



Esta obra está bajo una
[Licencia Creative Commons
Atribución - 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
Vea una copia de esta licencia en
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>





FACULTAD DE ECOLOGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

Tesis

Predicción de la dinámica de uso del río Negro a través del modelamiento de la calidad del agua al 2030

Para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario

Autor:

Jairo Elvin Fernández Dávila
<https://orcid.org/0000-0002-2659-5589>

Asesor:

Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza
<https://orcid.org/0000-0003-1396-9745>

Moyobamba, Perú

2025



FACULTAD DE ECOLOGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

Tesis

Predicción de la dinámica de uso del río Negro a través del modelamiento de la calidad del agua al 2030

Para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario

Autor:

Jairo Elvin Fernández Dávila

Sustentado y aprobado el 23 de abril del 2025, ante el honorable jurado:

Presidente de Jurado
Ing. M.Sc. Santiago Alberto Casas Luna

Secretario de Jurado
Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala Díaz

Miembro de Jurado
Blgo. M.Sc. Luis Eduardo Rodríguez Pérez

Asesor
Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza

Moyobamba, Perú

2025



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DEL INFORME FINAL DE TESIS CONDUCENTES
A TÍTULO PROFESIONAL N° 008-2025-UNSM/EPIS/UI**

Jurado reconocido con Resolución N° 264-2023-UNSM/CF/FE, Moyobamba 27 de junio de 2023 y modificado con Resolución N° 340-2024-UNSM/CF/FE, Moyobamba 28 de junio de 2024.

**FACULTAD DE ECOLOGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA
PROGRAMA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA SANITARIA**

A las 15:00 horas, del día miércoles 23 de abril de 2025, se dio inicio al acto público de sustentación del informe final de tesis **“Predicción de la dinámica de uso del río Negro a través del modelamiento de la calidad del agua al 2030”**, para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario, presentado por **Jairo Elvin Fernández Dávila**, con la asesoría del **Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza**.

Instalada la Mesa Directiva conformada por el **Ing. M.Sc. Santiago Alberto Casas Luna** (Presidente del jurado), **Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala Díaz** (Secretario), **Blgo. M.Sc. Luis Eduardo Rodríguez Pérez** (Vocal) y acompañado por el **Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza** (Asesor), el presidente del jurado dirige brevemente unas palabras y a continuación el secretario dio lectura a la Resolución N° 351-2024-UNSM/CF/FE, de fecha 12 de julio de 2024.

Seguidamente el autor expuso el informe final de tesis y el jurado realizó las preguntas pertinentes, respondidas por el sustentante y evaluado por el jurado con la venia del asesor.

Una vez terminada la ronda de preguntas el jurado procedió a deliberar para determinar la calificación final, para lo cual dispuso un receso de quince (15) minutos, con participación del asesor con voz, pero sin voto; sin la presencia del sustentante y otros participantes del acto público.

Luego de aplicar los criterios de calificación con estricta observancia del principio de objetividad y de acuerdo con los puntajes en escala vigesimal (de 0 a 20), según el Anexo 4.2 del RG-CTI, la nota de sustentación otorgada resultante del promedio aritmético de los calificativos emitidos por cada uno de los miembros del jurado fue **Quince (15)**, tal como se deja constar en la siguiente descripción.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE ECOLOGÍA
Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria



De acuerdo con el Artículo 40° del RG-CTI, la nota obtenida es A P R O B A D O y correspondiente a la calificación de B U E N O. Leído este resultado en presencia de todos los participantes del acto de sustentación, el secretario dio lectura a las observaciones subsanables al informe final que el autor deberá corregir y alcanzar al jurado en un plazo máximo de treinta (30) días calendarios.

Se deja constancia que la presente acta se inscribe en el Libro de Sustentaciones N° 002 del Programa de Estudios de Ingeniería Sanitaria de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ecología de la UNSM.

Firman los integrantes de la Mesa Directiva y el autor del informe final tesis, en señal de conformidad, dando por concluido el acto a las 4:40 pm horas, el mismo día 23 de abril de 2025.

Ing. M.Sc. Santiago Alberto Casas Luna
Presidente de Jurado

Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala Diaz
Secretario de Jurado

Blgo. M.Sc. Luis Eduardo Rodríguez Pérez
Vocal del Jurado

Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza
Asesor

Jairo Elvín Fernández Dávila
Autor

Declaratoria de autenticidad

Jairo Elvin Fernández Dávila, con DNI N° 74529899, egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín, autor de la tesis titulada: **Predicción de la dinámica de uso del río Negro a través del modelamiento de la calidad del agua al 2030.**

Hago una declaración jurada de que:

1. La tesis que se ha presentado es de mi propia autoría.
2. La redacción se llevó a cabo de acuerdo con las normas APA vigentes, cumpliendo con las referencias y citas de las fuentes bibliográficas consultadas.
3. No se ha plagiado ninguna información que la tesis contenga;
4. Los datos mostrados en los resultados son auténticos, no han sido modificados ni duplicados, así que la información de esta investigación debe ser vista como un contribución a la realidad investigada.

Por lo expuesto, me comprometo a asumir las repercusiones que surjan de mis acciones, acatando las leyes de nuestro país y los reglamentos vigentes en la Universidad Nacional de San Martín.

Moyobamba, 23 de abril del 2025.



Jairo Elvin Fernández Dávila

DNI N° 74529899

Ficha de identificación

<p>Título: Predicción de la dinámica de uso del río Negro a través del modelamiento de la calidad del agua al 2030</p>	<p>Área de investigación: Ciencia Tecnología Ambiental Línea de investigación: Saneamiento Ambiental Sublínea de investigación: Tratamiento de aguas Grupo de investigación: Tecnologías de Tratamiento del Agua. Resolución N° 251-2022-UNSM/CFT/FE Tipo de investigación: Básica <input checked="" type="checkbox"/>, Aplicada <input type="checkbox"/>, Desarrollo experimental <input type="checkbox"/></p>
<p>Autor: Jairo Elvin Fernández Dávila</p>	<p>Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria https://orcid.org/0000-0002-2659-5589</p>
<p>Asesor: Dr. Ing. Yrwin Francisco Azabache Liza</p>	<p>Dependencia local de soporte: Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria Unidad o Laboratorio Ingeniería Sanitaria https://orcid.org/0000-0003-1396-9745</p>

Dedicatoria

A Dios por brindarme protección, sabiduría y por guiarme para lograr mis objetivos trazados en esta etapa de mi vida.

A mis padres Hermes Fernandez Delgado por el apoyo incondicional y por enseñarme a no rendirme y a dar lo mejor de mí para alcanzar cada meta propuesta y a mi madre Aurora Dávila Torres por darme el ánimo de ser siempre el mejor y por estar presente apoyándome en todo el trayecto de mi carrera universitaria.

A Benita Isabel Torres Dávila por brindarme sus consejos y motivación para seguir superándome y afrontar nuevos retos.

A mis hermanos Carlos, Jhonny y James por brindarme su apoyo es todo este trayecto de la universidad y a mis hermanas Jhakelin Marlith y Deli Vanesa por ser motivo de seguir siendo cada vez mejor.

Jairo Elvin

Agradecimientos

Estoy enormemente agradecido con Dios, por concederme la fuerza y el discernimiento indispensables para llevar a cabo de manera exitosa este trascendental capítulo en mi existencia.

A la Universidad Nacional de San Martín, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente y crecer como persona. A mis docentes y especialmente a mi asesor de tesis Ing. Yrwin Francisco Azabache Liza, por su guía, paciencia y conocimientos compartidos a lo largo de este proceso.

A mis padres y mis hermanos por el acompañamiento y por los muy buenos consejos brindados en esta etapa de mi vida universitaria.

A Jadira por apoyarme y darme ánimos para seguir logrando nuevos objetivos.

Agradezco a la Universidad Nacional de San Martín por el apoyo de financiamiento otorgado, por el concurso de tesis de pregrado, periodo 2024, según Resolución N° 1402-2024-UNSM/CU-R

Índice general

Ficha de identificación.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimientos	8
Índice general.....	9
Índice de tablas	11
Índice de figuras.....	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN	15
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Antecedentes de la investigación.....	17
2.2. Fundamentos teóricos.....	19
2.2.1. Calidad del agua.....	19
2.2.2. Normatividad de los recursos hídricos en el Perú.....	21
2.2.3. Agentes contaminantes en aguas superficiales	21
2.2.4. Índice de calidad de agua (ICA – PE)	23
2.2.5. Ríos	25
2.2.6. Dinámica de uso del río	26
2.2.7. Modelo matemático de la calidad del agua.....	27
2.2.8. Desarrollo de los Modelos de Calidad	27
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1. Ámbito y condiciones de la investigación	30
3.1.1. Contexto de la investigación	30
3.1.2. Periodo de ejecución	30
3.1.3. Autorizaciones y permisos.....	30
3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad	30
3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales	31

	10
3.2. Sistema de variables.....	31
3.2.1. Variables principales.....	31
3.3. Procedimientos de la investigación	31
3.3.1. Objetivo específico 1	31
3.3.2. Objetivo específico 2	34
3.3.3. Objetivo específico 3	34
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1. Resultado específico 1.....	36
4.2. Resultado específico 2.....	54
4.3. Resultado específico 3.....	56
4.4. Discusión de resultados	61
CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXOS	69
Anexo N° 01. Cálculos detallados del ICA-PE por año	69
Anexo N° 02. Cuestionario a la población	73
Anexo N° 03. Análisis estadístico.....	75
Anexo N° 04. Panel fotográfico	77

Índice de tablas

Tabla 1 Agentes contaminantes de aguas superficiales.....	22
Tabla 2 Parámetros considerados en la Categoría 1-A2 Poblacional y Recreacional: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	24
Tabla 3 Interpretación de la calificación ICA-PE.....	33
Tabla 4 Ubicación y descripción de los puntos de monitoreo en el río Negro.....	36
Tabla 5 Parámetros de calidad del agua en el río Negro - Año 2017	37
Tabla 6 Parámetros de calidad del agua en el río Negro - Año 2018	38
Tabla 7 Parámetros de calidad del agua en el río Negro - Año 2019	41
Tabla 8 Parámetros de calidad del agua en el río Negro - Año 2020	44
Tabla 9 Parámetros de calidad del agua en el río Negro - Año 2021	46
Tabla 10 Resultados de monitoreo para los 8 parámetros del ICA-PE en el punto RNegr1	50
Tabla 11 Resumen cuantitativo de datos evaluados para el cálculo del ICA-PE.....	50
Tabla 12 Cálculo detallado de excedentes RNegr1.....	51
Tabla 13 Resultados de monitoreo para los 8 parámetros del ICA-PE en el punto RNegr2.....	52
Tabla 14 Resumen cuantitativo de datos evaluados para el cálculo del ICA-PE (RNegr2)	52
Tabla 15 Cálculo detallado de excedentes RNegr2.....	53
Tabla 16 Frecuencia de uso del río Negro	54
Tabla 17 Actividades realizadas por los usuarios.....	55
Tabla 18 Aspectos para determinar la calidad del agua.....	55
Tabla 19 Cambios notados por los usuarios en el transcurso de los años	56
Tabla 20 Medidas propuestas para la Gestión del Recurso	56
Tabla 21 Resultados del cálculo del ICA-PE por año para el punto RNegr1	57
Tabla 22 Resultados del cálculo del ICA-PE por año para el punto RNegr2	57
Tabla 23 Resultados del cálculo del ICA-PE hasta el año 2030 – Rnegr1	59
Tabla 24 Resultados del cálculo del ICA-PE hasta el año 2030 – Rnegr2	60

Índice de figuras

Figura 1 Ubicación del proyecto	30
Figura 2 Variación del Fósforo Total en el río Negro.	48
Figura 3 Variación del plomo en el río Negro.	49
Figura 4 Tendencia y proyección del ICA – PE (2017 - 2030).....	60

RESUMEN

Predicción de la dinámica de uso del río Negro a través del modelamiento de la calidad del agua al 2030

El presente estudio tiene como objetivo principal proponer un modelo de simulación que permita predecir la calidad del agua del río Negro, un recurso hídrico vital para diversas actividades humanas en la región. La investigación se desarrolló en dos puntos de monitoreo seleccionados: RNegr1 y RNegr2, ubicados en la cuenca del río Negro, en la región amazónica del Perú. El período de evaluación abarcó desde el año 2017 hasta 2021, considerando los informes técnicos emitidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) para realizar el análisis de la calidad del agua en base a parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, tales como fósforo total, oxígeno disuelto y coliformes termotolerantes. El diseño de la investigación fue de tipo descriptivo – correlacional de tipo no experimental, utilizando datos históricos para desarrollar un modelo predictivo de la calidad del agua hasta el año 2030. Se aplicó un análisis estadístico de regresión lineal para proyectar las tendencias de los parámetros evaluados. Los resultados mostraron que RNegr1 mantuvo una calidad de agua dentro de los estándares establecidos para consumo y otras actividades, con un Índice de Calidad de Agua (ICA-PE) calificado como “Bueno”. Por otro lado, RNegr2 presentó un deterioro en su calidad de agua, especialmente en fósforo y coliformes, lo que proyecta una disminución en la calidad hacia 2030 si no se implementan medidas correctivas. El modelo predictivo reveló una ligera mejora en la calidad del agua de RNegr1, mientras que en RNegr2, la proyección mostró un deterioro progresivo. Las conclusiones destacan que el modelado de la calidad del agua es una herramienta útil para prever cambios futuros en los recursos hídricos y para desarrollar estrategias de manejo adecuadas, especialmente en áreas con alta presión contaminante. Se recomienda implementar estrategias de conservación y un monitoreo constante de los parámetros críticos, así como tomar medidas correctivas en áreas de alta contaminación para evitar la degradación del recurso hídrico.

Palabras clave: *calidad del agua, modelamiento predictivo, fósforo total, coliformes termotolerantes, gestión hídrica.*

ABSTRACT

Predicting the use dynamics of the Rio Negro through water quality modeling to 2030.

The main objective of this study is to propose a simulation model to predict the water quality of the Rio Negro, a vital water resource for various human activities in the region. The research was developed in two selected monitoring points: RNegr1 and RNegr2, located in the Rio Negro basin, in the Amazon region of Peru. The evaluation period covered from 2017 to 2021, considering the technical reports issued by the Autoridad Nacional del Agua (National Water Authority) (ANA) to perform water quality analysis based on physicochemical and microbiological parameters, such as total phosphorus, dissolved oxygen and thermotolerant coliforms. The research design was descriptive-correlational and non-experimental, using historical data to develop a predictive model of water quality up to the year 2030. A linear regression statistical analysis was applied to project the trends of the evaluated parameters. The results showed that RNegr1 maintained water quality within the established standards for consumption and other activities, with a Water Quality Index (ICA-PE) rated as "Good". On the other hand, RNegr2 showed a deterioration in its water quality, especially in phosphorus and coliforms, which projects a decrease in quality by 2030 if corrective measures are not implemented. The predictive model revealed a slight improvement in water quality in RNegr1, while in RNegr2, the projection showed a progressive deterioration. The conclusions highlight that water quality modeling is a useful tool for forecasting future changes in water resources and for developing appropriate management strategies, especially in areas with high pollution pressure. It is recommended to implement conservation strategies and constant monitoring of critical parameters, as well as to take corrective measures in areas of high pollution to avoid degradation of the water resource.

Keywords: water quality, predictive modeling, total phosphorus, thermotolerant coliforms, water management.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

El agua es un medio esencial para el incremento sostenible, impulsando el crecimiento socioeconómico, facilita el rendimiento de energía y sustento alimenticio, preserva el medio ambiente y garantiza la perduración de vida. Además, desempeña un papel clave en la adecuación del cambio meteorológico, actuando como un nexo vital entre la comunidad y el entorno natural (UNESCO, 2019; Alexandratos et al., 2019). Esta relación intrínseca entre el agua y prácticamente todos los aspectos del desarrollo humano y la conservación ambiental subraya la importancia crítica de su gestión adecuada y sostenible (Ross y Baldwin, 2022; Kalogiannidis et al., 2023).

El consumo de agua crece un 1% anualmente desde 1980, especialmente en países desarrollados y en desarrollo. Del total de extracciones, la agricultura consume el 69%, la industria el 19% y el uso doméstico el 12% (UNESCO, 2019). Esta creciente demanda, junto con el cambio climático y el deterioro ambiental, amenaza la sostenibilidad del recurso hídrico (Wang et al., 2014; Mahmoodi et al., 2021; Dawadi y Ahmad, 2013).

En Perú, donde la población asciende a 27,1 millones de personas, el 72,3 % reside en zonas urbanas, en cambio el 27,7% habita en medios rústicos, donde la disponibilidad del agua potable es más restringida. El servicio urbano es proporcionado por 50 Empresas Prestadoras de Servicios (EPS) que cubren al 81% de la población urbana, de las cuales 33 pertenecen a Anepssa Perú. No obstante, según SUNASS (2004), estos servicios presentan deficiencias en cobertura, sostenibilidad y calidad del agua. Esta situación requiere mejoras urgentes en la distribución y tratamiento del agua en todo el país (Moudi et al., 2023).

La modelización de la condición sobre fuentes de agua externas ha ganado relevancia debido a su capacidad al predecir el deterioro ambiental e identificar medidas para la restauración y preservación del recurso hídrico (Sánchez y Gómez, 2021; Jones et al., 2023; Jin et al., 2019). Estos modelos permiten simular el movimiento de contaminantes en el agua, reduciendo costos en investigaciones de campo (Wang et al., 2013). Su implementación en Perú podría mejorar significativamente la administración y planificación del agua.

En general, en nuestro país se carece de información técnica adecuada para realizar una administración del recurso hídrico eficiente que permita buscar la maximización del bienestar social y económico de forma justa y equitativa, garantizar su uso sostenible, y proteger y restaurar su calidad tanto para el consumo humano como a nivel de ecosistemas (Salmoral et al., 2020). Estos son factores clave que podrían prevenir que la escasez de agua se transforme en un impedimento para un desarrollo social adecuado, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas (Castro et al., 2018). La carencia de información precisa y actualizada sobre la calidad y disponibilidad del agua en diversas regiones del país dificulta el proceso de políticas eficaces y del manejo de recursos hídricos restringiendo la capacidad de respuesta frente a problemas como la polución, el uso abusivo de acuíferos y los efectos de la variabilidad climática.

Ante la falta de una gestión adecuada de las fuentes hídricas en el Río Negro, la finalidad de esta investigación es proponer un modelo sobre simulación de la condición desde este cuerpo de agua que permitiera predecir su categoría de uso para el año 2030. Este estudio buscó ocupar un vacío significativo en el entendimiento de la dinámica sobre calidad del agua en uno de los ríos significativos del Perú, proporcionando una herramienta que podría ser fundamental para la planificación y gestión sostenible de este recurso vital. Al enfocarse en la predicción de la categoría de uso del río Negro para el año 2030, esta investigación no solo abordó las necesidades actuales de gestión del agua, sino que también anticipó los desafíos futuros, permitiendo a los tomadores de decisiones desarrollar estrategias proactivas para la conservación y uso sostenible de este importante recurso hídrico.

En esta investigación, se planteó el problema: ¿En qué medida el modelamiento sobre la calidad del agua del río Negro permite predecir la dinámica de uso al 2030? Para abordar esta cuestión, se formularon las siguientes hipótesis: Hipótesis nula (H1): El modelamiento acerca de la condición del agua en el río Negro permite predecir la dinámica de su categoría de uso al 2030. Hipótesis alterna (H0): El modelamiento sobre la condición o estado de la condición del agua del río Negro no permite predecir la dinámica de su categoría de uso al 2030. Los objetivos de la investigación se estructuraron en torno a los siguientes puntos: Objetivo general: Proponer el modelamiento de la calidad del agua del río Negro para predecir la dinámica de uso al 2030. Objetivos específicos: Establecer la condición del agua del río Negro según su categoría de uso, mediante el análisis de los informes técnicos de los años 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 emitidos por la entidad "ANA"; identificar las variables de condición del agua del río Negro que influenciaron su dinámica de empleo; y diseñar el modelo predictivo de la condición del agua del río Negro al periodo del 2030.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Córdova (2023) en Perú, en el centro poblado de Marona (San Martín), se llevó a cabo un estudio centrado en la modelización y simulación del cloro residual en agua potable, con el objetivo de establecer la calidad microbiológica del agua distribuida a la población. Se seleccionaron 20 puntos de monitoreo en viviendas, realizando simulaciones mediante el software WaterCAD y contrastándolas con mediciones in situ de cloro libre residual. Los resultados obtenidos mostraron una correspondencia adecuada entre los valores simulados y los reales (0,48 mg/L a 1,14 mg/L), resultando que el líquido vital era apto para el uso humano. Este estudio subraya la relevancia del análisis hidráulico y predictivo en la administración de la pureza del agua potable en el ámbito local.

Mallqui et al., (2022) en Perú, Huancayo, realizaron un análisis de la condición del agua del río Mantaro, evaluando los impactos de las aguas contaminadas en dos periodos: 2004-2008 y 2015-2019. Se analizaron parámetros como metales pesados, pH, temperatura, conducción eléctrica, oxígeno presente en el agua (OD) y coliformes termotolerantes en 300 puntos de monitoreo georreferenciados. Los resultados evidenciaron variaciones significativas en las condensaciones de aleaciones pesadas, mientras que otros parámetros se mantuvieron relativamente constantes. El exhaustivo análisis realizado concluyó que las aguas residuales generan un impacto negativo significativo en la calidad del agua del caudaloso río Mantaro.

Segura (2021) en Uruguay, Montevideo, se crearon modelos predictivos de coliformes fecales (CF) para gestionar la condición del agua en las playas recreativas de Montevideo, Uruguay. Para ello, se analizaron 10 años de datos sobre CF de 21 playas (2009-2019) proporcionados por la Intendencia de Montevideo. Se aplicaron prototipos de inteligencia artificial para pronosticar los niveles excesivos de CF (>2.000). Los resultados mostraron una alta variabilidad en la salinidad, turbidez y los niveles de CF entre las diferentes playas. El modelo más eficaz, un bosque aleatorio estratificado, alcanzó un 86% de precisión en la predicción de excesos, mejorando en un 60% la pauta reciente utilizado para el cierre de playas tras lluvias. Este enfoque, que combina datos de calidad con modelización inteligente, ofrece una herramienta valiosa para la gestión de playas recreativas.

Vargas (2021) en Perú, San Gabán (Puno), se realizó un análisis del indicador de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS) en el río San Gabán, Puno, durante el año 2021, empleando datos de monitoreo acumulados entre los años 2016 y 2020, utilizando información de seguimiento recolectada entre los años 2016 y 2020. Utilizó la metodología de la entidad "ANA", que contempla 14 referencias fisicoquímicos, inorgánicos y microbiológicos. Los resultados revelaron una mejor calidad del agua en RSgab1 en comparación RSgab2, a causa de una menor densidad de coliformes termotolerantes en el punto de partida. Asimismo, se observó una calidad aceptable en RSgab3, situado aguas arriba, mientras que RSgab4, aguas abajo, presentó una calidad "regular" debido a mayores niveles de plomo (Pb) y sólidos totales suspendidos (STS). Se identificaron correlaciones débiles en diversos índices ICARHS de Macusani y Oliachea, una fuerte correlación en balance con Macusani y San Gabán y una correlación moderada con Oliachea y San Gabán, en cuanto a su significancia e interrelación.

Carpíó (2021) en Perú, Puno, estudió referencias fisicoquímicos y microbiológicos del agua en el lago Titicaca, Puno-Perú, utilizando árboles de predicción de aprendizaje automático. Se identificaron los parámetros más relevantes tras medir 17 indicadores durante más de 6 años. La investigación demuestra la eficacia de estos modelos para predecir con precisión los parámetros clave, permitiendo estimaciones futuras basadas en las características locales y mejorando la comprensión del estado trófico y la calidad ambiental del ecosistema.

Colmenares y Cruz (2020) en Colombia, realizaron una evaluación de la calidad del agua durante doce temporadas de supervisión del río Magdalena, concluyendo que la aplicación y comparación de diversas metodologías para el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA) constituye un instrumento valioso para la evaluación de la calidad del agua en diversos emplazamientos y momentos. Se descubrió que, mediante la implementación de esta estrategia, se puede adquirir una perspectiva más integral de la condición del agua en el río Magdalena, lo cual favorece la comprobación de fluctuaciones espaciales y temporales significativas. Postularon que esta metodología podría ser implementada eficazmente en otros cuerpos de agua superficial del país. En síntesis, el estudio subraya la relevancia de cotejar metodologías para la valoración de la calidad del agua en el río Magdalena y propone su potencial aplicación en otros sistemas hídricos superficiales del país.

Aguilar y Obando (2020) estudiaron la preservación y protección del agua como una de las dificultades medioambientales más relevantes en la actualidad, destacando la

excelencia del agua en términos de parámetros fisicoquímicos y biológicos para usos particulares. Se realizó una evaluación del empleo de instrumentos de aprendizaje automático, tales como redes neuronales (RN), sistemas de inferencia neurodifusión (Anfis) y máquinas de vectores de soporte (MVS), como las herramientas más empleadas para la predicción de la calidad del agua. Los resultados mostraron que estas técnicas son efectivas, con un 36% de aplicación de RN, un 24% de MVS y un 16% de Anfis. Además, encontraron que el modelado híbrido mejora los resultados en semejanza con las técnicas tradicionales. También identificaron que la estimación de calidad en cuerpos de agua almacenada sigue siendo limitada, pero relevante para optimizar procesos de gestión.

Córdova y Díaz (2020) en Perú, Moyobamba, en su estudio de la calidad del agua en la quebrada Rumiyacu, se empleó un modelo matemático y se recolectaron muestras en las coordenadas ESTE:281271 NORTE: 9325561. Llevaron a cabo un análisis de correlación entre los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, utilizando el software SPSS para lograr un ajuste más preciso del modelo. El hallazgo reveló que únicamente la demanda química de oxígeno no excedía los estándares del agua establecidos en la categoría 1. Además, identificaron una correlación notable entre los parámetros pH, DQO, plomo, arsénico y nitritos, con la correlación más pronunciada entre el pH y el plomo, registrándose valores de $R=0.728$ y $R^2=0.530$. Para concluir, los modelos empleados en esta investigación facilitan la estimación del comportamiento de los indicadores de DQO, plomo y arsénico en el punto de muestreo, basándose en los indicadores de pH y nitritos.

2.2. Fundamentos teóricos

2.2.1. Calidad del agua

Se refiere a su aptitud para determinados usos. Las variables que definen la condición del agua incluyen condiciones físicas, químicas y biológicas que influyen durante un adecuado aprovechamiento, tanto para los ecosistemas naturales como para el consumo humano (Boyd, 2015).

Estas propiedades se dividen en físicas (temperatura, sedimento, turbidez), químicas (pH, oxígeno, DBO, DQO, nutrientes, metales) y biológicas (coliformes, microorganismos, sólidos suspendidos), siendo cruciales para evaluar la condición del recurso hídrico y su idoneidad para diversos fines (Deeksha, 2011).

La condición del agua superficial está influenciada por procesos naturales y factores meteorológicos, aunque la principal causa de su degradación proviene de actividades

humanas, debido al abuso excesivo de pesticidas y fertilizantes, alteraciones en el uso del suelo y la descarga de aguas residuales sin tratamiento (Vrebos et al., 2017).

2.2.1.1. Control de la calidad del agua potable

En Perú, la condición del recurso hídrico destinada para el consumo humano está comprometida por la contaminación en las fuentes naturales, que presentan altas concentraciones de metales tanto de origen natural como humano. Esto representa un desafío técnico y económico para las empresas de saneamiento, que deben asegurar un suministro de agua seguro. Es fundamental priorizar el control constante de la calidad del agua, desde su fuente hasta su consumo, para salvaguardar la salud de la población y fomentar el desarrollo sostenible (Villena, 2018).

2.2.1.2. Parámetros físicos-químicos

- Potencial de hidrógeno (pH). Calcula la acidez o alcalinidad de una solución según el porcentaje de iones hidronio. Se expresa en una escala del 0 al 14, donde valores inferiores a 7 son ácidos y superiores son alcalinos (Equipos y Laboratorio de Colombia S.A.S., 2022)
- Temperatura. La temperatura indica la energía cinética interna de un cuerpo, objeto o medio ambiente, determinando la velocidad de movimiento de partículas. A mayor velocidad, mayor temperatura (Rhoton, S., 2023).
- Turbidez. Es una propiedad óptica del agua causada por la dispersión de la luz debido a sólidos suspendidos. A mayor turbidez, mayor dispersión de la luz, lo que puede indicar contaminación (Hannapro S.A., 2019).
- Conductividad eléctrica. La disposición de un material a fin conducir corriente eléctrica, influenciada por su estructura atómica, molecular y temperatura (University of Maryland Newsdesk, 2013).
- Sólidos totales. Es el residuo que permanece después de evaporar y secar una muestra de agua, abarcando tanto los sólidos disueltos totales como los suspendidos totales (Norma "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 2005).
- Sulfato. Sales o ésteres derivados del ácido sulfúrico, utilizados en diversas industrias (Perry y Green, 2008).
- Nitratos. Compuestos formados por la oxidación de nitritos, usados como fertilizantes y transportados por el agua (Perry y Green, 2008).

- Cloruros Compuesto común en aguas naturales, solubles y relacionados con contaminación de origen humano (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, 2022).
- Plomo. Metal pesado de alta densidad y flexibilidad, usado en diversas aplicaciones industriales (Burriel et al., 2008).
- Aluminio Elemento metálico común en la corteza terrestre, representado por 'Al' en la tabla periódica (Ondarse, 2021).
- Arsénico (As) Presente en el agua por disolución de minerales, siendo un contaminante común en aguas bien oxigenadas (OMS, 2022).

2.2.2. Normatividad de los recursos hídricos en el Perú

Ley N° 29338, conocida como La Ley de Recursos Hídricos, aprobada en 2009, estipula directrices para la administración y utilización de los recursos hídricos, abarcando agua superficial, subterránea, continental, marítima y atmosférica, cuando sea pertinente.

Ley N° 28611, también llamada la Ley General del Ambiente, garantiza el derecho de cada individuo a un entorno saludable y armonioso, el acceso oportuno para el incremento completo de la vida y la responsabilidad de participar en la gestión ambiental efectiva y la preservación del medio ambiente.

Resolución Jefatural N° 058-2018-ANA, categoriza las masas de agua superficiales en el ámbito continental.

Resolución Jefatural N°010-2016-ANA, establece el Protocolo nacional para la evaluación de la calidad de las fuentes de agua superficial.

Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, aprueba normas de calidad ambiental (NCA) para el agua y establece normas adicionales.

Resolución Jefatural N° 068-2018-ANA, aprueba el uso de la Metodología ICA-PE para valorar la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales terrestres.

2.2.3. Agentes contaminantes en aguas superficiales

La Resolución Jefe RJ N° 136-2018 de la Autoridad Nacional del Agua cataloga los contaminantes como sustancias químicas o compuestos nocivos para los seres vivos, que superan las normas ecológicas. Incluye partículas suspendidas, compuestos orgánicos, enfermedades, nutrientes, metales pesados, sólidos inorgánicos, energía radiactiva y calor.

Tabla 1
Agentes contaminantes de aguas superficiales

Agentes Contaminantes	Descripción
Sólidos en suspensión	Pueden propiciar el desarrollo de depósitos de fango y la creación de condiciones anaeróbicas, lo cual podría afectar negativamente la calidad del agua en el ecosistema.
Materia orgánica biodegradable	Constituida primordialmente por proteínas, carbohidratos y lípidos de origen animal. En la mayoría de los casos, se cuantifica en base a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO). Este fenómeno puede resultar en el agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y en la aparición de condiciones de sequía.
Patógenos (bacterias, virus, protozoarios, gusanos)	Transmiten enfermedades altamente contagiosas y peligrosas, como el cólera, tifus, disentería, gastroenteritis, hepatitis, poliomielitis y esquistosomiasis, entre otras. Estos agentes patógenos pueden provocar elevadas tasas de morbilidad y mortalidad si no se implementan las medidas adecuadas de higiene, limpieza y desinfección en el entorno. Es fundamental mantener una rigurosa higiene para prevenir la propagación de enfermedades y proteger la salud de las personas.
Nutrientes	El nitrógeno, el fósforo y el carbono son elementos fundamentales para el desarrollo y la proliferación de las algas en los ecosistemas acuáticos. Estos nutrientes desempeñan un papel crucial en el ciclo de vida de las algas, contribuyendo a su crecimiento y reproducción de manera significativa. Cuando estos nutrientes son liberados al entorno acuático, pueden promover el desarrollo excesivo de algas, lo que resulta en la proliferación de floraciones algales.
Compuestos xenobióticos	Las categorías primordiales de xenobióticos de relevancia médica incluyen fármacos, carcinógenos químicos y diversos compuestos que han penetrado en nuestro entorno de forma u otra, como los bifenilos policlorinados (PCB) y ciertos insecticidas. Se han producido más de 200,000 compuestos químicos ambientales por la intervención humana. No obstante, debido a su estructura atípica, ciertos xenobióticos mantienen una persistencia prolongada en la biosfera sin sufrir alteraciones. Por esta razón, se postula que estos son recalcitrantes a la biodegradación, llegando a ser contaminantes potenciales
Productos químicos y desechos industriales	Disposición y almacenamiento de una amplia variedad de productos químicos y sustancias, tales como aceites, ácidos, sodas cáusticas, abonos y otros elementos, como parte de las operaciones industriales o en caso de posibles derrames accidentales.
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos, como el calcio, el sodio y los sulfatos, se añaden al suministro de agua como resultado del proceso de tratamiento.
Sólidos sedimentables	Los elementos incluidos incluyen arena, arcillas, tierra, cenizas, materia vegetal agrícola, grasas, brea, papel, hule, plásticos, madera y metal. Las partículas del suelo o sólidos de residuos se acumulan en las corrientes fluviales, lo que resulta en una degradación de la biota presente. En caso de que los sedimentos contengan sustancias nocivas, estas pueden ser difundidas a otros organismos a través de la cadena trófica, provocando la muerte de los organismos acuáticos. Otras partículas flotan en proximidad a la superficie, enturbiando el agua y dificultando la penetración de la luz, lo que consecuentemente obstaculiza el proceso de fotosíntesis.

Materia orgánica refractaria	Tiene una tendencia marcada a resistirse a los enfoques terapéuticos convencionales. Algunos ejemplos comunes de compuestos químicos que pueden contaminar el agua son los agentes tensioactivos, los fenoles, los pesticidas agrícolas y otros productos químicos industriales. Estos elementos pueden tener un impacto negativo en la calidad del agua y en el medio ambiente en general. Es importante tomar medidas para prevenir la contaminación y proteger nuestros recursos hídricos.
Metales pesados	Los metales pesados son habitualmente incorporados en el agua residual durante determinadas actividades productivas, comerciales e industriales, y su eliminación puede ser indispensable si se aspira a la reutilización del agua residual.
Hidrocarburos y derivados	Generalmente debido a derrames, el indicador de medición será el TPH (TPH).
Energía radiactiva	Efectúan la extinción de especies de flora y fauna, generan complicaciones en la salud humana, inducen alteraciones genéticas y provocan cáncer.
Energía térmica	En numerosos casos, los procesos industriales generan aguas a temperaturas elevadas. Al ingresar en canales, ríos, lagos o mares, generan una serie de efectos químicos, físicos y biológicos diversos. Uno de los problemas más severos es la descomposición del agua, que resulta en el agotamiento del oxígeno que esta alberga. La elevación significativa de la temperatura acuática incide también en los ciclos reproductivos, la digestión y la respiración de los organismos que habitan las aguas.

Fuente: (RJ N° 136-2018-ANA)

2.2.4. Índice de calidad de agua (ICA – PE)

Los Índices de Calidad Ambiental (ICA) representan un instrumento esencial en la administración de la calidad del agua, facilitando una comunicación eficaz acerca de la calidad del recurso hídrico a las autoridades y al público general. Promueven la detección y contraste de las propiedades de calidad del agua, evaluando su comportamiento a lo largo del tiempo y el espacio con una puntuación que oscila entre 0 y 100, donde 0 denota calidad inferior y 100 de calidad excepcional (ANA, 2018).

Para el cálculo del ICA, se necesita de: - Datos requeridos (antecedentes, datos de monitoreo). 1. La segmentación de los cuerpos de agua, es decir, su clasificación conforme a la normativa vigente. 2. Los estándares de calidad ambiental estipulados para el agua, es decir, los límites permitidos por la legislación peruana.

2.2.4.1. Parámetros a evaluar en el ICA-PE

Teniendo en cuenta la información proporcionada por el ANA, procedente de monitoreo y controles de calidad realizados por la entidad, los cuerpos de agua que pueden ser potabilizada deben tener en cuenta lo indicado en la siguiente tabla:

Tabla 2

Parámetros considerados en la Categoría 1-A2 Poblacional y Recreacional: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional

N°	Parámetro	Unidad
1	Oxígeno disuelto (valor mínimo)	mg/L
2	Demanda Bioquímica de Oxígeno (valor mínimo)	mg/L
3	Arsénico	mg/L
4	Cadmio	mg/L
5	Cobre	mg/L
6	Cromo total	mg/L
7	Hierro	mg/L
8	Manganeso	mg/L
9	Plomo	mg/L
10	Mercurio	mg/L
11	Zinc	mg/L
12	pH	Unid. De pH
13	Coliformes termotolerantes (44.5°C)	NMP/100 ml

Fuente: (ANA, 2018)

2.2.4.2. **Estándar de Calidad Ambiental para agua de acuerdo a su uso – ECAs**

El Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM da luz verde a los criterios establecidos para evaluar la calidad ambiental del agua mediante los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y plantea reglas adicionales al respecto (p.31).

Categoría 1: Poblacional y recreacional.

La Subcategoría A es aplicable a los cuerpos de agua superficial que tienen como objetivo producir agua para el consumo humano. Se divide en tres subdivisiones:

A1: Cuerpos de agua que pueden ser potabilizados mediante desinfección.

A2: Incluye aquellos que pueden ser tratados de manera convencional para su potabilización.

A3: Cuerpos de agua que requieren tratamiento avanzado para ser aptos para el consumo humano.

La Subcategoría B se refiere a cuerpos de agua superficiales destinados a actividades recreativas, divididas en:

B1: Contacto primario con el agua, como nadar.

B2: Contacto secundario, que implica actividades en las que no se sumerge el cuerpo, como navegar.

Categoría 2: Exploración, cultivo y otras actividades marinas tanto en las costas como en las tierras continentales.

El texto presenta cuatro subcategorías para el aprovechamiento de recursos hidrobiológicos. C1 se refiere a la cosecha y cría de mariscos en aguas marinas, C2 a la recolección y cultivo en zonas costeras, C3 abarca actividades portuarias e industriales en aguas costeras, y C4 se centra en la recolección y cultivo en lagos o lagunas.

Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.

a) Subcategoría D1. Riego de vegetales.

Agua disponible para riego sin restricciones.

Agua disponible únicamente para actividades de riego restringidas.

b) Subcategoría D2. Bebida de animales.

Categoría 4: Conservación del ambiente acuático.

- Subcategoría E1. Lagunas y lagos
- Subcategoría E2. Ríos.
 - Ríos de la costa y sierra.
 - Ríos de la selva.
- Subcategoría E3. Ecosistemas litorales y marítimos:
 - Estuarios
 - Marinos.

2.2.5. Ríos

Los ríos, como corrientes de agua en movimiento, son agentes naturales que modelan el paisaje y distribuyen agua y minerales, contribuyendo a la generación de suelos y vegetación que son conocidos como "la Sangre de la Tierra" debido a su función esencial en intercambio de energía y materia con el medio ambiente (INDEX, sin fecha).

Contaminación de ríos

El término alude a una alteración en la calidad del agua fluvial que la torna inadecuada para la vida humana y animal, atribuible a la descarga de materiales, residuos, elementos, sustancias o productos químicos procedentes de diversas fuentes (Geografía, 2009).

Tipos de contaminantes

Se atribuye a ciertos elementos o sustancias como los principales agentes contaminantes (Valencia, et al., 2007):

- La contaminación por nutrientes orgánicos se origina tanto en terrenos fertilizados como en plantas destinadas al tratamiento de residuos tanto domésticos como industriales.
- La polución por nutrientes inorgánicos comprende compuestos como el nitrógeno y el fósforo, los cuales son derivados de fertilizantes inorgánicos y detergentes.
- Los agentes patógenos, tales como bacterias, virus, protozoos patógenos y parásitos, tienen la capacidad de originarse en lodos no tratados o mal tratados, desechos animales, empaques de carne y algunas especies terrestres. La mayoría de los compuestos orgánicos tóxicos carecen de biodegradabilidad o exhiben un proceso de degradación lento.
- Los compuestos inorgánicos nocivos abarcan una gama de metales y sales, mientras que los sedimentos son diminutas gotas depositadas en el fondo acuático.
- La contaminación térmica se produce cuando el agua experimenta un aumento de temperatura debido a las plantas de generación de electricidad.

2.2.6. Dinámica de uso del río

La dinámica de uso de cuerpos de agua naturales, engloban los cambios espaciales y temporales en las formas en que las sociedades emplean los eco sistémicos, tales como el abastecimiento de agua, riego, pesca, recreación, conservación ecológica, etc. Estas dinámicas están influenciadas tanto por factores naturales (caudal, calidad del agua, régimen hidrológico) como por actividades humanas como la urbanización, el uso agrícola, la contaminación o la construcción de infraestructuras.

Los ríos son sistemas muy dinámicos debido a que presentan interacciones complejas entre el flujo de agua, el transporte de sedimentos y la morfología del cauce (Surian y Rinaldi, 2003). Según Ollero (2007), la dinámica fluvial debe entenderse como una combinación de procesos geomorfológicos activos que modifican el espacio fluvial a lo largo del tiempo, resultado de la propia actividad del cuerpo de agua, como de la intervención humana.

Estudios como el de Wohl et al. (2015) explican que los patrones de uso del río pueden afectar directamente la estructura física del ecosistema fluvial y su capacidad para brindar servicios. Adicionalmente, las modificaciones en la utilización del suelo,

particularmente aquellas vinculadas con la expansión urbana o la agricultura intensiva, modifican la hidrodinámica, la calidad del agua y, por ende, la utilización del río (Xu et al., 2022).

2.2.7. Modelo matemático de la calidad del agua

Castillo y Espinoza (2005) definen términos relacionados con el modelado ambiental. Un modelo es una representación que simula el entorno para comprender cómo interactúan los factores ambientales y responden a estímulos específicos. Después de seleccionar o construir un modelo, se evalúan los efectos de acciones propuestas y alternativas. Los modelos matemáticos son los más comunes, aunque en situaciones complejas se pueden usar modelos físicos:

- Modelos unidimensionales: Se emplean para representar el movimiento del agua en ríos, considerando su dirección de flujo.
- Modelos bidimensionales: Usados en ríos de gran tamaño donde las concentraciones de contaminantes fluctúan entre orillas. Utilizan un sistema de coordenadas cartesianas para representar la dirección del flujo y la dimensión lateral del río.
- Modelos tridimensionales: Se utilizan en situaciones más complejas de aguas superficiales y subterráneas. Requieren más información y tiempo de cómputo, lo que limita su uso en situaciones de gran envergadura y con recursos limitados.

Los modelos predictivos en la gestión hídrica son herramientas computacionales las cuales se emplean con el fin de anticipar el comportamiento de variables hidrológicas y de calidad del agua, facilitando la toma de decisiones estratégicas en contextos de incertidumbre climática, presión sobre los recursos y complejidad operativa. Estos modelos se basan en procesos físicos, o estadísticos, fundamentados en datos históricos. Su aplicación abarca desde la predicción de la demanda y disponibilidad de agua hasta la evaluación de escenarios de contaminación y la optimización de infraestructuras hidráulicas. La aplicación de modelos predictivos en la gestión hídrica permite una planificación más eficiente y sostenible de los recursos hídricos, adaptándose a las variaciones temporales y espaciales de los sistemas acuáticos (Otamendi et al., 2024; Rahbaralam et al., 2020).

2.2.8. Desarrollo de los Modelos de Calidad

Se identifican 5 fases

Desarrollo del modelo. En la actualidad, hay una variedad de modelos "empaquetados" disponibles para diversas aplicaciones. La selección de un modelo

empaquetado varía de acuerdo al alcance del estudio y el nivel de contenido actual. A medida que aumenta la complejidad del modelo, se requiere más información. Sin embargo, crear un modelo personalizado adaptado a una situación específica es una opción que no debe descartarse.

Calibración. La calibración de un modelo implica comparar sus resultados simulados con datos conocidos y ajustar parámetros para lograr concordancia. Se aplica el modelo a datos conocidos, se ajustan los parámetros y se comparan los resultados con valores observados hasta alcanzar una concordancia aceptable. La calibración debe lograr al menos un 80% de concordancia entre valores simulados y observados para garantizar la confiabilidad del modelo.

Validación. La validación del modelo sigue a la calibración, implica aplicar el modelo a un conjunto independiente de datos para verificar su precisión y capacidad de reproducir valores observados. Si el modelo no puede reproducir los valores en el conjunto de datos independiente, su validez será cuestionable.

Aplicación del modelo. La evaluación de impacto implica aplicar un modelo calibrado para analizar los efectos en la condición del agua. Se utiliza para comparar la situación actual con la prevista después de una acción propuesta, revelando así el impacto de la intervención. Además, el modelo puede evaluar los efectos de medidas de mitigación o sugerirlas si la situación resultante de la acción propuesta no es ambientalmente adecuada.

Análisis de sensibilidad. La investigación de perceptibilidad establece límites críticos de los parámetros, los cuales los valores simulados ya no se corresponden con los indicadores exactos, lo que evidencia la incertidumbre del diseño. Es importante incluir esta información junto con los resultados del estudio (Castillo y Espinoza, 2005).

➤ **Definición de términos básicos**

Aprovechamiento sostenible. Se enfoca en el uso sostenible del agua mediante la organización y desarrollo de estrategias para su preservación y protección. Esto implica medidas específicas que garanticen la disposición equitativa y continua del recurso hídrico (ANA, 2019).

Conservación de los recursos hídricos. Este se refiere a acciones destinadas a preservar y mejorar la cantidad, calidad y disponibilidad de los recursos hídricos, considerando las necesidades de los ecosistemas en cuanto al suministro de agua (ANA, 2019).

Contaminación. La existencia de bacterias, parásitos y virus en el agua suele ser resultado directo o indirecto de cambios ambientales y demográficos, como la sobrepoblación descontrolada, el desarrollo industrial, la pobreza y la disposición inadecuada de excretas humanas (Ríos et al., 2017).

Cuerpo de agua. Descubre ríos continentales, ya sean líquidos, gaseosos o sólidos, que pueden manifestarse en forma sólida, líquida o gaseosa, y que despliegan características físicas, químicas y biológicas que se entrelazan como una entidad unida (ANA, 2018).

Instrumento de Gestión Ambiental. Son mecanismos para implementar la política ambiental, siguiendo los principios legales y normativas complementarias, en coordinación con el diseño y ejecución de políticas públicas sectoriales (MINAM, 2005)

Modelamiento. Es el proceso de crear una representación simplificada de un sistema real para estudiarlo y comprender su comportamiento. Los modelos son herramientas que permiten representar y analizar sistemas mediante relaciones matemáticas que describen su dinámica y funcionamiento (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2018)

Monitoreo. Se define como el desarrollo planificado de recolección, producción, valoración y transmisión de información sobre cuerpos de agua superficiales, con el propósito de gestionar eficazmente los recursos hídricos (ANA, 2016).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. **Ámbito y condiciones de la investigación**

3.1.1. **Contexto de la investigación**

- Departamento: San Martín
- Provincia: Moyobamba
- Distrito: Rioja
- Universidad Nacional de San Martín



Figura 1

Ubicación del proyecto

Fuente: Google Earth

3.1.2. **Periodo de ejecución**

8 meses

3.1.3. **Autorizaciones y permisos**

Se solicitó permiso para usar el laboratorio de la universidad nacional de San Martín de la facultad de ecología

3.1.4. **Control ambiental y protocolos de bioseguridad**

Se garantizaron medidas de bioseguridad y control ambiental en la recolección y análisis de muestras, evitando contaminación cruzada. Se cumplieron las normativas establecidas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y otros entes reguladores, asegurando la confiabilidad de los resultados y minimizando riesgos ambientales y sanitarios.

3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales

Se honraron los valores éticos globales, asegurando la pureza en la recolección y escrutinio de datos, y la confidencialidad de los datos de los encuestados. Se evitó afectar el ecosistema y se promovió la beneficencia y justicia, asegurando que los resultados contribuyan a la dirección sostenible del recurso hídrico y al bienestar de las comunidades locales.

3.2. Sistema de variables

3.2.1. Variables principales

- **Variable independiente (X)**

Modelamiento de la calidad del agua.

- **Variable dependiente (Y)**

Predicción de la dinámica de uso del Río Negro.

3.3. Procedimientos de la investigación

3.3.1. Objetivo específico 1

- Se buscó obtener los informes técnicos de los años 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 emitidos por la Autoridad Nacional del Agua que contengan información relevante sobre la calidad del agua del río Negro.
- Se revisaron y analizaron los informes técnicos para identificar los parámetros y las categorías de uso establecidas para el río Negro.
- Cada año se llevó a cabo la medición del índice de pureza del agua del río Negro, siguiendo las directrices dictadas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), la cual utiliza una fórmula del tipo aritmética ponderada que considera diversos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, cada uno con su respectiva ponderación, para evaluar la calidad del agua en cuerpos superficiales (Autoridad Nacional del Agua, 2018), el procedimiento se describe a continuación:

Las fórmulas se emplearon con la finalidad de calcular el índice de condición del agua y se compone de tres elementos distintos: extensión, frecuencia y magnitud. Una vez aplicada la fórmula, se obtuvo un resultado numérico que varía entre 0 y 100, se emplea para delinear y narrar el estado de la pureza del agua en un lugar concreto, un río, una cuenca hidrográfica o cualquier otra zona de interés. A continuación, se desglosan los tres elementos clave empleados:

F1 – Alcance: se emplea para caracterizar el porcentaje de parámetros de calidad del agua que no satisfacen los valores establecidos en las regulaciones de los Estándares de Calidad Ambiental para el Agua (ECA-Agua), en comparación con el conjunto de parámetros evaluados.

$$F1 = \frac{\text{Número de parámetros que no cumplen los ECA - Agua}}{\text{Número total de parámetros a evaluar}}$$

F2 – Frecuencia: se refiere a la proporción de valores de parámetros que no cumplen con las regulaciones ambientales establecidas en las normas de calidad ambiental para el agua (ECA-Agua), en relación con la cantidad total de datos de los parámetros evaluados. Para obtener esos datos, se requiere un mínimo de cuatro monitoreos.

$$F2 = \frac{\text{Número de los parámetros que no cumplen el ECA - Agua de los datos evaluados}}{\text{Número total de datos evaluados}}$$

Dónde: Datos = Resultados de los monitoreos

F3 – Amplitud: esta es una medida que se utiliza para determinar la cantidad de desviación que existe en un conjunto de datos. Se calcula mediante la suma normalizada de los excesos, que representan la cantidad de valores que exceden un umbral predefinido, en relación al número total de datos que se han evaluado.

$$F3 = \frac{\text{Suma Normalizada de Excedentes}}{\text{Suma Normalizada de Excedentes} + 1} * 100$$

En donde la Suma Normalizada de Excedentes (nse):

$$nse = \text{Suma Normalizada de Excedentes} \frac{\sum i m i \text{ Excedente} i}{\text{Total de datos}}$$

Sobrepaso, respecto a cada parámetro, se determina un valor que refleja la discrepancia o fluctuación entre el valor del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) y el valor del dato cuantificado, en relación con el valor del ECA-Agua.

Caso 1: Cuando el nivel de concentración del parámetro supera el valor estipulado en los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua), se procede a calcular el excedente mediante el uso del método siguiente:

$$\text{Excedente} i = \frac{\text{Valor del parámetro que no cumple el ECA - Agua} - 1}{\text{Valor establecido del parámetro en ECA - Agua}}$$

Caso 2: Cuando el valor de concentración del parámetro es inferior al valor que ha sido establecido en el ECA-Agua, lo cual significa que no se cumple con las condiciones que

se han establecido para el mismo, como puede ser el caso del Oxígeno Disuelto (>4) o el pH (>6,5, 8,5), el excedente se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Excedente} = \frac{\text{Valor del parámetro que no cumple el ECA} - \text{Agua V} - 1}{\text{Valor establecido del parámetro en ECA} - \text{Agua}}$$

Una vez que se han definido los valores de los factores F1, F2 y F3, se puede proceder al utilizar para determinar la calidad del agua, el cual se obtiene restando la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los tres factores de 100. Este valor puede variar entre 100, lo cual indica una calidad excelente del agua, y 0, lo cual representa una calidad pésima del agua en cuestión. Se expresa en la siguiente ecuación

$$ICA - PE = 100 - \sqrt{(F1^2 + F2^2 + F3^2)}$$

La aplicación del Índice de Calidad del Agua se llevará a cabo utilizando una herramienta en Microsoft Excel que contiene un macro para el cálculo correspondiente. El macro es responsable de la introducción de los datos y fórmulas necesarios para calcular los factores F1, F2 y F3, y, finalmente, para obtener el valor del Índice de Calidad del Agua, ICA-PE. El resultado obtenido es un valor numérico sin unidades que se sitúa en un intervalo específico, lo que facilita la categorización de la calidad del agua en cinco categorías de sensibilidad: Muy deficiente, Deficiente, Aceptable, Bueno y Sobresaliente.

Tabla 3

Interpretación de la calificación ICA-PE

ICA -PE	Calificación	Interpretación
90-100	Excelente	La integridad del agua se encuentra preservada al no haber peligros ni perjuicios. Las circunstancias son extremadamente similares a los niveles esperados o naturales.
75-89	Bueno	La calidad del agua se encuentra ligeramente alejada de su estado natural, no obstante, es posible que las condiciones favorables se presenten a pesar de la existencia de algunas amenazas o daños de baja intensidad.
45-74	Regular	En ocasiones, la integridad del agua natural se ve comprometida por amenazas o daños. Con frecuencia, los niveles de calidad del agua se alejan de los valores deseados, lo que implica que muchos de los usos requerirán tratamiento para su utilización adecuada.
30-44	Malo	La meta de calidad del agua no se está alcanzando y con frecuencia las condiciones deseables están en peligro o perjudicadas. Muchos de los usos que se le dan al agua requieren tratamiento para poder ser utilizados.
0-29	Pésimo	La calidad del agua no cumple con los objetivos establecidos y se encuentra en peligro o dañada en la mayoría de los casos. Para poder utilizarla en cualquier actividad, es necesario someterla a tratamiento previo.

Esta forma de calificación cualitativa se encuentra vinculada a una escala cromática en la que se asigna un color a cada calificación. El objetivo de esta escala es facilitar la comunicación y proporcionar una representación visual del estado de la calidad del agua. A lo largo de un período específico, este indicador de calidad hídrica examina la influencia mediante un enfoque matemático. Se evalúan los indicadores físicos, químicos y microbiológicos pertinentes, y se consigue convertir grandes volúmenes de información (como las concentraciones de los parámetros examinados) en una única escala de medida, expresada en porcentaje. El Índice de Calidad del Agua, también conocido como ICA, representa la calidad del agua en un punto específico de monitoreo. Un valor reducido, cercano al 0%, sugiere una grave degradación en la calidad del agua, mientras que un valor cercano al 100% señala condiciones excepcionales.

3.3.2. Objetivo específico 2

Aplicación del cuestionario a los usuarios del río Negro:

Se diseñó un cuestionario que contenga preguntas sobre la calidad del agua del río Negro y cómo afecta a diferentes usos, como el suministro de agua potable, la agricultura, la pesca, el turismo, entre otros dirigido a los usuarios frecuentes del río Negro. Ver Anexo 01.

Se identificó la muestra representativa de usuarios del río Negro, considerando diversos sectores y actividades que dependen de este recurso hídrico.

Se aplicó el cuestionario a los usuarios seleccionados.

Análisis de datos e identificación de variables.

Se recopiló la información recolectada de las respuestas de los usuarios de manera precisa y organizada.

Se identificaron las variables de calidad del agua que tienen una correlación significativa con los usos del río Negro por parte de los usuarios.

Finalmente, se evaluó cómo estas variables afectan la sensación de los usuarios sobre la calidad del agua y su disposición a utilizar el río para diferentes fines.

3.3.3. Objetivo específico 3

Construcción del Modelo: Se llevó a cabo un análisis estadístico para desarrollar un modelo predictivo utilizando técnicas como análisis de regresión univariante y multivariante.

De acuerdo a ello, el tratamiento del modelo considera las siguientes fases:

Fase a. A lo largo de este período, se intentó discernir los elementos físicos, químicos y biológicos que inciden en la calidad del agua. Para lograr este objetivo, se realiza una revisión documental acerca del deterioro de la calidad del agua y se recolectan datos tanto de los factores mencionados como de los parámetros de calidad con el fin de determinar su correlación. El propósito se centró en identificar las circunstancias que propician la degradación de la calidad del agua.

Fase b. Se intentó diseñar esquemas numéricos y estadísticos para desentrañar los datos recolectados de las variables físicas, químicas y biológicas que afectan la pureza del agua. Se estudiaron diferentes métodos para crear modelos funcionales que permitan relacionar estas variables independientes con los parámetros de calidad que son dependientes. Se recolectó información sobre estos factores y se clasifican en variables independientes, mientras que los parámetros de calidad son variables dependientes.

Fase c. Se propuso la creación de un modelo matemático con estadísticos de regresión. Luego de clasificar los datos de las variables relacionadas con los fenómenos y los parámetros, se inicia el proceso de construcción del modelo matemático. Se llevó a cabo un análisis estadístico utilizando la técnica de regresión

Una vez obtenido el modelo predictivo se realizaron proyecciones de la calidad del agua del río Negro hasta el año 2030, teniendo en cuenta diferentes escenarios y condiciones futuras, para finalmente proponer recomendaciones y medidas de gestión para mejorar y preservar la calidad del agua del río Negro en base a los resultados del modelo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultado específico 1

Determinar la calidad del agua del río Negro según su categoría de uso, mediante el análisis de los informes técnicos de los años 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 emitidos por la Autoridad Nacional del Agua.

Para el desarrollo de este objetivo se inició con la evaluación de la condición del agua en el río Negro. El análisis se llevó a cabo en dos puntos de monitoreo estratégicamente seleccionados y establecidos por la entidad “ANA”. Las coordenadas y características específicas de estos puntos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 4

Ubicación y descripción de los puntos de monitoreo en el río Negro

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	Coordenada UTM		
		Este	Norte	Altitud (m.s.n.m)
RNegr1	Río Negro, naciente del río Negro, centro poblado ubicado en el distrito de Elías Soplin Vargas (margen derecha).	249575	9326583	813
RNegr2	Río Negro, en la captación de agua del centro urbano de Yuracyacu, en el sector Lloros, perteneciente al distrito de Yuracyacu (margen derecho).	255791	9341548	820

Fuente: (Autoridad Nacional del Agua)

Aquí se despliegan los hallazgos del estudio de la pureza del agua en el río Negro, derivados de los informes técnicos emitidos por la Autoridad Nacional del Agua a lo largo de los años 2017-2021, ordenados por año. El análisis se realizó en dos puntos de monitoreo: RNegr1 y RNegr2, evaluando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Año 2017

La Tabla 5 muestra los resultados del monitoreo realizado en dos temporadas del año 2017 y en un solo punto RNegr1, los cuales se compararon posteriormente con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM.

Tabla 5*Parámetros de calidad del agua en el río Negro - Año 2017*

Parámetro	Unidad	ECA: Cat. 4 – E2: Ríos selva	RNegr1	
			11/08/2017	08/12/2017
Físico Químicos				
Aceites y grasas	mg/L	<=5	< 1	< 1
Conductividad	(μ S/cm)	<=1000	334,3	261,6
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	<=10	< 2	< 2
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	----	< 2	< 2
Fósforo Total	mg/L	<=0,05	0,052	0,056
Nitratos (NO ₃ -)	mg/L	<=13	1,187	1,646
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=5	5,49	5,352
pH	Unidad de PH	6,5 a 9,0	7,901	7,739
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	<=400	< 2	6
Sulfuros	mg/L	<=0,002	< 0,0004	< 0,0004
Temperatura	°C	\pm 3	16,66	16,6
Inorgánicos				
Antimonio	mg/L	<=0,64	< 0,00004	< 0,00004
Arsénico	mg/L	<=0,15	< 0,00003	< 0,00003
Bario	mg/L	<=1	0,0296	0,0236
Cobre	mg/L	<=0,1	< 0,00003	< 0,00003
Mercurio	mg/L	<=0,0001	< 0,00003	< 0,00003
Niquel	mg/L	<=0,052	< 0,0002	< 0,0002
Plomo	mg/L	<=0,0025	< 0,0002	< 0,0002
Selenio	mg/L	<=0,005	< 0,0004	< 0,0004
Talio	mg/L	<=0,0008	< 0,00002	< 0,00002
Zinc	mg/L	<=0,12	< 0,01	< 0,01
Microbiológico y Parasitológico				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	<=2000	< 1,8	4,5

Durante el monitoreo del año 2017, el punto RNegr1 mantuvo una calidad de agua relativamente estable, con una única excedencia en fósforo total durante ambas temporadas (0,052 mg/L en agosto y 0,056 mg/L en diciembre), superando el límite permitido de 0,05 mg/L.

En términos de calidad físico-química, la conductividad eléctrica se mantuvo dentro de los valores permitidos (334,3 μ S/cm en agosto y 261,6 μ S/cm en diciembre, límite \leq 1000 μ S/cm), lo que sugiere una baja presencia de sales disueltas. Los niveles de

oxígeno disuelto fueron adecuados (5,49 mg/L en agosto y 5,352 mg/L en diciembre, límite ≥ 5 mg/L), garantizando condiciones favorables para la vida acuática.

Los indicadores de polución orgánica, tales como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO), revelaron niveles bajos (< 2 mg/L) en ambas épocas, revelando así que el agua no alberga una considerable cantidad de materia orgánica biodegradable o contaminantes orgánicos que persisten.

En cuanto a los metales pesados, todas las concentraciones registradas se encontraron muy por debajo de los límites permitidos, lo que sugiere una baja incidencia de contaminación por fuentes industriales o mineras. A nivel microbiológico, la presencia de coliformes termotolerantes fue mínima (< 1,8 NMP/100ml en agosto y 4,5 NMP/100ml en diciembre, límite ≤ 2000 NMP/100ml), indicando que el agua no presenta una contaminación significativa por fuentes fecales.

Año 2018

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en los monitoreos realizados durante tres temporadas del año 2018 (15 de junio, 17 de agosto y 22 de noviembre), los cuales fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM.

Tabla 6

Parámetros de calidad del agua en el río Negro - Año 2018

Parámetro	Unidad	ECA: Cat. 4 – E2: Ríos selva	RNegr1		
			15/06/2018	17/08/2018	22/11/2018
Físico Químicos					
Aceites y grasas	mg/L	≤ 5	< 1	< 1	< 1
Conductividad	(μ S/cm)	≤ 1000	249,4		240,3
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	≤ 10	< 2	< 2	< 2
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	----	< 2	----	----
Fósforo Total	mg/L	$\leq 0,05$	0,072	0,069	0,049
Nitratos (NO ₃ -)	mg/L	≤ 13	1,502	1,493	1,572
Oxígeno Disuelto	mg/L	≥ 5	5,65	----	5,55
pH	Unidad de PH	6,5 a 9,0	7,9	----	7,72
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	≤ 400	6	< 2	2
Sulfuros	mg/L	$\leq 0,002$	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004
Temperatura	°C	± 3	17,06		16,67

Inorgánicos					
Antimonio	mg/L	≤0,64	< 0,00004	< 0,00004	< 0,00004
Arsénico	mg/L	≤0,15	0,00036	0,00044	< 0,00003
Bario	mg/L	≤1	0,0212	0,0252	0,0219
Cobre	mg/L	≤0,1	0,0004	< 0,0001	< 0,00003
Mercurio	mg/L	≤0,0001	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003
Níquel	mg/L	≤0,052	0,0004	< 0,0002	< 0,0002
Plomo	mg/L	≤0,0025	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Selenio	mg/L	≤0,005	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004
Talio	mg/L	≤0,0008	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Zinc	mg/L	≤0,12	< 0,01	0,0129	< 0,01
Microbiológico y Parasitológico					
Coliformes	NMP/100ml	≤2000	22	7,8	4,5
Termotolerantes					

Interpretación

Durante el monitoreo del año 2018, el punto RNegr1 mantuvo una calidad de agua relativamente estable, con una única excedencia en fósforo total durante las primeras dos temporadas (0,072 mg/L en junio y 0,069 mg/L en agosto, superando el límite permitido de 0,05 mg/L). Para la tercera temporada en noviembre, el valor registrado (0,049 mg/L) se ubicó ligeramente por debajo del límite. En cuanto a los parámetros físico-químicos, la conductividad eléctrica se mantuvo dentro de los valores permitidos (249,4 μ S/cm en junio y 240,3 μ S/cm en noviembre, límite \leq 1000 μ S/cm), indicando baja presencia de sales disueltas en el agua. El oxígeno disuelto presentó valores adecuados en las dos temporadas en las que se midió (5,65 mg/L en junio y 5,55 mg/L en noviembre, límite \geq 5 mg/L), favoreciendo condiciones apropiadas para la vida acuática.

Los niveles de contaminación orgánica, representados por indicadores como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), mostraron en todas las temporadas valores inferiores a 2 mg/L, lo que señala una carga baja de materia orgánica biodegradable. Además, los sólidos suspendidos totales se hallaron por debajo del límite permitido (6 mg/L en junio, menos de 2 mg/L en agosto y 2 mg/L en noviembre, siendo el límite \leq 400 mg/L), lo cual indica una baja turbidez y una presencia reducida de materia particulada en el agua. En relación con los metales pesados e inorgánicos, se detectaron concentraciones mínimas y, en su mayoría, muy por debajo de los límites permitidos. Sin embargo, en junio y agosto se observaron ligeros incrementos en arsénico (0,00036 mg/L en junio y 0,00044 mg/L en agosto, límite \leq 0,15 mg/L), cobre (0,0004 mg/L en junio, límite \leq 0,1 mg/L) y níquel (0,0004 mg/L en junio, límite \leq 0,052 mg/L), aunque sin representar un riesgo significativo. A nivel microbiológico, la presencia de coliformes

termotolerantes se mantuvo muy por debajo del límite permitido (22 NMP/100ml en junio, 7,8 NMP/100ml en agosto y 4,5 NMP/100ml en noviembre, límite \leq 2000 NMP/100ml), lo que indica baja contaminación fecal y buena calidad sanitaria del agua.

Año 2019

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en los monitoreos realizados durante cuatro temporadas del año 2019 (20 de febrero, 22 de mayo, 20 de agosto y 02 de diciembre) en dos puntos de monitoreo RNegr1 y RNegr2, los cuales fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM.

Tabla 7*Parámetros de calidad del agua en el río Negro - Año 2019*

Parámetro	Unidad	ECA: Cat. 4 –		RNegr1				RNegr2			
		E2:	Ríos selva	20/02	22/05	20/08	02/12	20/02	22/05	20/08	02/12
Físico Químicos											
Aceites y grasas	mg/L	<=5	< 1	< 1	< 1	< 0,1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0,1
Conductividad	(µS/cm)	<=1000	231,1	257,4	300	254	239,7	258,3	298,4	298,4	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	<=10	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Fósforo Total	mg/L	<=0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,114	< 0,01	0,094	< 0,01	0,197	
Nitratos (NO3-)	mg/L	<=13	1,624	1,494	0,677	1,457	1,249	1,492	1,423	0,643	
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=5	6,52	6,9	5,13	6	5,1	6,4	5,94	5,94	
pH	Unidad de PH	6,5 a 9,0	7,69	7,67	7,6	7,6	7,6	7,8	7,77	7,77	
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	<=400	4	< 2	4	< 3	5	12	8	16	
Sulfuros	mg/L	<=0,002	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004	18,32
Temperatura	°C	± 3	17,5	26,95	16,76	17	20,7	19,3	18,32		

Inorgánicos										
Antimonio	mg/L	<=0,64	< 0,00004	< 0,00004	< 0,0002	< 0,0002	< 0,00004	< 0,00004	< 0,0002	< 0,0002
Arsénico	mg/L	<=0,15	0,0004	0,00035	0,0004	0,0005	0,00069	0,00052	0,0005	0,0009
Bario	mg/L	<=1	0,0233	0,0245	0,03	0,0246	0,0219	0,023	0,0275	0,0207
Cobre	mg/L	<=0,1	< 0,00003	< 0,00003	0,0004	0,0007	< 0,00003	< 0,00003	0,0005	0,0034
Mercurio	mg/L	<=0,0001	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00005	< 0,00005
Niquel	mg/L	<=0,052	< 0,0002	< 0,0002	0,0012	0,0006	< 0,0002	< 0,0002	0,0011	0,0449
Plomo	mg/L	<=0,0025	< 0,0002	< 0,0002	0,0003	0,0004	0,0005	< 0,0002	0,0003	0,0009
Selenio	mg/L	<=0,005	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0006	0,0014	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0006	< 0,0006
Talio	mg/L	<=0,0008	< 0,00002	< 0,00002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,0002	< 0,0002
Zinc	mg/L	<=0,12	< 0,01	< 0,01	0,013	< 0,008	< 0,01	< 0,01	0,013	0,017
Microbiológico y Parasitológico										
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	<=2000	4,5	2	< 1,8	6,8	280	790	130	110

Durante el monitoreo del año 2019, los puntos RNegr1 y RNegr2 presentaron condiciones generales de calidad de agua aceptables, con algunas diferencias en los parámetros evaluados. En el punto RNegr1, la calidad del agua se mantuvo relativamente estable, sin excedencias en la mayoría de los parámetros. Sin embargo, se registró un aumento en fósforo total en diciembre (0,114 mg/L), superando ampliamente el límite permitido de 0,05 mg/L, lo que sugiere posibles aportes antropogénicos, como descargas domésticas, actividad agrícola o erosión del suelo.

Los valores de conductividad eléctrica en RNegr1 se mantuvieron dentro de los límites (231,1 - 300 μ S/cm, límite \leq 1000 μ S/cm), indicando baja presencia de sales disueltas. El oxígeno disuelto fue adecuado en todas las temporadas (6,52 - 5,13 mg/L, límite \geq 5 mg/L), asegurando condiciones favorables para la vida acuática. En lo que respecta a la contaminación orgánica, se observó una demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) inferior a 2 mg/L en todos los periodos, lo que señala que la carga de materia orgánica biodegradable fue baja. Exceptuando en diciembre con el arsénico (0,0005 mg/L) y el cobre (0,0007 mg/L), y en agosto con el níquel (0,0012 mg/L), los metales pesados se mantuvieron por debajo de los límites. Sin embargo, estas cifras no suponen un peligro importante. Los coliformes termotolerantes estuvieron muy por debajo del límite permitido (máximo 6,8 NMP/100ml en diciembre, límite \leq 2000 NMP/100ml), indicando baja contaminación fecal y buena calidad sanitaria del agua. Los resultados sugieren que RNegr1 mantiene una calidad de agua favorable, con la excepción del fósforo total en diciembre, lo que podría representar un riesgo de eutrofización a largo plazo.

En contraste, el punto RNegr2 mostró una mayor degradación de la calidad del agua, evidenciada en tres parámetros críticos. Primero, el fósforo total superó el límite en mayo (0,094 mg/L) y diciembre (0,197 mg/L), lo que indica una mayor presión antropogénica en este tramo del río. Segundo, los coliformes termotolerantes experimentaron un aumento significativo en todas las temporadas, alcanzando 790 NMP/100ml en mayo y 280 NMP/100ml en febrero; aunque siguen por debajo del límite permitido (2000 NMP/100ml), muestran una mayor contaminación fecal en comparación con RNegr1. Tercero, el níquel en diciembre (0,0449 mg/L) estuvo cercano al límite permitido de 0,052 mg/L, lo que sugiere posibles fuentes de contaminación minera o industrial en el área. A pesar de estas preocupaciones, los valores de conductividad eléctrica (239,7 - 298,4 μ S/cm) y oxígeno disuelto (5,1 - 5,94 mg/L) se mantuvieron dentro de los límites establecidos, lo que indica que el agua aún conserva condiciones adecuadas para la vida acuática. Los resultados sugieren que RNegr2 presenta una mayor presión antropogénica que podría estar relacionada con descargas domésticas, agrícolas o industriales.

Año 2020

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en los monitoreos realizados durante dos temporadas del año 2020 (19 de febrero y 20 de noviembre), los cuales fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM.

Tabla 8*Parámetros de calidad del agua en el río Negro - Año 2020*

Parámetro	Unidad	ECA: Cat. 4 – E2: Ríos selva	RNegr1		RNegr2	
			19/02/20	20/11/20	19/02/20	20/11/20
Físico Químicos						
Aceites y grasas	mg/L	<=5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Conductividad	(µS/cm)	<=1000	288,8	295	301,8	290
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	<=10	< 2	< 2	< 2	< 2
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	----	----	4	----	5
Fósforo Total	mg/L	<=0,05	0,133	< 0,01	0,172	< 0,01
Nitratos (NO3-)	mg/L	<=13	1,541	0,574	1,391	0,291
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=5	5,7	6,1	6,1	6,5
pH	Unidad de PH	6,5 a 9,0	7,4	7,4	7,3	7,3
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	<=400	< 3	< 3	6	< 3
Sulfuros	mg/L	<=0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Temperatura	°C	± 3	17,4	18,1	19	20
Inorgánicos						
Antimonio	mg/L	<=0,64	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Arsénico	mg/L	<=0,15	0,0005	0,0006	0,0006	0,0008
Bario	mg/L	<=1	0,0266	0,0285	0,0258	0,0445
Cobre	mg/L	<=0,1	0,0005	< 0,0003	0,0004	0,001
Mercurio	mg/L	<=0,0001	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005
Niquel	mg/L	<=0,052	0,0005	0,0003	0,0005	0,0005
Plomo	mg/L	<=0,0025	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	0,0007
Selenio	mg/L	<=0,005	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006
Talio	mg/L	<=0,0008	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Zinc	mg/L	<=0,12	0,02	< 0,008	< 0,008	0,015
Microbiológico y Parasitológico						
Coliformes Termotolerantes	NMP/10 0ml	<=2000	< 1,8	< 1,8	170	1100

Durante el monitoreo del año 2020, los puntos RNegr1 y RNegr2 mantuvieron en general una calidad de agua dentro de los límites permitidos, con algunas excepciones que indican posibles fuentes de contaminación. En RNegr1, la mayoría de los parámetros evaluados cumplieron con los estándares establecidos, con valores adecuados de oxígeno disuelto (5,7 - 6,1 mg/L, límite ≥ 5 mg/L) y pH (7,4 en ambas temporadas, dentro del rango permitido de 6,5 a 9,0). La conductividad eléctrica osciló entre 288,8 y 295 $\mu\text{S}/\text{cm}$, reflejando una baja concentración de sales disueltas. Sin embargo, en febrero se registró una alta concentración de fósforo total (0,133 mg/L), superando el límite de 0,05 mg/L, lo que podría sugerir aportes de origen doméstico, agrícola o procesos de erosión. En contraste, en noviembre el fósforo total fue inferior al límite ($< 0,01$ mg/L), lo que sugiere una disminución en las fuentes de aporte durante ese periodo.

Los sólidos suspendidos totales se mantuvieron por debajo del límite permitido (≤ 400 mg/L), con valores < 3 mg/L en ambas temporadas. Los metales pesados estuvieron dentro de los valores normativos, con ligeros incrementos en arsénico (0,0006 mg/L en noviembre) y zinc (0,02 mg/L en febrero), aunque sin representar un riesgo significativo. En el aspecto microbiológico, los coliformes termotolerantes fueron indetectables ($< 1,8$ NMP/100ml), lo que indica ausencia de contaminación fecal y una buena calidad sanitaria del agua en RNegr1.

Por otro lado, RNegr2 evidenció una mayor presión antropogénica en ciertos parámetros clave. Al igual que en RNegr1, el fósforo total presentó valores elevados en febrero (0,172 mg/L), superando ampliamente el límite normativo, pero disminuyó en noviembre ($< 0,01$ mg/L). Esto sugiere la influencia de fuentes estacionales de contaminación, posiblemente relacionadas con actividades humanas o procesos naturales como el arrastre de sedimentos. La conductividad eléctrica (290 - 301,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y el oxígeno disuelto (6,1 - 6,5 mg/L) se mantuvieron dentro de los límites, garantizando condiciones aceptables para la vida acuática.

En cuanto a los metales, se registró un leve incremento en la concentración de arsénico en noviembre (0,0008 mg/L) y de plomo (0,0007 mg/L), aunque sin exceder los valores normativos. Sin embargo, un aspecto preocupante fue el aumento de coliformes termotolerantes en RNegr2, alcanzando 170 NMP/100ml en febrero y 1100 NMP/100ml en noviembre. Aunque estos valores aún se encuentran por debajo del límite permitido (≤ 2000 NMP/100ml), representan un incremento significativo en comparación con RNegr1, sugiriendo una posible contaminación fecal en la zona.

En general, los resultados del monitoreo indican que la calidad del agua en RNegr1 se mantiene en buenas condiciones, con excepción del fósforo total en febrero. En RNegr2,

el incremento de fósforo y coliformes termo tolerantes señala una mayor influencia de fuentes de contaminación antropogénica, lo que podría derivar en un deterioro progresivo de la calidad del agua si no se implementan medidas de control y monitoreo continuo.

Año 2021

Los resultados que la Autoridad Nacional del Agua (ANA) ha conseguido en las supervisiones llevadas a cabo durante tres períodos del año 2021 (20 de mayo, 19 de agosto y 25 de noviembre) se muestran aquí. Dichos resultados fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), que están definidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM.

Tabla 9

Parámetros de calidad del agua en el río Negro - Año 2021

Parámetro	Unidad	ECA: Cat. 4 – E2: Ríos selva	RNegr1			RNegr2		
			20/05	19/08	25/11	20/05	19/08	25/11
Físico Químicos								
Aceites y grasas	mg/L	<=5	< 0,1	< 0,4	< 0,4	< 0,1	< 0,4	< 0,4
Conductividad	(µS/cm)	<=1000	336	336	279	285	334	291
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	<=10	< 2	< 2,6	< 2,6	< 2	< 2,6	< 2,6
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	----	----	----	----	----	----	----
Fósforo Total	mg/L	<=0,05	0,071	0,02	0,05	0,114	0,12	0,08
Nitratos (NO3-)	mg/L	<=13	0,559	----	----	0,49	----	----
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=5	7,04	7,04	7,58	5,66	7,42	6,64
pH	Unidad de PH	6,5 a 9,0	7,48	7,48	7,64	7,46	7,83	7,76
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	<=400	4	< 3	< 3	7	18	11
Sulfuros	mg/L	<=0,002	< 0,001	< 0,0019	< 0,0019	< 0,001	< 0,0019	< 0,0019
Temperatura	°C	± 3	16,3	16,3	16,4	19,1	18,1	18,4
Inorgánicos								
Antimonio	mg/L	<=0,64	< 0,0002	0,0013	< 0,00013	< 0,0002	0,0014	< 0,00013
Arsénico	mg/L	<=0,15	0,0005	< 0,0001	< 0,0001	0,0007	0,0012	< 0,0001
Bario	mg/L	<=1	0,0226	0,0245	0,0209	0,0238	0,0242	0,0218
Cobre	mg/L	<=0,1	0,0006	< 0,0021	< 0,00009	0,001	< 0,0021	0,0011

Mercurio	mg/L	<=0,0001	< 0,000 05	< 0,0009	< 0,00009	< 0,000 05	< 0,0000 9	< 0,0000 9
Niquel	mg/L	<=0,052	0,000 5	< 0,047	< 0,0006	0,000 7	0,0008	< 0,0006
Plomo	mg/L	<=0,0025	0,001 9	< 0,0006	< 0,0006	0,000 5	< 0,0006	0,0101
Selenio	mg/L	<=0,005	< 0,000 6	< 0,0000 6	< 0,0013	< 0,000 6	< 0,0000 6	< 0,0013
Talio	mg/L	<=0,0008	< 0,000 2	< 0,0000 6	< 0,00006	< 0,000 2	< 0,0000 6	< 0,0000 6
Zinc	mg/L	<=0,12	< 0,008	< 0,0003	0,0073	< 0,008	< 0,0003	0,0064
Microbiológico y Parasitológico								
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	<=2000	4,5	2	4,5	790	170	490

Durante el monitoreo del 2021 en los puntos RNegr1 y RNegr2, la calidad del agua en general se mantuvo dentro de los límites establecidos, con algunas variaciones en ciertos parámetros que podrían indicar posibles fuentes de contaminación. En RNegr1, la conductividad osciló entre 279 y 336 $\mu\text{S}/\text{cm}$, reflejando ligeras variaciones en la concentración de sales disueltas. El oxígeno disuelto presentó valores adecuados (7,04 - 7,58 mg/L, por encima del límite de 5 mg/L), asegurando condiciones favorables para la vida acuática. El pH se mantuvo estable en un rango de 7,48 a 7,64, dentro del intervalo permitido (6,5 - 9,0). Sin embargo, se observó una elevación del fósforo total en mayo (0,071 mg/L) y en noviembre (0,05 mg/L), superando en ambas ocasiones el límite de 0,05 mg/L, lo que podría indicar aportes de origen doméstico o agrícola. Los sólidos suspendidos totales fueron bajos (< 3 a 4 mg/L), indicando una baja presencia de partículas en suspensión.

En cuanto a los metales, se detectaron ligeras variaciones en arsénico y plomo. En mayo, el plomo alcanzó 0,0019 mg/L, un valor cercano al límite permitido (0,0025 mg/L), aunque en las demás fechas fue inferior al límite de detección. También se registró un valor de antimonio en agosto (0,0013 mg/L), lo que sugiere una posible fuente puntual de este elemento. Los coliformes termotolerantes en RNegr1 fueron bajos (2 - 4,5 NMP/100 ml), indicando una baja presencia de contaminación fecal.

Por otro lado, en RNegr2, se observó una tendencia similar en varios parámetros, aunque con algunas diferencias notables. La conductividad varió entre 285 y 334 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que el oxígeno disuelto osciló entre 5,66 y 7,42 mg/L, manteniéndose dentro del rango aceptable. En cuanto al fósforo total, se registraron concentraciones elevadas en todas las fechas (0,08 - 0,12 - 0,114 mg/L), superando el límite permitido y

evidenciando un mayor impacto de fuentes de contaminación. La presencia de sólidos suspendidos totales fue mayor que en RNegr1, con valores entre 7 y 18 mg/L, lo que podría reflejar una mayor carga de sedimentos en esta zona.

En los metales, se detectaron concentraciones de plomo por encima del límite en noviembre (0,0101 mg/L, superando el valor permitido de 0,0025 mg/L), lo que sugiere una fuente puntual de contaminación. También se observaron ligeros incrementos en arsénico en agosto (0,00125 mg/L) y en antimonio en mayo (0,0014 mg/L), aunque sin superar los valores máximos normativos. En el aspecto microbiológico, RNegr2 mostró una mayor presencia de coliformes termotolerantes en comparación con RNegr1, con valores que oscilaron entre 170 y 790 NMP/100 ml. Aunque estos valores están por debajo del límite permitido (≤ 2000 NMP/100 ml), representan una señal de alerta sobre la posible influencia de descargas domésticas o animales en la calidad del agua.

Evaluación de parámetros críticos.

El análisis de la calidad del agua en el río Negro durante el período 2017-2021 reveló patrones significativos de deterioro en varios parámetros críticos. El estudio se realizó en dos puntos de monitoreo: RNegr1 y RNegr2, comparando los resultados con la Categoría 4 E2: Ríos selva de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM. Los parámetros que mostraron excedencias más significativas fueron el fósforo total y plomo.

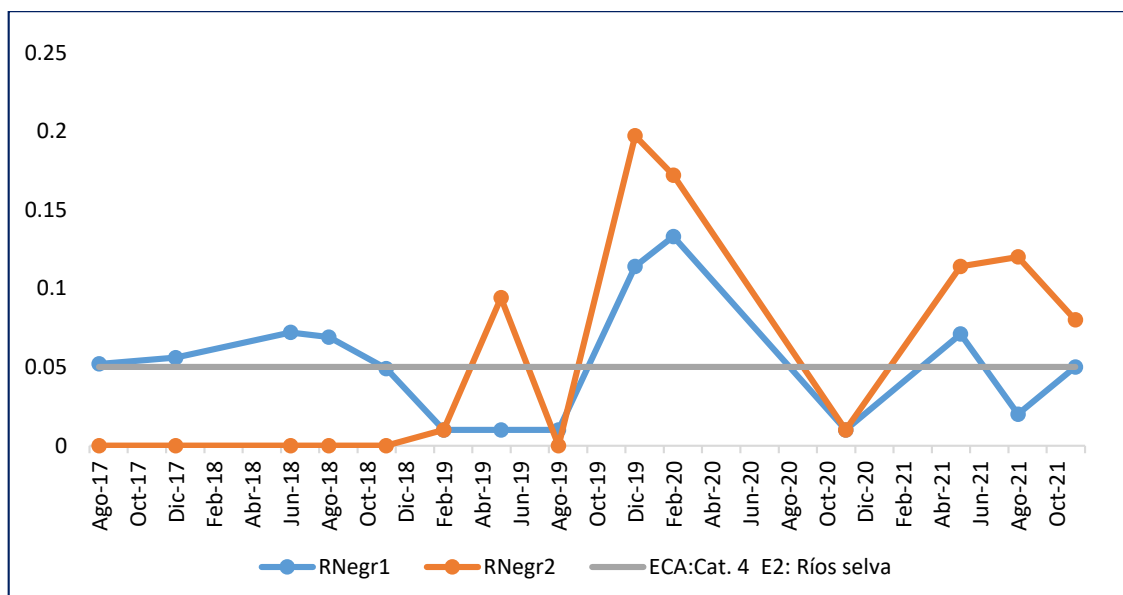


Figura 2

Variación del Fósforo Total en el río Negro.

La concentración de fósforo total en el Río Negro mostró fluctuaciones con varios episodios de excedencia del LMP (0,05 mg/L). El punto RNegr2 presentó valores más

altos que RNegr1, alcanzando picos en noviembre de 2019 y nuevamente en 2021, superando los 0,1 mg/L en varias ocasiones. Estos incrementos sugieren un aporte continuo de nutrientes, posiblemente por actividades agrícolas o descargas de aguas residuales.

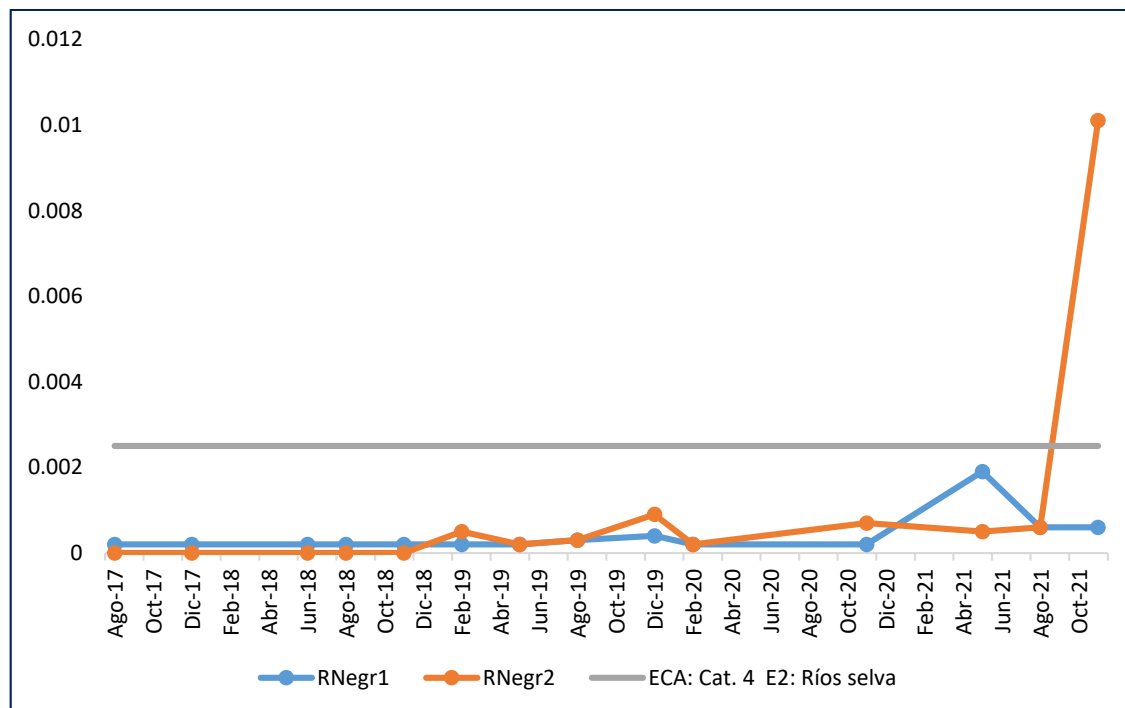


Figura 3

Variación del plomo en el río Negro.

La concentración de plomo en el Río Negro se mantuvo en niveles bajos y generalmente por debajo del LMP (0,0025 mg/L) durante la mayor parte del período de estudio. Sin embargo, en noviembre de 2021, el punto RNegr2 mostró un incremento significativo, superando ampliamente el límite permitido.

Cálculo del índice de calidad del agua (ICA-PE) en las estaciones de monitoreo del río negro según su categoría de uso, mediante el análisis de los informes técnicos de los años 2018, 2019, 2020 y 2021 emitidos por la ANA.

Tabla 10*Resultados de monitoreo para los 8 parámetros del ICA-PE en el punto RNegr1*

Parámetro	ECA Cat.4-E2	08-17	12-17	06-18	08-18	11-18	02-19	05-19	08-19	12-19	02-20	11-20	05-21	08-21	11-21
pH	6,5 - 9,0	7,901	7,739	7,9	-	7,72	7,69	7,67	7,6	7,6	7,4	7,4	7,48	7,48	7,64
CE	<=1000	334,3	261,6	249,4	-	240,3	231,1	257,4	300	254	288,8	295	336	336	279
OD	≥ 5	5,49	5,352	5,65	-	5,55	6,52	6,9	5,13	6	5,7	6,1	7,04	7,04	7,58
DBO ₅	≤ 10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2,6	2,6
Fósforo T	≤ 0,05	0,052	0,056	0,072	0,069	0,049	0,01	0,01	0,01	0,114	0,133	< 0,01	0,071	0,02	0,05
Nitratos	≤ 13	1,187	1,646	1,502	1,493	1,572	1,624	1,494	0,677	1,457	1,541	0,574	0,559	-	-
SST	≤ 400	2	6	6	2	2	4	2	4	3	3	3	4	3	3
Coliformes	≤ 2000	1,8	4,5	22	7,8	4,5	4,5	2	1,8	6,8	1,8	1,8	4,5	2	4,5

Tabla 11*Resumen cuantitativo de datos evaluados para el cálculo del ICA-PE*

Descripción	RNegr1
Número total de datos evaluados	107
Número de datos que NO cumplen el ECA para agua	7
Número total de parámetros a evaluar	8
Número de parámetros que NO cumplen ECA para agua	1

Para calcular los factores del ICA-PE, se identificó el número de parámetros que cumplen y no cumplen con los estándares. Se inició determinando el factor F1.

$$F1 = \frac{N^{\circ} \text{ parámetros que no cumplen con los ECA} - \text{Agua}}{N^{\circ} \text{ total de parámetros a evaluar}} = \frac{1}{8} * 100 = 12,5$$

Luego se calculó el factor F2 mediante su respectiva ecuación.

$$F2 = \frac{N^{\circ} \text{ datos que no cumplen el ECA} - \text{Agua}}{N^{\circ} \text{ total de datos evaluados}} = \frac{7}{107} * 100 = 6,54$$

Se hallaron los excedentes para cada parámetro que superó los valores límite, aplicando la siguiente fórmula.

$$\text{Excedente} = \frac{\text{Valor del parámetro que no cumple el ECA} - \text{Agua}}{\text{Valor establecido del parámetro en ECA} - \text{Agua}} - 1$$

Los resultados de cada uno se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 12

Cálculo detallado de excedentes RNegr1

Parámetro	Fecha	Valor	Cálculo	Excedente
Fósforo Total	08-17	0,052	(0,052 / 0,05) - 1	0,04
Fósforo Total	12-17	0,056	(0,056 / 0,05) - 1	0,12
Fósforo Total	06-18	0,072	(0,072 / 0,05) - 1	0,44
Fósforo Total	08-18	0,069	(0,069 / 0,05) - 1	0,38
Fósforo Total	12-19	0,114	(0,114 / 0,05) - 1	1,28
Fósforo Total	02-20	0,133	(0,133 / 0,05) - 1	1,66
Fósforo Total	05-21	0,071	(0,071 / 0,05) - 1	0,42
Suma de excedentes				4,34

Posteriormente la suma de excedentes fue normalizada mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Suma normalizada de los excedentes} = \frac{\sum \text{Excedente}}{\text{Total de datos}}$$

$$\text{Suma normalizada de los excedentes} = \frac{4,34}{107} = 0,0405$$

Con los valores previamente calculados, se procedió a determinar el factor F3 aplicando su ecuación específica.

$$F3 = \frac{\text{Suma normalizada de excedentes}}{\text{Suma normalizada de excedentes} + 1} * 100 =$$

$$F3 = \frac{0,0405}{0,0405 + 1} * 100 = 3,90$$

Finalmente, se procedió a realizar el cálculo del ICA - PE, aplicando la siguiente formula.

$$ICA - PE = 100 - \sqrt{\frac{F1^2 + F2^2 + F3^2}{3}} = 100 - \sqrt{\frac{12,5^2 + 6,54^2 + 3,90^2}{3}} = 91,55$$

El resultado del cálculo del Índice de Calidad del Agua para el primer punto de monitoreo (RNegr1) teniendo en cuenta la Categoría 4 – E2: Ríos selva, de los Estándares de Calidad Ambiental para agua, fue de 91,55, lo cual es un resultado “Excelente”.

RNegr2

El análisis de la calidad del agua en el punto de monitoreo RNegr2 se realizó considerando los datos recopilados durante el periodo 2017-2021, evaluando los ocho parámetros establecidos en la metodología ICA-PE: pH, Conductividad Eléctrica (CE), Oxígeno Disuelto (OD), DBO5, Nitratos, Fósforo Total, Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Coliformes Termotolerantes. Los resultados obtenidos fueron contrastados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, correspondientes a la Categoría 4 - E2: Ríos de la Selva. Recalcando que el análisis del punto RNegr2 empezó en el año 2019.

Tabla 13

Resultados de monitoreo para los 8 parámetros del ICA-PE en el punto RNegr2

Parámetro	ECA Cat.4-E2	02-19	05-19	08-19	12-19	02-20	11-20	05-21	08-21	11-21
pH	6,5 - 9,0	7,69	7,67	7,6	7,6	7,4	7,4	7,48	7,48	7,64
CE	≤ 1000	239,7	258,3	298,4	298,4	301,8	290	285	334	291
OD	≥ 5	5,1	6,4	5,94	5,94	6,1	6,5	5,66	7,42	6,64
DBO ₅	≤ 10	2	2	2	2	2	2	2	2,6	2,6
Fósforo Total	≤ 0,05	0,01	0,094	0,01	0,197	0,172	0,01	0,114	0,12	0,08
Nitratos	≤ 13	1,249	1,492	1,423	0,643	1,391	0,291	0,49	-	-
SST	≤ 400	5	12	8	16	6	3	7	18	11
Coliformes	≤ 2000	280	790	130	110	170	1100	790	170	490

Tabla 14

Resumen cuantitativo de datos evaluados para el cálculo del ICA-PE (RNegr2)

Descripción	RNegr2
Número total de datos evaluados	70
Número de datos que NO cumplen el ECA para agua	6
Número total de parámetros a evaluar	8
Número de parámetros que NO cumplen ECA para agua	1

Para calcular los factores del ICA-PE, se identificó el número de parámetros que cumplen y no cumplen con los estándares. Se inició determinando el factor F1.

$$F1 = \frac{N^{\circ} \text{ parámetros que no cumplen con los ECA - Agua}}{N^{\circ} \text{ total de parámetros a evaluar}} = \frac{1}{8} * 100 = 12,5$$

Luego se calculó el factor F2 mediante su respectiva ecuación.

$$F2 = \frac{N^{\circ} \text{ datos que no cumplen el ECA - Agua}}{N^{\circ} \text{ total de datos evaluados}} = \frac{6}{70} * 100 = 8,57$$

Se hallaron los excedentes para cada parámetro que superó los valores límite, aplicando la siguiente fórmula.

$$\text{Excedente} = \frac{\text{Valor del parámetro que no cumple el ECA - Agua}}{\text{Valor establecido del parámetro en ECA - Agua}} - 1$$

Los resultados de cada uno se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 15

Cálculo detallado de excedentes RNegr2

Parámetro	Fecha	Valor	ECA	Cálculo	Excedente
Fósforo Total	may-19	0,094	0,05	(0,094/0,05) - 1	0,88
Fósforo Total	dic-19	0,197	0,05	(0,197/0,05) - 1	2,94
Fósforo Total	feb-20	0,172	0,05	(0,172/0,05) - 1	2,44
Fósforo Total	may-21	0,114	0,05	(0,114/0,05) - 1	1,28
Fósforo Total	ago-21	0,12	0,05	(0,12/0,05) - 1	1,4
Fósforo Total	nov-21	0,08	0,05	(0,08/0,05) - 1	0,6
Suma total de excedentes					9,54

Posteriormente la suma de excedentes fue normalizada mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Suma normalizada de los excedentes} = \frac{9,54}{70} = 0,13629$$

Con los valores previamente calculados, se procedió a determinar el factor F3 aplicando su ecuación específica.

$$F3 = \frac{\text{Suma normalizada de excedentes}}{\text{Suma normalizada de excedentes} + 1} * 100 =$$

$$F3 = \frac{0,13629}{0,13629 + 1} * 100 = 11,996$$

Finalmente, se procedió a realizar el cálculo del ICA - PE, aplicando la siguiente fórmula.

$$\text{ICA - PE} = 100 - \sqrt{\frac{F1^2 + F2^2 + F3^2}{3}} = 100 - \sqrt{\frac{12,5^2 + 8,57^2 + 11,996^2}{3}} = 88,84$$

Para el primer punto de monitoreo (RNegr2), el cálculo del Índice de Calidad del Agua, que se realizó considerando la Categoría 4 - E2: Ríos selva, de los Estándares de

Calidad Ambiental para agua, arrojó un resultado de 88.84, lo cual es considerado "bueno".

4.2. Resultado específico 2

Identificar las variables de calidad del agua del río Negro que influyen su dinámica de uso

El río Negro es una fuente de agua vital para diversas actividades humanas, incluyendo el abastecimiento doméstico, la pesca, el turismo y la recreación. La manera en que los usuarios perciben la calidad del agua tiene un impacto importante tanto en su uso como en su gestión. Se llevó a cabo un cuestionario entre los usuarios habituales del río (ver anexo 2) para determinar las variables de calidad del agua que alteran su dinámica de uso. Se recopilaron datos acerca de su apreciación sobre la calidad del agua, las actividades llevadas a cabo y las eventuales mejoras en la gestión del recurso.

Diseño del cuestionario

El cuestionario aplicado se diseñó con preguntas relacionadas con la percepción de la calidad del agua del río Negro y su impacto en los usos que los usuarios hacen de este recurso. Las principales categorías abordadas fueron:

- Frecuencia de uso del río para actividades recreativas y económicas.
- Percepción de la calidad del agua en función de variables como claridad, olor, sabor y contaminación visible.
- Impactos percibidos en la salud y el bienestar.
- Medidas propuestas para mejorar la calidad del agua.

Frecuencia de uso del río Negro

Tabla 16

Frecuencia de uso del río Negro

Item	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Diariamente	6	20,0	20,0	20,0
Semanalmente	13	43,3	43,3	63,3
Mensualmente	10	33,3	33,3	96,7
Ocasionalmente	1	3,3	3,3	100,0
Total	30	100,0	100,0	

Los resultados muestran que el 43,3 % de los encuestados utiliza el río semanalmente, seguido por un 33,3 % que lo emplea mensualmente y un 20 % que lo usa diariamente.

Un pequeño porcentaje (3,3 %) indicó que usa el río ocasionalmente. La elevada prevalencia de uso semanal y mensual indica que el río continúa siendo un recurso esencial para la comunidad. Sin embargo, factores como la percepción de la calidad del agua podrían tener un impacto en su utilización a largo plazo.

Actividades realizadas en el río y su relación con la calidad del agua

Tabla 17

Actividades realizadas por los usuarios

Item	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Natación	15	50,0	50,0	50,0
Pesca	13	43,3	43,3	93,3
No se realizó actividades en el río	2	6,7	6,7	100,0
Total	30	100,0	100,0	

Las principales actividades realizadas en el río incluyen natación (50 %) y pesca (43.3 %), mientras que un 6,7 % de los encuestados indicó que no realiza ninguna actividad en el río. Estos resultados indican que el contacto directo con el agua es frecuente. Sin embargo, la presencia de usuarios que evitan el río puede estar relacionada con preocupaciones sobre su calidad.

Variables de Calidad del Agua Percibidas como más Importantes

Tabla 18

Aspectos para determinar la calidad del agua

Item	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Claridad del agua	16	53,3	53,3	53,3
Olor del agua	10	33,3	33,3	86,7
Sabor del agua	4	13,3	13,3	100,0
Total	30	100,0	100,0	

Los encuestados identificaron la claridad del agua (53,3 %), el olor (33,3 %) y el sabor (13,3 %) como los principales indicadores de calidad del agua. La claridad del agua es el principal criterio de calidad identificado, lo que sugiere que los usuarios asocian el aspecto visual del agua con su aptitud para actividades recreativas y consumo.

Percepción de Cambios en la Calidad del Agua

Tabla 19

Cambios notados por los usuarios en el transcurso de los años

Item	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Si	13	43,3	43,3	43,3
No	17	56,7	56,7	100,0
Total	30	100,0	100,0	

El 43,3 % de los encuestados manifestó haber notado un deterioro en la calidad del agua, mientras que el 56,7 % no ha percibido cambios significativos.

Medidas que los usuarios consideran que se deben tomar para la Gestión del Recurso

Tabla 20

Medidas propuestas para la Gestión del Recurso

Item	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Reducir la contaminación agrícola	2	6,7	6,7	6,7
Implementar programas de educación ambiental	14	46,7	46,7	53,3
Restringir ciertas actividades en áreas sensibles	1	3,3	3,3	56,7
Incrementar la vigilancia y el control de la calidad del agua	12	40,0	40,0	96,7
Otros	1	3,3	3,3	100,0
Total	30	100,0	100,0	

Entre las acciones recomendadas para fortalecer la condición del agua, el 46,7 % de los encuestados consideró clave implementar programas de educación ambiental, seguido por el 40 % que sugiere incrementar la vigilancia y el control del agua.

4.3. Resultado específico 3

Diseñar el Modelo predictivo de la calidad del agua del río Negro al 2030

A fin de estimar la calidad del agua proyectada al año 2030, se analizó previamente cómo esta evolucionó a lo largo del tiempo. Para ello, fue necesario calcular el Índice de Calidad de Agua - Perú (ICA-PE) de manera independiente para cada monitoreo realizado por año dentro del periodo de estudio. En el análisis del objetivo anterior, se determinó el ICA-PE de las áreas de supervisión RNegr1 y RNegr2 utilizando de forma

consolidada los datos recopilados entre 2017 y 2021, lo que permitió obtener una evaluación "global" de la calidad del agua en dichos puntos: 91,85 ("Excelente") para RNegr1 y 88,84 ("Bueno") para RNegr2.

Resultados del ICA-PE por año (2017 – 2021)

El desarrollo del modelo predictivo comenzó con el cálculo de los valores del ICA-PE para cada año dentro del periodo de estudio (Ver Anexo 1). El procedimiento se originó siguiendo el desarrollo establecido por la entidad "ANA". La solución se muestra en el siguiente indicador.

Tabla 21

Resultados del cálculo del ICA-PE por año para el punto RNegr1

Año	N° Monitoreos	F1	F2	F3	ICA-PE	Calificación
2017	2	12,5	12,5	0,99	89,78	Bueno
2018	3	12,5	8,33	3,31	91,12	Excelente
2019	4	12,5	3,12	3,85	92,24	Excelente
2020	2	12,5	6,25	9,42	90,27	Excelente
2021	3	12,5	4,17	1,72	92,32	Excelente

Tabla 22

Resultados del cálculo del ICA-PE por año para el punto RNegr2

Año	N° Monitoreos	F1	F2	F3	ICA-PE	Calificación
2019	4	12,5	6,25	10,67	89,85	Bueno
2020	2	12,5	6,25	13,23	88,89	Bueno
2021	3	37,5	12,5	12,05	87,64	Bueno

Los resultados mostraron que el punto de monitoreo RNegr1 reveló, una calidad de agua clasificada como "Excelente", con valores de ICA-PE que oscilaron entre 89,78 y 92,32. De igual manera, el punto RNegr2 mostró una calidad de agua consistentemente calificada como "Buena" a lo largo de todo el periodo analizado, registrando valores que fluctuaron entre 87,64 y 89,85.

Desarrollo del modelo predictivo

a. Análisis estadísticos descriptivos

Para evaluar la tendencia del Índice de Calidad del Agua (ICA-PE) en los puntos de monitoreo seleccionados, se empleó un análisis de regresión lineal utilizando Microsoft Excel - 2019. Este software permite realizar cálculos estadísticos avanzados de manera eficiente y accesible, facilitando la interpretación de los resultados (Ver anexo 3).

RNegr1

Para analizar la tendencia del coeficiente de Calidad de Agua (ICA-PE) en el punto de monitoreo RNegr1, se implementó un modelo simple de regresión lineal, donde el año se identificó como variable independiente (X) y el ICA-PE como variable dependiente (Y).

La ecuación de regresión obtenida es:

$$\text{ICA-PE} = -762,891 + 0,423X$$

Dónde:

- -762,891 (Intercepto): Representa el valor estimado del ICA-PE cuando X= 0 (año 0).
- 0,423 (Pendiente): Indica que, en promedio, el ICA-PE aumenta en 0,423 unidades por cada año.

Coefficiente de determinación (R²)

El coeficiente de determinación (R²) obtenido es 0,343, lo que indica que el 34,3% de la variabilidad del ICA-PE es explicada por el tiempo. Esto sugiere que el modelo tiene un ajuste moderadamente bajo, por lo que otros factores pueden estar influyendo en el cambio del ICA-PE.

Prueba de normalidad

El p-valor de la pendiente es 0,299, lo que significa que la relación entre el año y el ICA-PE no es estadísticamente significativa al nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$). Es decir, no se puede afirmar con certeza que el tiempo sea un factor determinante en la variación del ICA-PE en este punto de monitoreo.

RNegr2

Se aplicó un modelo de regresión lineal simple para analizar la tendencia del indicador de Calidad de Agua (ICA-PE) en el punto RNegr2, considerando el año como variable independiente (X) y el ICA-PE como variable dependiente (Y).

La ecuación de regresión obtenida es:

$$\text{ICA-PE} = 2320,893 - 1,105 X$$

Dónde:

- 2320,893 (Intercepto): Representa el valor teórico del ICA-PE cuando X 0(año 0). Aunque no tiene una interpretación práctica directa en este estudio, refleja la tendencia general del modelo. y $-1,105$ (Pendiente): Indica que el ICA-PE disminuye en promedio 1,105 unidades por cada año.

Coefficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación obtenido es 0,994, lo que significa que el 99,4% de la variabilidad del ICA-PE es explicada por el tiempo. Esto indica que el modelo tiene un ajuste extremadamente alto.

Prueba de normalidad

El p-valor de la pendiente es 0,048 lo que indica que la relación entre el año y el ICA-PE es estadísticamente significativa al nivel de confianza del 95% ($\alpha=0,05$). Esto sugiere que el tiempo es un factor determinante en la disminución del ICA-PE en este punto de monitoreo.

b. Proyección al 2030

Una vez validado el modelo de regresión lineal, se procedió a realizar la proyección de los valores ICA-PE para el año 2030. Esta proyección incluyó el cálculo de intervalos de confianza con un nivel de confianza del 95%.

RNegr1

$$\text{ICA-PE}_{2030} = -762,891 + 0,423(2030)$$

$$\text{ICA-PE}_{2030} = 95,799$$

Tabla 23

Resultados del cálculo del ICA-PE hasta el año 2030 – RNegr1

Año	Punto	ICA_PE
2017	RNegr1	89,78
2018	RNegr1	91,12
2019	RNegr1	92,24
2020	RNegr1	90,27
2021	RNegr1	92,32
2022	RNegr1	92,415
2023	RNegr1	92,838
2024	RNegr1	93,261
2025	RNegr1	93,684
2026	RNegr1	94,107
2027	RNegr1	94,53
2028	RNegr1	94,953
2029	RNegr1	95,376
2030	RNegr1	95,799

RNegr2

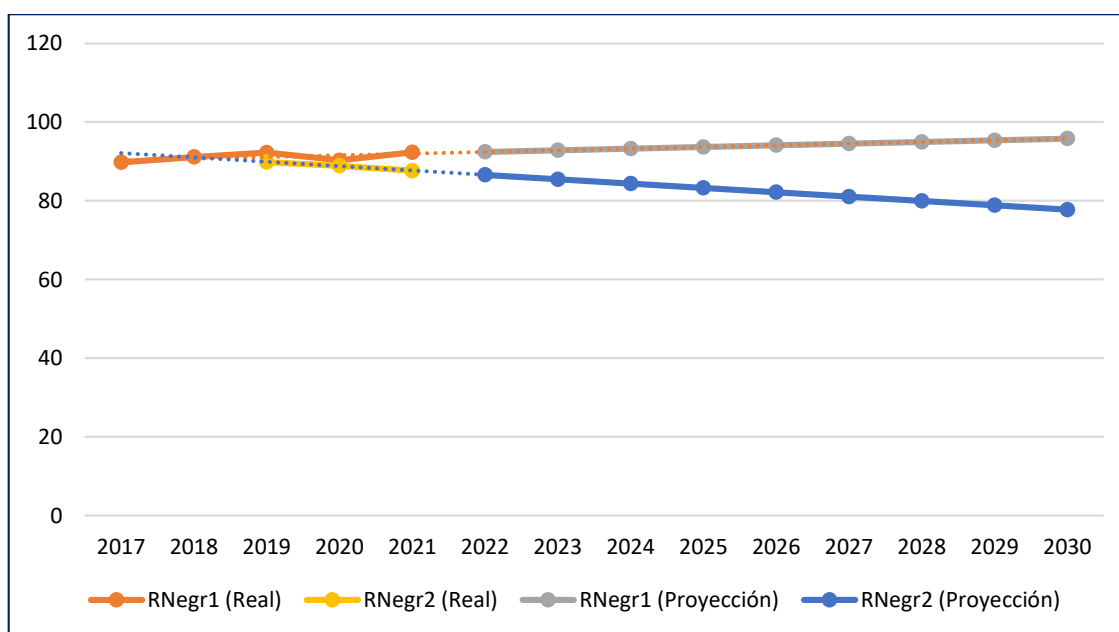
$$\text{ICA-PE}_{2030} = 2320,893 - 1,105(2030)$$

$$\text{ICA-PE}_{2030} = 77,743$$

Tabla 24

Resultados del cálculo del ICA-PE hasta el año 2030 – Rnegr2

Año	Punto	ICA_PE
2019	RNegr2	89,85
2020	RNegr2	88,89
2021	RNegr2	87,64
2022	RNegr2	86,583
2023	RNegr2	85,478
2024	RNegr2	84,373
2025	RNegr2	83,268
2026	RNegr2	82,163
2027	RNegr2	81,058
2028	RNegr2	79,953
2029	RNegr2	78,848
2030	RNegr2	77,743

**Figura 4**

Tendencia y proyección del ICA – PE (2017 - 2030).

La proyección del Índice de Calidad de Agua - Perú (ICA-PE) hasta el año 2030 muestra tendencias diferenciadas en los puntos de monitoreo evaluados. Para RNegr1, los criterios estimados señalan una ligera mejora en la calidad del agua, alcanzando un ICA-PE de aproximadamente 95,799 en 2030. En contraste, en RNegr2, la tendencia proyectada refleja un deterioro progresivo del recurso hídrico, con una disminución del ICA-PE hasta 77,743 en el mismo año.

Estos resultados sugieren que, si las circunstancias presentes se mantienen, la calidad del agua en RNegr1 permanecerá estable con leves mejoras, mientras que en RNegr2 se requerirán medidas de gestión para mitigar la disminución en la calidad del agua y evitar posibles impactos ambientales adversos en el futuro.

4.4. Discusión de resultados

Los hallazgos derivados de los puntos de seguimiento RNegr1 y RNegr2 en el río Negro evidencian una dinámica de calidad del agua que fluctúa en función de las estaciones y de los parámetros evaluados. En particular, se observó que RNegr2 mostró valores elevados de fósforo total y coliformes termotolerantes, lo que sugiere una presión antropogénica más alta en este punto del río. Este comportamiento es similar al encontrado en el río Magdalena por Colmenares y Cruz (2020), detectaron fluctuaciones notables en la calidad del agua entre los diversos puntos de monitoreo, atribuibles a factores antropogénicos, tales como descargas de aguas residuales y actividades agrícolas. De forma análoga, Mallqui et al. (2022) indicaron que la contaminación derivada de aguas residuales incide de manera considerable en la calidad del agua del río Mantaro, particularmente en los niveles de metales pesados y coliformes.

Los resultados obtenidos en RNegr1, con un ICA-PE de "Excelente", son más favorables, lo que sugiere una menor presión contaminante en este punto. Este comportamiento también es consistente con lo observado por Vargas (2021) en el río San Gabán, donde los puntos aguas arriba mostraron una mejor calidad de agua en comparación con los puntos aguas abajo. La tendencia positiva observada en RNegr1 también refuerza la hipótesis de que la calidad del agua de los ríos puede verse significativamente afectada por las actividades humanas, como la minería, la agricultura y la urbanización.

En relación con las proyecciones del ICA-PE para el año 2030, los modelos predictivos evidencian una mejora marginal en la calidad del agua de RNegr1 y un deterioro progresivo en RNegr2, subrayando así la relevancia de la planificación a largo plazo en la administración de los recursos hídricos en el futuro. Los hallazgos de este estudio se alinean con los resultados de Aguilar y Obando (2020), quienes subrayaron la capacidad de los modelos predictivos justificados en técnicas de instrucción intuitiva, tales como redes neuronales y modelos híbridos, y pronosticaron la fluctuación en la condición del agua en función de parámetros fisicoquímicos. Este tipo de modelización aplicado al río Negro, permitió no solo englobar la dinámica actual de la condición del agua, sino también prever cómo estas condiciones podrían cambiar a futuro, lo que ofrece a los

tomadores de decisiones herramientas proactivas para actuar antes de que los problemas se agraven.

Además, los resultados de RNegr1 proyectan una ligera mejora en la calidad del agua, con un ICA-PE alcanzando valores cercanos a 95,799 para el año 2030. Esto sugiere que, si las condiciones actuales de gestión se mantienen, la calidad del agua podría estabilizarse o mejorar lentamente. Sin embargo, el declive proyectado en RNegr2, con un ICA-PE de 77,743 en 2030, indica que, si no se toman medidas correctivas, los problemas de contaminación en este punto del río podrían empeorar con el tiempo. Este patrón de deterioro está en línea con lo que observó Córdova y Díaz (2020) en su estudio sobre la quebrada Rumiyacu, donde los parámetros como el plomo y el arsénico mostraron correlaciones significativas con otros parámetros fisicoquímicos, lo que sugiere que la gestión de este tipo de contaminantes debería ser una prioridad en áreas como RNegr2.

Los estudios de Segura (2021), en los que se emplearon modelos predictivos para la administración de la condición del agua en balnearios, también refuerzan la idea de que los modelos basados en inteligencia artificial y regresión pueden mejorar significativamente la precisión en la predicción de excesos de coliformes y otros contaminantes.

Es relevante destacar que la gestión proactiva de la calidad del agua en el río Negro, como sugieren los resultados de este estudio y los de Córdova y Díaz (2020), debe involucrar tanto el monitoreo constante de los parámetros críticos como la implementación de estrategias de mitigación y educación ambiental para reducir las fuentes de contaminación. Los hallazgos de este estudio se alinean con las recomendaciones de gestión sugeridas por los usuarios del río, quienes, de acuerdo con la encuesta implementada, consideraron como medidas más significativas el incremento de la vigilancia y el control de la calidad del agua (40%) y la implementación de programas de educación ambiental (46,7%). Estas sugerencias enfatizan la necesidad de robustecer la gestión participativa en la conservación de los recursos hídricos, una estrategia que también fue objeto de estudio por Alves et al. (2022). Estos autores postularon que la interacción entre la comunidad y las autoridades en la administración del agua puede optimizar de manera significativa los resultados de conservación.

CONCLUSIONES

Se estableció la condición de la calidad del agua del río Negro en los puntos de monitoreo RNegr1 y RNegr2, conforme a los informes técnicos del ANA del periodo 2017-2021. El punto RNegr1 registra un Índice de Calidad del Agua (ICA-PE) de 91,55, clasificado como "Excelente", evidenciando una calidad relativamente estable y sin riesgos significativos. Por otro lado, el punto RNegr2 alcanzó un ICA-PE de 88,84, también clasificado como "Bueno", pero con una tendencia descendente, principalmente por las concentraciones elevadas de fósforo total y coliformes termotolerantes.

Se identificaron las variables con mayor impacto en la dinámica de uso del río Negro, resaltando el fósforo total, los coliformes termotolerantes y el oxígeno disuelto como los principales parámetros determinantes en la calidad del agua. A través del análisis de encuestas a usuarios del río Negro, se evidenció que las percepciones sociales sobre la calidad del recurso (claridad, olor y posibles efectos en la salud) coinciden con los parámetros técnicos analizados, reforzando la necesidad de considerar ambos enfoques en la gestión integral del recurso hídrico.

Se diseñó un modelo predictivo mediante análisis de regresión lineal para proyectar el comportamiento del ICA-PE del río Negro hasta el 2030. Los resultados mostraron una leve mejora en el punto RNegr1, manteniendo su categoría "Excelente" con un valor de 95,799, mientras que en RNegr2 se evidenció un deterioro progresivo, alcanzando un ICA-PE estimado de 77,743. Este modelamiento constituye una herramienta fundamental para anticipar escenarios futuros y fortalecer la toma de decisiones en la gestión hídrica, permitiendo orientar políticas de conservación, priorizar intervenciones y garantizar el uso sostenible del río, especialmente en zonas con alta presión antropogénica como RNegr2, donde se requiere atención inmediata para mitigar su degradación.

RECOMENDACIONES

Se sugiere a los futuros investigadores llevar a cabo investigaciones adicionales que exhaustivamente examinen los recursos específicos de polución en RNegr2, tales como las descargas de efluentes residuales y la actividad agrícola. Estos estudios permitirían identificar las causas primordiales sobre la afectación de la calidad del agua y establecer estrategias de mitigación más efectivas.

Para investigaciones futuras, se sugiere evaluar el impacto de diferentes prácticas de manejo agrícola en las zonas cercanas al río Negro, como el uso de fertilizantes y pesticidas, en los niveles de fósforo total y otros nutrientes. Esto contribuiría a diseñar políticas más efectivas para reducir el aporte de contaminantes de origen agrícola y optimizar la calidad del agua en las áreas afectadas.

Se sugiere realizar investigaciones adicionales sobre el uso de tecnologías innovadoras en la purificación de aguas residuales y el tratamiento de efluentes, como la filtración mediante materiales naturales o la aplicación de técnicas de fitorremediación. Estos estudios podrían proporcionar soluciones económicas y sostenibles para reducir la carga contaminante en el río Negro, especialmente en puntos con alta contaminación como RNegr2.

Se sugiere a los gobiernos municipales y organismos encargados del manejo del agua considerar implementación de estrategias de preservación y uso sostenible basadas en los efectos obtenidos de este análisis. Promover el manejo de enfoques como la gestión integrada de recursos hídricos y la educación ambiental podría contribuir significativamente al mantenimiento de la condición del agua del río Negro a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandratos, S., Barak, N., Bauer, D., Davidson, F., Gibney, B., Hubbard, S., Taft, H., & Westerhof, P. (2019). Sustaining Water Resources: Environmental and Economic Impact. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. <https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.8B05859>.
- Aguilar, A. y Obando, F. (2020). Aprendizaje automático para la predicción de calidad de agua potable. *Ingeniare*, (28), 47–62. <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.28.6215>
- Autoridad Nacional del Agua. (2018). Metodología para la determinación del índice de calidad de agua ICA-PE, aplicado a los cuerpos de agua continentales superficiales. Lima: ANA. Recuperado de <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2440>
- Carpío Vargas, E. E. (2021). Modelamiento de Relaciones entre Parámetros Físicoquímicos y Microbiológicos en Aguas de la Bahía Interior del Lago Titicaca-Puno (Perú) mediante Árboles de Predicción. *Revista Técnica*, 44(3), 154+. <https://goo.su/GHDa>
- Castro, A., Quintas-Soriano, C., Brandt, J., Atkinson, C., Baxter, C., Burnham, M., Egoh, B., García-Llorente, M., Julian, J., Martín-López, B., Liao, F., Running, K., Vaughn, C., & Norström, A. (2018). Applying Place-Based Social-Ecological Research to Address Water Scarcity: Insights for Future Research. *Sustainability*, 10, 1516. <https://doi.org/10.3390/SU10051516>.
- Colmenares Virviescas, L. M., & Cruz Benavides, J. D. (2020). Análisis espacio-temporal de la calidad del agua del río Magdalena (periodo 2009-2018) a partir de la comparación de índices de calidad del agua [Tesis, Universidad El Bosque]. Repositorio Institucional de la Universidad El Bosque. <https://hdl.handle.net/20.500.12495/5541>
- Córdova, D. (2023). Modelamiento y simulación de cloro residual en agua potable, para determinar la calidad microbiológica del agua del centro poblado Marona [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional de San Martín. <http://hdl.handle.net/11458/5132>

- Córdova, O. y Díaz, J. (2020). Aplicación de un modelo matemático para determinar la calidad del agua de la quebrada Rumiyacu, Moyobamba, 2020 (Tesis). Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/58386>
- Dawadi, S., & Ahmad, S. (2013). Evaluating the impact of demand-side management on water resources under changing climatic conditions and increasing population. *Journal of environmental management*, 114, 261-75. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.015>
- Jin, T., Cai, S., Jiang, D., & Liu, J. (2019). A data-driven model for real-time water quality prediction and early warning by an integration method. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 30374 - 30385. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06049-2>
- Jones, E. R., Bierkens, M. F. P., Wanders, N., Sutanudjaja, E. H., van Beek, L. P. H., & van Vliet, M. T. H. (2023). DynQual v1.0: A high-resolution global surface water quality model. *Geoscientific Model Development*, 16, 4481-4500. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-4481-2023>
- Kalogiannidis, S., Kalfas, D., Giannarakis, G., & Paschalidou, M. (2023). Integration of Water Resources Management Strategies in Land Use Planning towards Environmental Conservation. *Sustainability*, 15(21), 15242. <https://doi.org/10.3390/su152115242>
- Mallqui, J., Miguel, Y. y Reyes, S. (2022). Análisis espacio temporal de la calidad de agua del río Mantaro influenciada por las aguas residuales del año 2004 - 2008 y 2015 – 2019 (Tesis). Universidad Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/11987>
- Mahmoodi, N., Kiesel, J., Wagner, P. D., & Fohrer, N. (2021). Impactos distribuidos espacialmente del cambio climático y la demanda de agua subterránea sobre los recursos hídricos en un sistema de wadi. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(9), 5065-5081. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5065-2021>
- Moudi, M., Gai, Q., Yuan, H., Guiqing, L., Basirialmahjough, M., Motamedi, A., Yuan, H., Guiqing, L., Basirialmahjough, M., & Motamedi, A. (2023). A novel objective for improving the sustainability of water supply system regarding hydrological response. *PLOS ONE*, 18(11), Article e0294578. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294578>

- Ollero, A. (2007). Algunos apuntes sobre la dinámica fluvial: los ríos actuales como resultado de su propia libertad y de la intervención humana en sus riberas. Zaragoza: Universidad de Zaragoza. <https://www.researchgate.net/publication/291075532>
- Otamendi, U., Maiza, M., Olaizola, I. G., Sierra, B., Flores, M., & Quartulli, M. (2024). Integrated Water Resource Management in the Segura Hydrographic Basin: An Artificial Intelligence Approach. arXiv preprint <https://arxiv.org/abs/2411.13566>
- Rahbaralam, M., Modesto, D., Cardús, J., Abdollahi, A., & Cucchiatti, F. M. (2020). Predictive Analytics for Water Asset Management: Machine Learning and Survival Analysis. <https://arxiv.org/abs/2007.03744>
- Ross, H., & Baldwin, C. (2022). Water as a source of innovation in environmental policy and management. *Australasian Journal of Environmental Management*, 29, 97 - 104. <https://doi.org/10.1080/14486563.2022.2090126>
- Salmoral, G., Zegarra, E., Vázquez-Rowe, I., González, F., Castillo, L., Saravia, G., Graves, A., Rey, D., & Knox, J. (2020). Water-related challenges in nexus governance for sustainable development: Insights from the city of Arequipa, Peru. *The Science of the total environment*, 747, 141114. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141114>.
- Sánchez, R. y Gómez, C. (2021). Acercamiento a los procesos de modelación de la calidad del agua en una subcuenca. Caso del río Virilla, Costa Rica. *Uniciencia*. <https://doi.org/10.15359/ru.35-1.5>
- Segura, Á. (2021). Monitoreo de calidad de agua y predicción de coliformes fecales en playas de Montevideo mediante algoritmos de aprendizaje automático. *INNOTECH*, (22). <https://doi.org/10.26461/22.07>
- SUNASS. (2004). La calidad del agua potable en el Perú. <https://goo.su/twl8eL7>
- Surian, N., & Rinaldi, M. (2003). Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 50(4), 307–326. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00219-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00219-2)
- UNESCO. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <https://es.unesco.org/water-security/wwap/wwdr/2019>

- Vargas, B. (2021). Análisis espacio-temporal del Índice de la calidad ambiental de los recursos hídricos superficiales (ICARHS) en puntos de control del río San Gabán- Carabaya-Puno-2021 (Tesis). Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/71364>
- Wang, Q., Li, S., Jia, P., Qi, C., & Ding, F. (2013). A Review of Surface Water Quality Models. En M. Ionnidou (Ed.), *Wetland Degradation and Ecological Restoration*. <https://doi.org/10.1155/2013/231768>
- Wang, X., Zhang, J., Shahid, S., Guan, E., Wu, Y., Gao, J., & He, R. (2014). Adaptation to climate change impacts on water demand. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21, 81-99. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9571-6>
- Wohl, E., Bledsoe, B., Jacobson, R., Poff, N. L., Rathburn, S., Walters, D., & Wilcox, A. (2015). The natural sediment regime in rivers: Broadening the foundation for ecosystem management. *BioScience*, 65(4), 358–371. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv002>
- Xu, H., Li, L., Liu, W., & Zhang, J. (2022). Impacts of land use change on river water quality and ecosystem services in a peri-urban watershed. *Science of The Total Environment*, 830, 154788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154788>

ANEXOS

Anexo N° 01. Cálculos detallados del ICA-PE por año

Año 2017

RNegr1

$$F1 = (1/8) \times 100 = 12,5$$

$$F2 = (2/16) \times 100 = 12,5$$

Excedentes. Fósforo total

$$\text{Excedente agosto} = (0,052/0,050) - 1 = 0,04$$

$$\text{Excedente de diciembre} = (0,056/0,050) - 1 = 0,12$$

$$\sum \text{Excedentes} = 0,04 + 0,12 = 0,16$$

$$\text{Suma normalizada de excedentes} = 0,16/16 = 0,01$$

$$F3 = (0,01/0,01+1) \times 100 = 0,99$$

$$\text{ICA-PE} = 100 - \sqrt{((12,5)^2 + (12,5)^2 + (0,99)^2)/3} = 89,78$$

Año 2018

RNegr1

$$F1 = (1/8) \times 100 = 12,5$$

$$F2 = (2/24) \times 100 = 8,33$$

Excedentes. Fósforo total

$$\text{Excedente junio} = (0,072/0,05) - 1 = 0,44$$

$$\text{Excedente de agosto} = (0,069/0,050) - 1 = 0,38$$

$$\sum \text{Excedentes} = 0,44 + 0,38 = 0,82$$

$$\text{Suma normalizada de excedentes} = 0,82/24 = 0,0342$$

$$F3 = (0,0342/0,0342+1) \times 100 = 3,31$$

$$\text{ICA-PE} = 100 - \sqrt{((12,5)^2 + (8,33)^2 + (3,31)^2)/3} = 91,12$$

Año 2019**RNegr1**

$$F1 = (1/8) \times 100 = 12,5$$

$$F2 = (1/32) \times 100 = 3,12$$

Excedentes. Fósforo total

$$\text{Excedente diciembre} = (0,114/0,05) - 1 = 1,28$$

$$\text{Suma normalizada de excedentes} = 1,28/32 = 0,04$$

$$F3 = (0,04/0,04 + 1) \times 100 = 3,85$$

$$\text{ICA-PE} = 100 - \sqrt{((12,5)^2 + (3,12)^2 + (3,85)^2)/3} = 92,24$$

RNegr2

$$F1 = (1/8) \times 100 = 12,5$$

$$F2 = (2/32) \times 100 = 6,25$$

Excedentes. Fósforo total

$$\text{Excedente mayo} = (0,094/0,05) - 1 = 0,88$$

$$\text{Excedente dic} = (0,197/0,05) - 1 = 2,94$$

$$\sum \text{Excedentes} = 0,88 + 2,94 = 3,82$$

$$\text{Suma normalizada de excedentes} = 3,82/32 = 0,1194$$

$$F3 = (0,1194/1 + 0,1194) \times 100 = 10,67$$

$$\text{ICA-PE} = 100 - \sqrt{((12,5)^2 + (6,25)^2 + (10,67)^2)/3} = 89,85$$

Año 2020**RNegr1**

$$F1 = (1/8) \times 100 = 12,5$$

$$F2 = (1/16) \times 100 = 6,25$$

Excedentes. Fósforo total

$$\text{Excedente febrero} = (0,133/0,05) - 1 = 1,66$$

$$\text{Suma normalizada de excedentes} = 1,66/16 = 0,104$$

$$F3=(0,104/1+0,104)\times 100=9,42$$

$$ICA-PE=100-\sqrt{((12,5)^2+(6,25)^2+(9,42)^2)/3}=90,27$$

RNegr2

$$F1=(1/8)\times 100=12,5$$

$$F2=(1/16)\times 100=6,25$$

Excedentes. Fósforo total

$$\text{Excedente feb}=(0,172/0,05)-1=2,44$$

$$\text{Suma normalizada de excedentes}=2,44/16=0,1525$$

$$F3=(0,1525/1+0,1525)\times 100=13,23$$

$$ICA-PE=100-\sqrt{((12,5)^2+(6,25)^2+(13,23)^2)/3}=88,89$$

Año 2021

RNegr1

$$F1=(1/8)\times 100=12,5$$

$$F2=(1/24)\times 100=4,17$$

Excedentes. Fósforo total

$$\text{Excedente mayo}=(0,071/0,05)-1=0,42$$

$$\text{Suma normalizada de excedentes}=0,42/24=0,0175$$

$$F3=(0,0175/1+0,0175)\times 100=1,72$$

$$ICA-PE=100-\sqrt{((12,5)^2+(4,17)^2+(1,72)^2)/3}=92,32$$

RNegr2

$$F1=(1/8)\times 100=12,5$$

$$F2=(3/24)\times 100=12,5$$

Excedentes. Fósforo total

$$\text{Excedente mayo-21}=(0,114/0,05)-1=1,28$$

$$\text{Excedente hace-21}=(0,12/0,05)-1=1,4$$

$$\text{Excedente nov-21}=(0,08/0,05)-1=0,6$$

$$\sum \text{Excedentes} = 1,28 + 1,4 + 0,6 = 3,28$$

$$\text{Suma normalizada de excedentes} = 3,28 / 24 = 0,137$$

$$F3 = (0,137(1 + 0,137)) \times 100$$

$$\text{ICA-PE} = 100 - \sqrt{((12,5)^2 + (12,25)^2 + (3,28)^2) / 3} = 87,64$$

Anexo N° 02. Cuestionario a la población

1. ¿Con qué frecuencia utilizas el río Negro para actividades recreativas o de ocio?

- Diariamente
- Semanalmente
- Mensualmente
- Ocasionalmente
- Nunca

2. ¿Qué actividades realizas en el río (natación, pesca, paseos en bote, etc.) y cómo percibes la calidad del agua durante estas actividades?

- Natación
- Pesca
- Mensualmente
- No realizo actividades en el río
- Otros (especificar): _____

3. ¿Has experimentado problemas de salud o molestias relacionadas con el uso del río?

- Si
- No
- No estoy seguro

4. ¿Qué aspectos de la calidad del agua consideras más importantes para garantizar su uso seguro y sostenible?

- Claridad del agua
- Olor del agua
- Sabor del agua
- Presencia de contaminantes visibles
- Niveles de oxígeno disuelto
- Presencia de algas o flora acuática excesiva
- Otros (especificar): _____

5. ¿Has notado cambios en la calidad del agua del río en los últimos años? En caso afirmativo, ¿cuáles?

6. ¿Qué medidas crees que podrían tomarse para mejorar la calidad del agua y la gestión del río Negro?

- | | |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Mejorar el tratamiento de aguas residuales |
| <input type="checkbox"/> | Reducir la contaminación agrícola |
| <input type="checkbox"/> | Implementar programas de educación ambiental |
| <input type="checkbox"/> | Restringir ciertas actividades en áreas sensibles |
| <input type="checkbox"/> | Incrementar la vigilancia y el control de la calidad del agua |
| <input type="checkbox"/> | Otros (especificar): _____ |

Anexo N° 03. Análisis estadístico

Punto: RNegr1

Variable independiente (X): Año

Variable dependiente (Y): ICA-PE (RNegro1)

Regression Statistics	
Multiple R	0.58608173
R Square	0.3434918
Adjusted R Square	0.12465573
Standard Error	1.06768129
Observations	5

Análisis ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	1.78929	1.78929	1.569630654	0.299025396
Residual	3	3.41983	1.13994333		
Total	4	5.20912			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	762.891	681.676083	1.11914004	0.34460987	2932.288533	1406.50653	2932.28853	1406.50653
X Variable 1	0.423	0.33763047	1.25284901	0.299025396	0.651490837	1.49749084	0.65149084	1.49749084

Punto: RNegr2

Variable independiente (X): Año

Variable dependiente (Y): ICA-PE (RNegro2)

Regression Statistics	
Multiple R	0.99714244
R Square	0.99429304
Adjusted R Square	0.98858609

Standard Error	0.118392
Observations	3

Análisis ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	2.44205	2.44205	174.2247325	0.048138923
Residual	1	0.01401667	0.01401667		
Total	2	2.45606667			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	2320.8	169.10	13.724	0.0463	172.19	4469.5	172.19	4469.5
X	-1.105	0.0837	-	0.0481	-	-	-	-
Variable 1		1579	13.199	38923	2.1687	0.0412	2.1687	0.0412
			4217		09955	9004	09955	90045

Anexo N° 04. Panel fotográfico

Fotografía 1 y 2. Aplicación de encuestas a la población afectada.



Fotografía 3 y 4. Visitas realizadas al río Negro.



Jairo Fernandez D

Fotografía 5. Capacitación sobre la calidad del agua a la población afectada.



Jairo Fernandez D

Jairo Elvin Fernández Dávila

Predicción de la dinámica de uso del río Negro a través del modelamiento de la calidad del agua al 2030

 UNIDAD DE INVESTIGACIÓN - FACULTAD DE ECOLOGIA

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:527909502

Fecha de entrega

14 nov 2025, 11:00 GMT-5

Fecha de descarga

14 nov 2025, 11:05 GMT-5

Nombre del archivo

TESIS_JAIRO ELVIN FERNANDEZ DAVILA - CORREGIDO.docx

Tamaño del archivo

1.3 MB

78 páginas

18.479 palabras

102.091 caracteres




19% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 15%  Fuentes de Internet
- 9%  Publicaciones
- 14%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.