la propuesta se enmarca, en primer lugar, en la Constitución de la República del Ecuador, que reconoce a la naturaleza como sujeto de derechos y establece el derecho humano al agua, priorizando el uso para consumo humano y la conservación de los ecosistemas sobre cualquier otro aprovechamiento. La propia Constitución dispone que el Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos, y regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad del agua, así como el equilibrio de los ecosistemas asociados. En este marco, el río Cunuyacu no se concibe solamente como una fuente de agua utilitaria, sino como un sujeto de protección cuyo caudal, estructura y biodiversidad deben ser preservados y, en los tramos más degradados, restaurados.

En segundo lugar, la propuesta se articula con el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), en particular con la Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua y con su Anexo 1, que define límites permisibles para descargas, criterios de calidad para distintos usos del agua y métodos para la determinación de contaminantes. Esta normativa establece, por ejemplo, concentraciones máximas de nutrientes, coliformes y sólidos para cuerpos de agua destinados a riego, recreación o preservación de la vida acuática, lo que permite traducir los resultados del monitoreo en categorías de cumplimiento o incumplimiento regulatorio. La distancia observada entre los valores registrados en el Cunuyacu y los estándares del Libro VI no solo describe el nivel de deterioro, sino que justifica la necesidad de medidas correctivas, de mitigación y de restauración ecológica en los tramos más críticos.

Un tercer pilar lo constituye la Estrategia Nacional de Calidad del Agua 2016–2030 (ENCA), que propone ejes y líneas de acción para mejorar la calidad de las aguas superficiales en todo el país, con énfasis en la gestión integrada de cuencas, el fortalecimiento del monitoreo,

la educación ambiental y la coordinación interinstitucional. La ENCA plantea, entre otros aspectos, la necesidad de identificar cuerpos de agua prioritarios para intervención, diseñar programas de monitoreo continuo y fomentar la participación de gobiernos autónomos descentralizados y comunidades locales en la gestión del recurso. La situación del Cunuyacu, al ser un río secundario, pero altamente sensible, se alinea con el tipo de sistemas que la ENCA busca visibilizar y proteger: ríos que no forman parte de grandes proyectos de infraestructura, pero que son fundamentales para el abastecimiento local, el riego agrícola y la conservación de la biodiversidad altoandina.

Sobre este entramado constitucional y reglamentario se superpone, además, el marco global de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 6 (agua limpia y saneamiento), el ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles) y el ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres), que orientan las políticas públicas hacia la protección de fuentes de agua, la reducción de la contaminación y la restauración de ecosistemas degradados. La Estrategia Nacional de Calidad del Agua se presenta, precisamente, como un instrumento de operacionalización de estos objetivos en el contexto ecuatoriano, integrando metas de conservación, educación ambiental y fortalecimiento institucional.

En síntesis, la fundamentación conceptual y normativa de la propuesta de conservación del río Cunuyacu integra tres niveles complementarios: el reconocimiento constitucional de los derechos de la naturaleza y del agua, las normas técnicas específicas sobre calidad y descargas del Libro VI del TULSMA, y los lineamientos estratégicos de la ENCA y de los ODS. Esta convergencia justifica que las acciones planteadas no se limiten a correcciones puntuales de parámetros aislados, sino que apunten a recuperar la integridad ecológica del río, a reducir de manera estructural las presiones antrópicas y a consolidar un esquema de gobernanza local coherente con las obligaciones nacionales e internacionales en materia de agua y ambiente.

1.3. Síntesis diagnóstica orientada a la gestión

El diagnóstico integrado del río Cunuyacu evidencia un gradiente de deterioro longitudinal que se expresa de forma consistente en los parámetros fisicoquímicos, los nutrientes, el oxígeno disuelto y la respuesta biológica de la comunidad de macroinvertebrados. Los cuatro puntos de muestreo caracterizados permiten distinguir un tramo de cabecera con alteración incipiente, un tramo medio claramente crítico y un tramo bajo que, aunque muestra cierta recuperación parcial en algunos componentes, mantiene una condición global negativa desde la perspectiva ecológica.

En términos fisicoquímicos, la temperatura del agua aumenta desde 11,8 °C en la cabecera (P1 – Locoá) hasta 14,3 °C en el tramo bajo (P4 – U.E. Ramón Barba), reflejando tanto el gradiente altitudinal como la mayor exposición del cauce y la pérdida progresiva de cobertura ribereña. El pH se mantiene dentro del rango normativo establecido por el TULSMA (6,0–9,0), con valores ligeramente alcalinos que oscilan entre 7,4 y 7,9, por lo que no constituye por sí mismo una limitante crítica. Sin embargo, otros parámetros revelan una presión creciente: la conductividad eléctrica se incrementa desde 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en P1 hasta 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en P4, y los sólidos disueltos totales (TDS) pasan de 150 mg/L a 240 mg/L en el mismo tramo, lo que indica una mayor carga de sales y sustancias disueltas asociadas a vertidos y al arrastre de insumos agrícolas.

El comportamiento del oxígeno disuelto (OD) resulta especialmente relevante para la gestión. Mientras en la cabecera se registró un valor de 4,8 mg/L, por encima del mínimo de 4,0 mg/L recomendado por la normativa nacional para la protección de la vida acuática, en los tramos siguientes se observa una caída sostenida: 3,9 mg/L en P2, 3,2 mg/L en P3 y 2,8 mg/L en P4. Esto significa que, desde el segundo punto de muestreo, el río incumple el criterio de oxígeno mínimo para cuerpos de agua destinados a la preservación de ecosistemas acuáticos, situándose en condiciones hipóxicas que afectan directamente la fauna bentónica y la capacidad de autodepuración. En paralelo, la turbidez aumenta de 15 NTU en P1 a 55 NTU en P4. Aunque estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible de 75 UNT, el incremento de casi cuatro veces en el recorrido evidencia un aporte creciente de sólidos suspendidos, probablemente ligado a procesos de erosión de márgenes, arrastre de suelos agrícolas y pérdida de vegetación de ribera.

Los nutrientes y la materia orgánica oxidable muestran una tendencia coherente con este patrón. Los nitritos pasan de 0,06 mg/L en la cabecera a 0,27 mg/L en el tramo bajo, y los nitratos se incrementan de 2,1 mg/L a 4,6 mg/L. Aunque estos valores aún se ubican por debajo de los límites máximos establecidos por la normativa nacional (≤ 13 mg/L para nitratos y $\leq 0,20$ mg/L para nitritos; en el caso de nitritos, el valor de 0,27 mg/L en P4 ya supera el umbral recomendado), la tendencia ascendente es clara y refleja la influencia de fuentes difusas asociadas a fertilización y escorrentía agrícola. Algo similar ocurre con la DBO₅ y la DQO: la DBO₅ se eleva de 0,9 mg/L en P1 a 3,3 mg/L en P4, y la DQO de 6 a 18 mg/L a lo largo del gradiente. Aunque los valores absolutos se mantienen aún por debajo de los máximos permisibles (≤ 20 mg/L para DBO₅ y ≤ 40 mg/L para DQO), su incremento progresivo combinado con la disminución del oxígeno disuelto evidencia que el sistema se encuentra

sometido a una carga creciente de materia orgánica que está empezando a superar la capacidad de autorregulación natural del río.

En contraste con esta evolución, los coliformes fecales no se detectaron en ninguno de los puntos (<1 UFC/100 mL), lo que indica que, al momento del muestreo, no existía una contaminación microbiológica significativa de origen fecal. Este hecho es relevante para el diseño de la propuesta de conservación, pues sugiere que las presiones dominantes en el Cunuyacu están más asociadas a procesos de eutrofización incipiente, incremento de nutrientes y alteración del hábitat físico que a descargas masivas de aguas residuales domésticas sin tratamiento. Ello no excluye el riesgo de impactos microbiológicos futuros, pero orienta la priorización de medidas hacia el control de fuentes difusas, la gestión del uso del suelo y la recuperación de la franja ribereña.

La integración de estos parámetros en el Índice de Calidad del Agua (ICA) confirma que el sistema se encuentra en una situación crítica desde el punto de vista de calidad global. Los valores calculados para el Cunuyacu se ubican entre 22,54 y 28,97 puntos, muy por debajo de los rangos considerados aceptables. En la cabecera (P1 – Locoá) el ICA alcanza 24,51, clasificado como “pésima” calidad. Esta condición se mantiene prácticamente invariable en el tramo medio-alto (P2 – U.E. Trajano Naranjo), donde el índice es de 24,75 (“pésima”), y empeora levemente en el tramo medio (P3 – La Laguna), con 22,54 puntos, también en la categoría “pésima”. Solo en el tramo bajo (P4 – U.E. Ramón Barba) se observa una ligera mejora relativa, con un ICA de 28,97 que, si bien asciende a la categoría “mala”, continúa evidenciando una calidad claramente incompatible con un estado ecológico deseable. En términos de gestión, esto implica que el río Cunuyacu no presenta actualmente ningún tramo con calidad “regular”, “buena” o “excelente”, y que toda la longitud evaluada puede considerarse prioritaria para intervención, con especial énfasis en el sector medio donde confluyen las mayores presiones.

La respuesta biológica de la comunidad de macroinvertebrados, sintetizada mediante el Índice Biótico Andino (ABI), refuerza esta lectura y aporta información adicional sobre la integridad ecológica del sistema. En el punto de cabecera (P1) el ABI alcanza un valor de 21, correspondiente a la categoría “mala”, lo que indica que, aun en este tramo, la comunidad bentónica ya muestra signos de empobrecimiento y presencia de taxa tolerantes. En los tres puntos restantes (P2, P3 y P4) el ABI desciende hasta 11 puntos, situándose en la categoría “pésima”, con una estructura comunitaria dominada por grupos tolerantes a la contaminación y con una reducción notable de familias sensibles. La combinación de un ABI de 11 con valores de ICA en el rango 22–29 describe un escenario de alteración severa, donde no solo el agua

presenta condiciones fisicoquímicas desfavorables, sino que el hábitat bentónico ha perdido complejidad y capacidad de soporte para una biota diversa.

Esta convergencia entre indicadores fisicoquímicos (descenso del oxígeno disuelto, aumento de conductividad, TDS, nutrientes y turbidez), índices integrados de calidad (ICA en categorías “pésima” y “mala”) e indicadores biológicos (ABI “mala” en cabecera y “pésima” en el resto de tramos) configura un diagnóstico inequívoco para la gestión: el río Cunuyacu se encuentra en un estado de deterioro avanzado que no se limita a un punto aislado, sino que afecta a todo el tramo analizado, con un núcleo crítico claro en la zona media. Para las entidades responsables, estos resultados significan que la adopción de medidas de conservación y restauración no es una opción deseable a mediano plazo, sino una necesidad inmediata si se pretende evitar que el sistema transite hacia estados aún más degradados y difíciles de revertir. La propuesta que se desarrolla en las secciones siguientes se construye precisamente sobre esta base, priorizando intervenciones en el tramo medio del río, reforzando la protección de la cabecera, y articulando acciones de manejo del uso del suelo, control de fuentes difusas, restauración de la franja ribereña y fortalecimiento del monitoreo ecológico para revertir, de manera progresiva, los patrones de deterioro aquí descritos.

2. Objetivo general y objetivos específicos de la propuesta

2.1. Objetivo general

El objetivo general de la presente propuesta es recuperar progresivamente la calidad del agua y la integridad ecológica del río Cunuyacu mediante la reducción de presiones antrópicas, restauración ribereña y establecimiento de monitoreo continuo, frente a un estado crítico evidenciado por ICA 22,54–28,97 y ABI 11–21.

Este objetivo se fundamenta en la evidencia cuantitativa del diagnóstico, que muestra valores de ICA entre 22,54 y 28,97 (categorías “pésima” y “mala”) y un ABI reducido (11–21 puntos), indicadores que reflejan un estado crítico que exige intervención inmediata y sostenida.

2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos se estructuran en correspondencia directa con los componentes que explican el deterioro del sistema y con las metas de recuperación que pueden alcanzarse desde una gestión local robusta:

- a) Reducir cargas orgánicas, nutrientes y sólidos suspendidos para elevar el oxígeno disuelto por encima de 5 mg/L y disminuir la presión eutrófica.
- b) Restaurar la franja ribereña y estabilizar el hábitat fluvial para favorecer la recuperación de macroinvertebrados sensibles.
- c) Implementar un sistema permanente de monitoreo ICA–ABI–OD–nutrientes–turbidez para gestión adaptativa.
- d) Fortalecer gobernanza hídrica local mediante articulación GAD–juntas de agua–actores productivos.
- e) Promover educación ambiental y ordenamiento territorial para reducir fuentes difusas de contaminación.

3. Líneas estratégicas de conservación

3.1. Control de descargas y contaminación difusa

Las líneas estratégicas propuestas se construyen sobre el diagnóstico cuantitativo obtenido para el río Cunuyacu y se enfocan en revertir, de manera progresiva y medible, el deterioro observado en la calidad del agua (ICA 22,54–28,97), en los parámetros fisicoquímicos críticos (oxígeno disuelto entre 2,8 y 4,8 mg/L), en la creciente concentración de nutrientes (NO_3^- hasta 4,6 mg/L; NO_2^- hasta 0,27 mg/L) y en la pérdida significativa de integridad ecológica reflejada en el índice ABI (11–21). Cada línea responde a un problema claramente identificado y articula acciones que son técnica y operativamente viables para ser implementadas por el GAD en conjunto con actores locales.

La reducción de cargas difusas agrícolas y de escorrentía es una recomendación ampliamente respaldada por estudios de restauración fluvial en cuencas andinas y templadas. Autoridades como Allan & Castillo (2007), Gucker et al. (2009) y Naiman et al. (2010) demuestran que las franjas ribereñas vegetadas pueden reducir entre 60 y 95% del aporte de sedimentos, nitrógeno y fósforo, mientras que la estabilización de taludes y el control de ganado disminuyen significativamente la turbidez y la erosión.

En Ecuador, estas prácticas se corresponden con el TULSMA (Libro VI), que establece límites para nutrientes, sólidos, DBO y DQO, valores que el río Cunuyacu empieza a superar en forma ascendente, por lo que su control es indispensable para recuperar el oxígeno disuelto y detener la progresión hacia la eutrofización.

Tabla 24.*Plan operativo de control de contaminación difusa*

	Modo de aplicación	Responsable(s)	Indicador de evaluación	Resultado esperado
Establecimiento de franjas de amortiguamiento (5–10 m) con vegetación nativa	Plantación en ambos márgenes, priorizando P2–P3	GAD + comunidad + MAATE	Cobertura (%) de franja establecida	Reducción de turbidez y TDS; ↓ nutrientes
Control del acceso de ganado	Instalación de cercas vivas; bebederos alejados del cauce	GAD Parroquial + productores	Número de km de ribera cercada	↓ erosión; ↓ SST; mejora en OD
Identificación y corrección de descargas puntuales	Inspección comunitaria, verificación de conexiones	GAD Municipal + juntas de agua	Descargas corregidas / detectadas	Eliminación de descargas que afectan OD
Manejo responsable de fertilizantes	Capacitación + planificación agrícola	MAG + agricultores	Reducción del uso excesivo de N-P	↓ NO ₃ y NO ₂ en monitoreo semestral

3.2. Restauración de la franja riparia y del hábitat fluvial

La segunda línea estratégica se centra en recuperar la estructura ecológica del río, reconociendo que el deterioro del hábitat fluvial es un factor clave que explica la disminución del índice ABI (valores de 11 en P2, P3 y P4) y la pérdida de grupos sensibles. La restauración ribereña es una herramienta ampliamente validada para mejorar la calidad del agua, reducir la temperatura del cauce y crear condiciones favorables para macroinvertebrados y otros organismos acuáticos.

En el caso del Cunuyacu, la propuesta incluye la revegetación de la franja ribereña mediante especies nativas altoandinas como aliso (*Alnus acuminata*), chilca (*Baccharis latifolia*), pumamaqui (*Oreopanax ecuadorensis*) y especies herbáceas fijadoras de suelo. Estas especies, al desarrollar sistemas radiculares profundos, aumentan la estabilidad de las riberas y reducen la erosión que hoy alimenta la turbidez ascendente de 15 a 55 NTU entre P1 y P4.

La restauración del hábitat incluye también la reconfiguración de pequeñas unidades morfológicas del cauce, como pozas, rápidos y zonas de retención de materia orgánica. Este mosaico de microhábitats es esencial para reactivar la diversidad bentónica y mejorar tanto el índice ABI como el índice de Shannon, que en los tramos medios evidencia una marcada

simplificación de la comunidad. Medidas como la instalación de estructuras naturales (troncos anclados, agrupamiento de rocas seleccionadas) permiten generar heterogeneidad hidráulica sin alterar la integridad del cauce.

Estas acciones se priorizan especialmente en el tramo medio, donde coinciden el ICA más bajo (22,54), la mayor pérdida de familias sensibles y la reducción más marcada del oxígeno disuelto. Este sector constituye el “núcleo ecológico crítico” de la propuesta y requiere una intervención continua durante los primeros años de implementación.

La restauración ribereña es una de las estrategias más efectivas para recuperar la integridad ecológica en ríos degradados (Palmer et al., 2014; González del Tánago & García de Jalón, 2017). Los estudios demuestran que:

- La revegetación ribereña reduce temperatura del agua y mejora el oxígeno disuelto.
- La heterogeneización del hábitat incrementa el valor del ABI y la presencia de familias sensibles (EPT).
- La estabilización morfológica del cauce reduce la turbidez, uno de los factores críticos del Cunuyacu.

Tabla 25.

Plan operativo de restauración ribereña y de hábitat

	Modo de aplicación	de	Responsable(s)	Indicador de evaluación	de	Resultado esperado
Reforestación con especies nativas (aliso, chilca, pumamaqui)	Plantación escalonada pendiente y humedad	según y	GAD + MAATE + comunidades	Número de individuos plantados y sobrevivencia (%)	de y	↓ temperatura, ↑ OD
Estabilización de taludes críticos	Bioingeniería con mallas estacas geotextiles naturales	con vivas, y	GAD + contratistas ambientales	Longitud de talud intervenido		↓ SST, ↓ turbidez en P3–P4
Creación de microhábitats fluviales (pozas, refugios)	Colocación de rocas seleccionadas y madera natural	de y	GAD + MAATE	Número de estructuras instaladas	de	↑ familias sensibles EPT; ↑ ABI
Regeneración natural asistida	Exclusión temporal de áreas degradadas	de áreas	GAD propietarios ribereños	Superficie regeneración	en	Recuperación progresiva de vegetación

3.3. Gestión del uso del suelo y manejo integrado de la microcuenca

El deterioro del Cunuyacu no puede abordarse únicamente desde el cauce; requiere actuar sobre la microcuenca en su conjunto. Por ello, la tercera línea estratégica establece mecanismos para ordenar el uso del suelo de manera compatible con la recuperación ecológica. El incremento progresivo de conductividad, nutrientes y sólidos disueltos evidencia que la superficie agrícola y el manejo de suelos están influyendo directamente en la composición del agua. Esta relación exige una zonificación ambiental que distinga áreas de protección, transición y producción.

La propuesta contempla declarar como zona de protección prioritaria al tramo de cabecera, donde el agua presenta mejores condiciones iniciales (mayor oxígeno, menor turbidez y valores relativamente estables de nutrientes). Esta protección incluye restricciones al cambio de cobertura vegetal y a la expansión de la frontera agrícola. La zona de transición comprende sectores donde la actividad agrícola puede continuar, siempre que se adopten prácticas de conservación de suelos, manejo responsable de agroquímicos y estructuras de captación de escorrentía.

Finalmente, la zona de remediación prioritaria coincide con el tramo medio, en el cual se concentra el deterioro biofísico del sistema. Aquí se recomienda implementar prácticas estrictas de conservación, restringir el laboreo en pendientes elevadas, promover terrazas vivas y establecer corredores ribereños amplios que actúen como filtros bioactivos.

Tabla 26.

Plan operativo de ordenamiento territorial

	Modo de aplicación	Responsable(s)	Indicador	Resultado esperado
Declaración de zona de protección en P1	Ordenanza municipal de protección de cabecera	GAD Municipal	Aprobación de ordenanza	Conservación de tramo menos alterado
Zona de transición con agricultura sostenible	Buenas prácticas, terrazas vivas, control de agroquímicos	MAG + agricultores	Número de fincas certificadas	↓ NO ₃ y NO ₂ en P2-P3
Zona de remediación prioritaria	Restricciones al laboreo + reforestación	GAD Municipal	% de área reclasificada	Mejora en ICA del tramo medio
Infraestructura verde para escorrentía	Zanjas de infiltración, barreras vivas	GAD + agricultores	Longitud instalada	↓ sedimentos hacia el río

3.4. Educación ambiental y participación comunitaria

La participación comunitaria es un componente estructural de la conservación, especialmente en cuencas donde las presiones provienen de prácticas cotidianas. Aunque el diagnóstico evidenció una ausencia de contaminación fecal, sí reveló procesos erosivos y aportes difusos que dependen directamente del manejo local del territorio. Por esa razón, la cuarta línea estratégica propone fortalecer la educación ambiental en escuelas y comunidades, articulando acciones con juntas administradoras de agua y productores agrícolas.

Las actividades incluyen talleres periódicos sobre calidad del agua, jornadas de monitoreo participativo de macroinvertebrados, campañas de control de residuos y la formación de “guardianes ambientales” capaces de realizar observaciones básicas del estado del río. Estas acciones, además de generar corresponsabilidad, aumentan la capacidad local para identificar riesgos tempranos y evitar daños acumulativos en el tiempo.

Diversos estudios en manejo comunitario del agua (Boelens, 2015; Hoogesteger, 2017) muestran que la corresponsabilidad social genera mejoras sostenibles en la conservación hídrica. En ríos secundarios como el Cunuyacu, donde las presiones vienen del uso cotidiano del territorio, la educación ambiental es esencial para evitar efectos acumulativos.

Tabla 27.

Plan operativo de educación y participación

Actividad	Modo de aplicación	Responsable(s)	Indicador	Resultado esperado
Monitoreo participativo de macroinvertebrados	Talleres + kits simples	MAATE + escuelas	Nº de campañas realizadas	Mayor conciencia y vigilancia
Capacitación en manejo sostenible	Talleres para agricultores y juntas	MAG + GAD	Nº de asistentes formados	↓ prácticas que generan erosión
Campañas comunitarias de limpieza	Mingas bimensuales	Comunidad + GAD	Volumen de residuos retirados	Mejora estética y funcional del cauce
Formación de “guardianes ambientales”	Selección + capacitación	GAD + colegios	Nº de guardianes activos	Detección temprana de impactos

3.5. Gobernanza y articulación interinstitucional

Finalmente, la conservación del río Cunuyacu requiere una estructura de gobernanza estable que coordine esfuerzos, establezca responsabilidades y garantice la sostenibilidad de la propuesta. El GAD municipal y parroquial, en conjunto con el MAATE, las juntas de agua y las organizaciones locales, deben conformar un comité técnico de cuenca encargado de ejecutar

acciones, verificar el cumplimiento de metas y administrar los recursos destinados al monitoreo y la restauración.

Esta línea estratégica propone mecanismos de articulación formal, como acuerdos interinstitucionales, integración de la propuesta en los instrumentos de planificación territorial (PDOT) y la incorporación de metas del ICA y ABI dentro de los indicadores de gestión ambiental del GAD. Al institucionalizar el proceso, se evita que el avance dependa exclusivamente de voluntades políticas temporales y se garantiza la continuidad de las intervenciones en el largo plazo.

La literatura en gobernanza hídrica y manejo adaptativo (Pahl-Wostl, 2007; Biswas 2004) establece que la recuperación de ríos exige estructuras institucionales estables, con roles claros y protocolos de toma de decisiones multi-actor. Esta línea se convierte en la columna vertebral para implementar todo lo anterior.

Tabla 28.

Plan operativo de gobernanza

	Modo de aplicación	Responsable(s)	Indicador	Resultado esperado
Creación del Comité de Gestión del Cunuyacu	Ordenanza o resolución municipal	GAD Municipal	Comité conformado	Estructura formal de gestión
Integración de la propuesta al PDOT	Alineación con instrumentos locales	GAD + MAATE	Inclusión oficial	Asegura continuidad administrativa
Protocolos de coordinación	Reuniones trimestrales y reportes	Comité de cuenca	Nº de reuniones / reportes	Seguimiento transparente
Incorporación de metas ICA-ABI	Indicadores de desempeño ambiental	GAD Municipal	Metas fijadas	Evaluación anual del avance

4. Programa de monitoreo ecológico y de calidad del agua

El programa de monitoreo propuesto constituye el eje regulador de todo el proceso de conservación, ya que permite evaluar de manera continua la eficacia de las intervenciones, anticipar riesgos y ajustar las estrategias mediante un enfoque adaptativo. Dado que el río Cunuyacu presenta valores críticos de calidad (ICA entre 22,54 y 28,97; oxígeno disuelto entre 2,8 y 4,8 mg/L; turbidez de 15 a 55 NTU; incremento de nutrientes; ABI de 11–21) el monitoreo debe ser riguroso, periódico y multidimensional, integrando variables fisicoquímicas, microbiológicas y biológicas con indicadores hidromorfológicos y territoriales.

4.1. Diseño del sistema de monitoreo

El diseño del monitoreo se basa en tres principios fundamentales:

1. Continuidad temporal

Para capturar las variaciones estacionales propias de cuencas andinas, se establecen dos campañas principales por año:

- época seca (junio–agosto)
- época lluviosa (febrero–abril)

Además, durante los primeros dos años, se recomienda un muestreo trimestral para captar la respuesta temprana a las intervenciones.

2. Representatividad espacial

Se mantienen los cuatro puntos del diagnóstico original:

- P1 – Locoá (cabecera; referencia)
- P2 – Trajano Naranjo (transición)
- P3 – La Laguna (núcleo crítico)
- P4 – U.E. Ramón Barba (tramo bajo; respuesta acumulada)

Este diseño permite evaluar gradientes longitudinales y detectar la eficiencia de las acciones ejecutadas en la zona media.

3. Integración de tres dimensiones

El monitoreo debe evaluar:

- Calidad fisicoquímica (oxígeno, turbidez, nutrientes, TDS, conductividad, temperatura)
- Calidad biológica (macroinvertebrados; ABI; Shannon–Wiener)
- Calidad microbiológica (E. coli / coliformes, para asegurar vigilancia preventiva)

La combinación de ICA + ABI + parámetros funcionales permite identificar mejoras o deterioros incluso cuando un parámetro aislado no muestre cambios inmediatos.

4.2. Indicadores, umbrales y metas

A continuación, se presenta la matriz técnica con los parámetros, los métodos recomendados y las metas de mejora a 5 y 10 años, definidas con base en tu diagnóstico.

Tabla 29.

Indicadores del programa de monitoreo, umbrales y metas

	Indicador	Método	Umbral normativo / ecológico	Meta a 5 años	Meta a 10 años
Fisicoquímico	Oxígeno disuelto (mg/L)	Sonda multiparamétrica	≥ 4 mg/L (TULSMA)	P3 y P4 ≥ 4 mg/L	Todo el río ≥ 5 mg/L
	Turbidez (NTU)	Turbidímetro	≤ 75 (TULSMA)	Reducir 20–30% en P3–P4	Reducir 50% respecto 2024
	Nitratos (mg/L)	Colorimetría/ion	≤ 13 mg/L	Estabilizar valores < 5 mg/L	Descenso sostenido < 3 mg/L
	Nitritos (mg/L)	Colorimetría	≤ 0,20 mg/L	P4 por debajo del límite	Todos los puntos < 0,10 mg/L
	Conductividad (μS/cm)	Multisonda	—	Detener tendencia ascendente	Reducir 10–15%
	TDS (mg/L)	Multisonda	—	Reducir 10%	Reducir 25%
Microbiológico	Coliformes fecales	Filtración por membrana	< 1000 UFC/100 mL	Mantener < 200	Mantener < 200
Biológico	ABI	Macroinvertebrados – Andean Biotic Index	—	P3 y P4 ≥ 16 (de “pésima” a “mala”)	Todo el río ≥ 20 (“regular”)
	Índice de Shannon	Diversidad bentónica	—	↑ 25% en P3–P4	Duplicar respecto línea base
Integrados	ICA	WQI multiplicativo	—	Subir categoría a “mala–regular”	Alcanzar “regular–buena”

4.3. Monitoreo participativo

Una innovación importante de este programa consiste en combinar monitoreo técnico formal con monitoreo participativo, lo que permite:

- aumentar la frecuencia de observaciones,
- fortalecer el sentido de corresponsabilidad,
- y generar vigilancia comunitaria sobre prácticas que puedan afectar el río.

Componentes del monitoreo participativo

a) Escuelas de monitoreo bentónico

Estudiantes y docentes utilizan kits simples para identificar macroinvertebrados clave (EPT y tolerantes). Esta práctica ya se ha implementado con éxito en programas de monitoreo comunitario en Colombia, Bolivia y Ecuador.

b) Brigadas comunitarias de verificación

Integradas por juntas de agua y líderes barriales, registran eventos de contaminación, movimientos de tierra, proyectos que afectan el cauce, acceso de ganado o descargas puntuales.

c) Boletín hídrico semestral del Cunuyacu

Emitido por el GAD parroquial y el Comité de Cuenca, con resultados resumidos, gráficos y advertencias. Esto transparenta el proceso y evita la pérdida de continuidad entre administraciones.

5. Plan de implementación, cronograma y costos referenciales

5.1. Fases de implementación

Tabla 30.

Fase I (1–2 años): Intervención inmediata y fortalecimiento institucional

	Actividades específicas	Responsable(s)	Indicadores	Resultados esperados
Gobernanza inicial	Conformación del Comité de Gestión del Río Cunuyacu	GAD Municipal, GAD parroquial, MAATE, juntas de agua	Comité formalizado	Gobernanza estable para la toma de decisiones
Control de contaminación	Identificación y corrección de descargas puntuales	GAD + juntas de agua	Nº de descargas corregidas	Disminución de cargas orgánicas en tramos críticos
Manejo ribereño	Instalación inicial de franjas de amortiguamiento (5–10 m)	GAD + comunidad	Metros de ribera recuperados	Reducción de escorrentía y erosión superficial
Control de ganado	Implementación de cercas vivas y control de acceso	GAD + productores	Km de ribera cercada	Reducción de turbidez y SST
Monitoreo	Inicio del monitoreo trimestral (OD, turbidez, nutrientes, ABI)	GAD + MAATE + laboratorio	Nº de campañas ejecutadas	Línea base robusta y vigilancia continua
Educación	Talleres piloto y jornadas comunitarias	GAD + escuelas	Nº de talleres/participantes	Corresponsabilidad y sensibilización

Tabla 31.*Fase II (3–5 años): Restauración ecológica y ordenamiento territorial*

	Actividades específicas	Responsable(s)	Indicadores	Resultados esperados
Restauración ribereña	Reforestación completa con especies nativas	GAD + MAATE + comunidad	Nº de plantas / % sobrevivencia	Mejora de OD y estabilidad térmica
Bioingeniería	Estabilización de taludes con técnicas vivas	GAD + contratistas ambientales	Longitud intervenida	Reducción de sedimentos y turbidez
Hábitat fluvial	Creación de pozas, refugios, estructura de microhábitats	GAD + MAATE	Nº de estructuras instaladas	Incremento del ABI y del índice de Shannon
Ordenamiento territorial	Implementación de zona de protección, transición y remediación	GAD Municipal	Ordenanza aplicada / área reclasificada	Control del uso del suelo y presión difusa
Monitoreo mejorado	Transición a monitoreo semestral	GAD + laboratorio	Nº de campañas	Evaluación continua del progreso ecológico
Educación avanzada	Escuelas de monitoreo y brigadas ambientales	GAD + escuelas + juntas	Nº de actores formados	Monitoreo comunitario estable

Tabla 32.*Fase III (6–10 años): Ajustes adaptativos y sostenibilidad*

Componente	Actividades específicas	Responsable(s)	Indicadores	Resultados esperados
Consolidación institucional	Integrar metas ICA–ABI en PDOT y POA	GAD Municipal	Inclusión normativa	Sostenibilidad administrativa
Ajustes adaptativos	Evaluación de resultados y rediseño de estrategias	Comité de Gestión	Informes anuales	Intervención basada en evidencia
Expansión del modelo	Replicación en microcuencas vecinas	GAD + MAATE	Nº de cuencas integradas	Restauración a escala regional
Mantenimiento ribereño	Control anual de sobrevivencia vegetal y estabilidad	GAD + comunidad	% de cobertura estable	Permanencia de la franja riparia
Monitoreo continuo	Campañas semestrales y comunitarias	GAD + juntas + escuelas	Nº de campañas ejecutadas	Evaluación continua de ICA, ABI, OD
Participación comunitaria	Campañas institucionalizadas y guardias ambientales	Comunidad + GAD	Nº de actividades anuales	Gobernanza social sólida

5.2. Estimación de recursos y financiamiento

Los montos presentados son referenciales, basados en experiencias de restauración de microcuencas altoandinas en Ecuador, Colombia y Perú.

Tabla 33.

Costos referenciales por línea estratégica

	Actividades principales	Costo estimado (USD)	Observaciones
Control de contaminación difusa	Barreras vivas, cercas, control de escorrentía	18.000 – 25.000	Prioridad año 1
Restauración ribereña	Reforestación nativa, bioingeniería, microhábitats	35.000 – 50.000	Fase II; depende de extensión
Ordenamiento territorial	Zonificación, señalética, acuerdos con propietarios	8.000 – 12.000	Costo político + técnico
Educación y participación	Talleres, kits de monitoreo, materiales	6.000 – 10.000	Ejecutable desde año 1
Gobernanza y articulación	Comité, logística, informes, reuniones	4.000 – 7.000 anuales	Se mantiene en el tiempo
Monitoreo ecológico	Equipos, laboratorio, campañas semestrales	12.000 – 18.000 anuales	Requiere financiamiento continuo

6. Viabilidad, riesgos y sostenibilidad de la propuesta

6.1. Viabilidad técnica y social

La propuesta se sustenta en cinco factores que garantizan su factibilidad:

- Tecnologías accesibles:

Las acciones planteadas (bioingeniería con material vivo, franjas de amortiguamiento, control de ganado, reforestación, microhábitats) no requieren maquinaria especializada ni técnicas complejas.

Estas intervenciones ya han sido aplicadas en cuencas altoandinas del Ecuador, Colombia, Bolivia y Perú, con costos moderados y alta efectividad.

- Capacidad local existente:

El GAD municipal ya cuenta con unidades ambientales y equipos técnicos capaces de ejecutar obras menores, coordinar campañas y supervisar trabajos comunitarios.

- Disponibilidad de insumos locales:

Las especies vegetales propuestas (aliso, chilca, pumamaqui) son nativas y disponibles en viveros municipales y comunitarios.

- Métodos de monitoreo consolidados:

El ICA y el ABI son índices estándar compatibles con laboratorios nacionales y con metodologías del MAATE y universidades locales.

- Río de escala manejable:

El Cunuyacu no es un gran río, sino una microcuenca manejable, lo que permite intervenir de manera efectiva y con costos razonables.

La intervención también es socialmente viable porque:

- Las comunidades dependen del río para riego, agua y uso cotidiano, por lo que existe motivación para conservarlo.
- Las juntas de agua tienen experiencia en organización comunitaria y pueden realizar monitoreo, vigilancia y control.
- Las escuelas de la zona ya participan en actividades ambientales y pueden fortalecer el monitoreo participativo.
- Además, la propuesta evita medidas restrictivas severas (como prohibiciones agrícolas absolutas) y apuesta por mecanismos de transición, concertación y corresponsabilidad, lo cual incrementa la aceptación social.

6.2. Riesgos y barreras

Aunque la propuesta es viable, enfrenta riesgos que deben gestionarse mediante acciones anticipadas.

Se clasifican en técnicos, sociales, institucionales y ambientales.

Tabla 34.*Principales riesgos de la propuesta y medidas de mitigación*

Tipo de riesgo	Descripción	Impacto potencial	Medidas de mitigación
Técnico	Franja ribereña con baja sobrevivencia	Atraso en restauración	Riego inicial, selección de especies nativas, mantenimiento comunitario
Técnico	Insuficiente control de ganado	Persistencia de erosión y turbidez	Cercas vivas + acuerdos con ganaderos + bebederos alternativos
Social	Falta de participación comunitaria sostenida	Caída del monitoreo participativo	Incentivos educativos, participación escolar, calendarios vinculantes
Institucional	Alta rotación de autoridades municipales	Pérdida de continuidad	Integrar metas ICA-ABI al PDOT/POA; comité permanente
Institucional	Competencias poco claras entre GAD y MAATE	Conflictos de ejecución	Acuerdos interinstitucionales y manual de roles
Ambiental	Eventos extremos (inundaciones, lluvias intensas)	Daño a estructuras y taludes	Bioingeniería reforzada, revegetación con raíces profundas
Financiero	Presupuesto limitado o discontinuo	Paralización de acciones	Diversificar financiamiento (GAD, MAATE, cooperantes)

De esta manera, la propuesta de conservación del río Cunuyacu es un instrumento coherente, técnicamente fundamentado, ambientalmente necesario y viable para el territorio. Abarca el deterioro actual, define metas realistas, integra a las instituciones responsables y se sustenta en mecanismos de monitoreo capaces de medir avances y orientar ajustes.

Con la adopción del plan, el GAD no solo responde a una obligación ambiental, sino que adquiere una herramienta estratégica para garantizar agua, biodiversidad y resiliencia climática para la población del sector.

13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El examen combinado de los indicadores químicos, físicos y biológicos reveló que, aunque el río Cunuyacu presenta una calidad fisicoquímica normativa adecuada, muestra un deterioro ecológico importante al analizarse los parámetros biológicos. A pesar de que los niveles de nitratos se mantuvieron bajos y no se hallaron coliformes fecales ni materia orgánica biodegradable en la mayoría del cauce, los nitritos rebasaron repetidamente las concentraciones guía y la comunidad bentónica exhibió una dominancia evidente de taxones tolerantes.

Según este diagnóstico, el río Cunuyacu se encuentra en un estado de equilibrio inestable. Aunque las cabeceras mantienen cierta funcionalidad, los segmentos medio y bajo están sometidos a presiones que amenazan la integridad del ecosistema. Los valores del Índice de Calidad del Agua, que se aplica a través de la metodología NSF, van desde regulares hasta malos, lo cual es una tendencia que va en línea con la disminución observada en los índices biológicos.

Sobre esta base, la propuesta de conservación elaborada busca atender de manera simultánea las causas de la alteración y las necesidades del ecosistema. La evidencia señala que la recuperación del Cunuyacu no puede centrarse únicamente en el control de vertimientos o en intervenciones puntuales, sino que requiere fortalecer su capacidad de resiliencia ecológica y reducir la presión ejercida desde las riberas y las áreas productivas. La restauración de la vegetación ribereña, el manejo responsable de fertilizantes y drenajes agrícolas, la regulación de descargas domésticas no tratadas y la consolidación de procesos comunitarios de educación y vigilancia ambiental emergen como líneas de acción indispensables para revertir el deterioro documentado.

Recomendación

Con base en estas pruebas, se sugiere robustecer el monitoreo a través de un modelo multicomponente, en el que la evaluación fisicoquímica se complemente de forma sistemática con bioindicación y medidas de integridad ecológica. Esta táctica posibilitará la detección de cambios tempranos, la adecuación de medidas administrativas y el análisis de tendencias de mejoría o deterioro.

En vista de este escenario, es esencial establecer acciones correctivas inmediatas dirigidas a disminuir las presiones antropogénicas detectadas. Se aconseja anteponer la instalación de sistemas de tratamiento o pretratamiento de aguas residuales a escala reducida, la restauración ecológica de las riberas a través de corredores biológicos nativos, el control de

escorrentías agrícolas mediante barreras vivas y prácticas agroecológicas adecuadas, así como la regulación estricta de acciones en áreas de ronda hídrica

La propuesta para preservar el río Cunuyacu debe ser un proceso constante que comience por regular las presiones directas, a través de convenios con los agricultores para la disminución del empleo de fertilizantes altamente solubles. Además, se deben mejorar los drenajes y la gestión de aguas grises en áreas periurbanas, con el objetivo de reducir la cantidad de nutrientes y el material orgánico que entra al cauce.

14. BIBLIOGRAFÍA

- Agrocalidad. (2020). *Instructivo INT/SFA/12: Muestreo para análisis de aguas*. Agrocalidad Ecuador. <https://www.agrocalidad.gob.ec/>
- Alcívar, C. L., Vaca, E. T., Córdor, C. S., Silva, L. P., Bayancela, S. D., & Rivera, M. F. V. (2025). Evaluación de la calidad del agua en ecosistemas altoandinos: un análisis comparativo de índices basados en macroinvertebrados. *Novasinerzia*, 8(2), 56–71. <https://doi.org/10.37135/NS.01.16.03>
- Allan, J. D. (2004). Landscapes and riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35(2004), 257–284. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.ECOLSYS.35.120202.110122/CITE/REFWORKS>
- Angeles, M., Altamirano, J. C., Juárez-Contreras, L., Chichipe Vela, E., Florida García, J., & Rascón, J. (2024). Ecological quality of the Jucusbamaba River, a high Andean urban river in northeastern Peru. *Environmental Advances*, 17, 100584. <https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2024.100584>
- Armijos, F. A., Salazar, C., Beltrán, A. A. D., Kurbatova, A. I., & Savenkova, E. V. (2025). Assessment of Water Quality and Ecological Integrity in an Ecuadorian Andean Watershed. *Sustainability*, 17(8), 3684. <https://doi.org/10.3390/SU17083684>
- Asamblea Nacional. (2014). *Ley Orgánica de Recusos Hídricos Uso y Aprovechamiento del Agua*. www.lexis.com.ec
- Baird, Rodger., Eaton, A. D. ., Rice, E. W. ., & Bridgewater, Laura. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association.
- Cangás, A. L. R. (2025). *Evaluación de la calidad del agua del río Las Monjas e identificación de los principales puntos de contaminación*. [Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/45352>
- Carvajal, T. B., Castañeda, A. C., Conejo, W., Montoya, J. V., Burghardt, M., & Villamarín, C. (2025). Wetlands aquatic community structure under active and passive restoration in high Andean páramos. *Aquatic Sciences*, 87(4), 83-. <https://doi.org/10.1007/S00027-025-01210-1>
- CEPAL. (2019). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Objetivos, metas e indicadores mundiales | CEPAL. In *Agenda 2030*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40155-la-agenda-2030-objetivos-desarrollo-sostenible-oportunidad-america-latina-caribe>
- Chapman, D. V., & Sullivan, T. (2022). The role of water quality monitoring in the sustainable use of ambient waters. *One Earth*, 5(2), 132–137. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2022.01.008>
- Colley, D. R. J., & Smith, D. G. (2001). Turbidity, suspended sediment, and water clarity: A review. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1085–1101. <https://doi.org/10.1111/J.1752-1688.2001.TB03624.X;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:17521688;JOURNAL:JOURNAL:17521688;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). In *Asamblea Nacional del Ecuador*. (Vol. 449, Issue 20, pp. 1–219). Registro Oficial 449. <https://www.defensa.gob.ec/wp->

content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf

- Custodio, M., & Chávez, E. (2019). Quality of the aquatic environment of high Andean rivers evaluated through environmental indicators: a case of the Cunas River, Peru. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 396–409. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000300396>
- Encalada, A., Rieradeval, M., Ríos, B., García, N., & Prat, N. (2011). *Protocolo simplificado y guía de evaluación de la calidad ecológica de ríos andinos (CERA-S)*. https://www.fehm.cat/wp-content/uploads/2025/04/CERA-S_finalLR_compressed.pdf
- Escobar, N. E. I., Florez, G. A. P., Ocampo-G, D. V., Muñoz-Nates, C. S., Feriz, D., Palacio-Bayer, J. N., Muñoz-Burbano, L. M., Cabezas, C., Mosquera, J. M. B., & Muñoz, E. M. N. (2025). Biodiversidad de las lagunas del Parque Nacional Natural Puracé: composición taxonómica y estados de conservación. *Acta Biológica Colombiana*, 30(2), 81–92. <https://doi.org/10.15446/abc.v30n2.116978>
- Feng, Y., Cao, Y., Chan, M. Y., Ye, Z., Zhao, Z., Yu, L., Liang, Y., Carver, S., & Yang, R. (2025). Assessing ecosystem integrity in protected areas: A systematic review of methods and applications. *Biological Conservation*, 305, 111057. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2025.111057>
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., & Rockström, J. (2010). Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 15(4). <https://doi.org/10.5751/ES-03610-150420>
- González, L. E., Duque, N. G., & Cogua, R. P. (2025). Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores del impacto acuícola en la calidad del agua del Lago Guamuez, Nariño, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 30(3). <https://doi.org/10.21897/RMVZ.3758>
- Hecht, S., Schmink, M., Abers, R. N., Assad, E., Bebbington, D. H., Brondizio, E., Costa, F. de A., Durán, A. M. C., Fearnside, P., Garrett, R., Heilpern, S., McGrath, D., Oliveira, G. de L. T., Pereira, H., & Pinedo-Vazquez, M. (2024). Amazonia in motion: Changing politics, development strategies, peoples, landscapes and livelihoods. *Acta Amazonica*, 54(spe1), 306. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202203060>
- Hemraj, D. A., & Carstensen, J. (2025). Towards ecosystem-based techniques for tipping point detection. *Biological Reviews*, 100(2), 892–919. <https://doi.org/10.1111/BRV.13167;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Hora, M. E. R., Gabriel, A. R. A., Polo, J. L. C., Marchena, J. M. D., López, E. L., & Sedeño, J. E. D. (2025). Calibration and Validation of the BMWP Index for the Assessment of Fluvial Systems in High Andean Mining Areas of Peru. *Water (Switzerland)*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/W17121724/S1>
- Iza, G. G. Q. (2020). *Estudio de la calidad del agua del Río Guayllabamba, ubicado dentro del Distrito Metropolitano de Quito en el periodo 2013-2019*. [Universidad Técnica de Cotopaxi]. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7114>
- Jerves, R. C., Forio, M. A. E., Lock, K., Van Butsel, J., Pauta, G., Cisneros, F., Nopens, I., & Goethals, P. L. M. (2020). Biological water quality in tropical rivers during dry and rainy seasons: A model-

- based analysis. *Ecological Indicators*, 108, 105769. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2019.105769>
- Kaijser, W., Musiol, M., Schneider, A. R., Prati, S., Brauer, V. S., Bayer, R., Birk, S., Brauns, M., Dunne, L., Enss, J., Farias, L., Feld, C. K., Feldhaus, L., Gillmann, S. M., Hupało, K., Osakpolor, S. E., Olberg, S. L. M., Pimentel, I. M., Schäfer, R. B., ... Hering, D. (2025). Meta-analysis-derived estimates of stressor–response associations for riverine organism groups. *Nature Ecology & Evolution*, 9(12), 2304–2321. <https://doi.org/10.1038/s41559-025-02884-4>
- Lafuente, W., Moreno, J. L., & Carpio, A. J. (2025). Effect of Seasonality and Associated Environmental Drivers on Macroinvertebrate Assemblages in Neotropical Coastal Headwater Streams. *River Research and Applications*, 41(5), 1143–1157. <https://doi.org/10.1002/RRA.4429>
- Lai, Y., Yin, N., Lu, W., Liu, L., Zhong, R., Yang, F., & Li, J. (2026). Development of an ecological security pattern framework by integrating multiple conservation-related data sources and models in infrastructure disturbance areas. *Journal of Environmental Management*, 397, 128153. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2025.128153>
- Liñero, I. A., Balarezzo, V. H., Eraso, H., Pacheco, F., Ramos, C. E., Muzo, R. G., & Calva, C. J. (2016). Water quality of an Ecuadorian Andean stream with the use of aquatic macroinvertebrates. *Cuadernos de Investigación UNED*, 8(1), 68–75. <https://doi.org/10.22458/URJ.V8I1.1225>
- Matovelle, C., Quinteros, M., Quinteros, K. S., & Jaramillo, K. (2024). Water quality assessment methods of the highland Andean rivers: A scoping systematic review. *Heliyon*, 10(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30552>
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua*. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>
- Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (2024). *Informe detallado*. https://www.ambienteenergia.gob.ec/ambiente/wp-content/uploads/downloads/2025/07/Informe_RDC-2024_Preliminar-UDAF.pdf
- Mir, Z. A., Bakhtiyar, Y., Parveen, M., Khan, N. A., Akhtar, M., & Nissar, S. (2025). Macroinvertebrate structure, diversity, and water quality indicators in Jhelum tributaries of Kashmir Himalaya. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(8), 915-. <https://doi.org/10.1007/S10661-025-14346-2>
- Moreno, C. M. S., & Sagñay, S. I. L. (2024). Calidad el agua en Airón, Chimborazo, Ecuador: análisis físico-químico y microbiológico para consumo humano, evaluación de impacto en salud pública. *La Ciencia al Servicio de La Salud y Nutrición (CSSN)*, 15(1), 15. <https://doi.org/10.47187/CSSN.VOL15.ISS1.268>
- MSP. (2016). *Estrategia Nacional de Calidad del Agua*. https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/05/Estrategia-Nacional-de-Calidad-del-Agua_2016-2030.pdf
- Mudenda, F., Mwangi, H., Gathenya, J. M., Maina, C. W., & Tena, T. M. (2025). Structural and nature-based solutions for resilient watershed systems: a systematic review of watershed modelling approaches and global datasets. *Journal of Water and Climate Change*, 16(6), 2084–2110. <https://doi.org/10.2166/WCC.2025.814>

- NTE INEN 2176:2013, Pub. L. No. 2176, Instituto Nacional de Normalización (2013). <https://www.insistec.ec/images/insistec/02-cliente/07-descargas/NTE%20INEN%202176%20-%20AGUA.%20CALIDAD%20DEL%20AGUA.%20MUESTREO.%20T%C3%89CNICAS%20DE%20MUESTREO.pdf>
- OMS. (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano. In *Organización Mundial de la Salud* (Vol. 4). Organización Mundial de la Salud. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?sequence=1> (accessed 12 September 2024)
- Ortiz, C. G., Almeida, C., Dos Santos, D. A., & Jofré, M. B. (2025). Macroinvertebrados de ríos serranos semiáridos de San Luis (Argentina): base para la evaluación ecológica. *Acta Zoológica Lilloana*, 69(2), 837–859. <https://doi.org/10.30550/J.AZL/2261>
- Pantiga, A. T., Rosas, J. L. A., Guzmán, M. M., Solís, J. A. N., Bedolla, R. S., & Anzaldúa, K. R. S. (2025). Biological Evaluation of Water Quality with the BMWP Index in a Section of the Tlapaneco River Affected by Two Rural Communities in the Guerrero Mountains, Mexico. *Environments 2025*, Vol. 12, 12(3). <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS12030091>
- Praeg, N., Steinwandter, M., Urbach, D., Snethlage, M. A., Alves, R. P., Apple, M. E., Bilovitz, P., Britton, A. J., Bruni, E. P., Chen, T. W., Dumack, K., Fernandez-Mendoza, F., Freppaz, M., Frey, B., Fromin, N., Geisen, S., Grube, M., Guariento, E., Guisan, A., ... Seeber, J. (2025). Biodiversity in mountain soils above the treeline. *Biological Reviews*, 100(5), 1877–1949. <https://doi.org/10.1111/BRV.70028;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Procel, K. M. V., Vasconez, J. P. Z., Luna, A. D. F., & Paredes, J. G. M. (2025). Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de calidad del agua de 4 islas del archipiélago de Jambelí. *Revista Científica y Tecnológica UPSE (RCTU)*, 12(1), 10–22. <https://doi.org/10.26423/RCTU.V12I1.867>
- Rengifo, C. G., & González, A. E. (2020). Assessment of water quality in the Alambrado River using benthic macroinvertebrates as bioindicators in Laguna de la Mica Reservoir. *Bionatura*, 5(4), 1380–1386. <https://doi.org/10.21931/RB/2020.05.04.17>
- Ríos, B. T., Acosta, R., & Prat, N. (2014a). The Andean biotic index (ABI): Revised tolerance to pollution values for macroinvertebrate families and index performance evaluation. *Revista de Biología Tropical*, 62, 249–273. <https://doi.org/10.15517/RBT.V62I0.15791>
- Ríos, B. T., Acosta, R., & Prat, N. (2014b). The Andean Biotic Index (ABI): revised tolerance to pollution values for macroinvertebrate families and index performance evaluation. *Revista de Biología Tropical*, 62 Suppl 2, 249–273. <https://doi.org/10.15517/RBT.V62I0.15791>
- Ríos, B. T., Encalada, A. C., & Prat Fornells, N. (2011). Macroinvertebrate assemblages of an Andean high-altitude tropical stream: The importance of season and flow. *International Review of Hydrobiology*, 96(6), 667–685. <https://doi.org/10.1002/IROH.201111342>
- Rosenberg, D. M. ., & Resh, V. H. . (1993). *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. Kluwer Academic Publishers.
- Sinchiguano, A. J. C., Córdova, A. M., & Párraga, E. J. C. (2023). Calidad de agua en río Cutuchi mediante análisis fisicoquímicos y microbiológicos, Latacunga, Ecuador. *Revista*

ESPAMCIENCIA, 14(2), 115–123.
https://doi.org/10.51260/REVISTA_ESPAMCIENCIA.V14I2.413

- Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100(1–3), 179–196. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3)
- Sotomayor, G., Hampel, H., Vázquez, R. F., Forio, M. A. E., & Goethals, P. L. M. (2025). Functional diversity of benthic macroinvertebrates and fluvial habitat quality: Key biological trait categories. *Ecological Informatics*, 90, 103235. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2025.103235>
- Sridhar, M. K. C., Ana, G. R. E. E., Laniyan, T. A., Sridhar, M. K. C., Ana, G. R. E. E., & Laniyan, T. A. (2019). Impact of Sand Mining and Sea Reclamation on the Environment and Socioeconomic Activities of Ikate and Ilubirin Coastal Low Income Communities in Lagos Metropolis, Southwestern Nigeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7(2), 190–205. <https://doi.org/10.4236/GEP.2019.72013>
- Terán, V. F. G., Buitrago, A. M. R., Echeverri, A. F. S., Figueroa, A. C., & Benavides, J. A. B. (2025). Integrating AHP and GIS for Sustainable Surface Water Planning: Identifying Vulnerability to Agricultural Diffuse Pollution in the Guachal River Watershed. *Sustainability (Switzerland)*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/SU17094130/S1>
- TULSMA. (2017). *Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente*. Ejecutivo. <https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/DECRETO%20EJECUTIVO%203516%20-%20TULSMA.pdf>
- Vargas, T. T., Suárez, S. C., Morales, V. L., Vargas, Y. T., Tinoco, L. J., Viera, W. A., & Vásquez, W. C. (2023). Ecological River Water Quality Based on Macroinvertebrates Present in the Ecuadorian Amazon. *Sustainability (Switzerland)*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/SU15075790/S1>
- Vega, P., Górski, K., & Habit, E. (2025). River Resilience: Assessment Using Empirical Fish Assemblage Traits. *Water (Switzerland)*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/W17121749/S1>
- Villamarín, C., Rieradevall, M., Paul, M. J., Barbour, M. T., & Prat, N. (2013). A tool to assess the ecological condition of tropical high Andean streams in Ecuador and Peru: The IMEERA index. *Ecological Indicators*, 29, 79–92. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2012.12.006>
- Yaulilahua, R. H., Araujo, L. D. R., Estrada, C. P. A., Basualdo, P. E. G., Enriquez, A. O., Porras, S. S., & Palacios, M. L. M. (2025). Using Water Footprint Indicators to Support Biodiversity Conservation and Rights-Based Water Governance in the Andean High Andes: A Scoping Review and Framework. *Conservation*, 5(4), 71. <https://doi.org/10.3390/CONSERVATION5040071>