



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO SANTA BÁRBARA DERIVADA DE LA ACTIVIDAD MINERA, UN ENFOQUE INTEGRAL A TRAVÉS DEL MONITOREO DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS, MICROBIOLÓGICOS Y BIOINDICADORES.”

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera Ambiental

AUTORAS: MARÍA DEL CARMEN SAGBAICELA SALINAS
MIRIAM ESTEFANÍA FAJARDO ZAMORA
TUTORA: ING. PAOLA JACKELINE DUQUE SARANGO, PhD.

Cuenca - Ecuador
2025

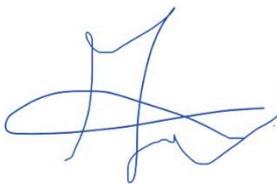
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotras, María del Carmen Sagbaicela Salinas con documento de identificación N° 0105806871 y Miriam Estefanía Fajardo Zamora con documento de identificación N° 0106095573; manifestamos que:

Somos las autoras y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 24 de febrero del 2025

Atentamente,



María del Carmen Sagbaicela Salinas

0105806871



Miriam Estefanía Fajardo Zamora

0106095573

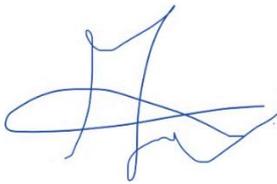
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotras, María del Carmen Sagbaicela Salinas con documento de identificación N° 0105806871 y Miriam Estefanía Fajardo Zamora con documento de identificación N° 0106095573, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autoras del Trabajo experimental: “Evaluación de la contaminación hídrica en la cuenca del río Santa Bárbara derivada de la actividad minera, un enfoque integral a través del monitoreo de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y bioindicadores.”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Ambiental, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 24 de febrero del 2025

Atentamente,



María del Carmen Sagbaicela Salinas

0105806871



Miriam Estefanía Fajardo Zamora

0106095573

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Paola Jackeline Duque Sarango con documento de identificación N° 1104257835, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO SANTA BÁRBARA DERIVADA DE LA ACTIVIDAD MINERA, UN ENFOQUE INTEGRAL A TRAVÉS DEL MONITOREO DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS, MICROBIOLÓGICOS Y BIOINDICADORES.”, realizado por María del Carmen Sagbaicela Salinas con documento de identificación N° 0105806871 y por Miriam Estefanía Fajardo Zamora con documento de identificación N° 0106095573, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 24 de febrero del 2025

Atentamente,



Ing. Paola Jackeline Duque Sarango, PhD.

1104257835

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres: a mi querida mamá, por ser mi faro en los momentos difíciles, mi apoyo incondicional y el mayor ejemplo de fortaleza y amor; a mi papá, porque, a pesar de la distancia, su confianza y palabras de ánimo me han impulsado a seguir mis sueños. A mi hermano Sebastián, porque, aunque la vida nos haya separado por kilómetros, siempre ha estado cerca de mi corazón y su ejemplo de perseverancia me inspira. A mi pequeño Matías, por su alegría y compañía, que iluminan mis días. Mi abuelita, por su amor inquebrantable y sus oraciones, que me acompañan siempre, Gracias por pedir a Dios que me cuide y por ser un pilar de fe y amor en nuestra familia. A mis niños José, Carlos y Holger por sus llamadas llenas de cariño y sus sabios consejos. Finalmente, agradezco a quien ha estado a mi lado ayudándome y apoyándome a seguir adelante. Su apoyo y amistad han dejado una huella imborrable en mi vida. Y a todos quienes, de alguna manera, han contribuido a este camino, les expreso mi más profundo agradecimiento.

María del Carmen

Dedicatoria

Este trabajo está realizado con esfuerzo y sacrificio dedicado para toda mi familia, amigos que de manera directa me ayudaron y gracias al apoyo cumplí mi sueño el cual se hizo real. A mis padres Miryam Zamora Yumbra y Juan Carlos Fajardo, gracias por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificio a lo largo de este camino, su confianza depositada en mí ha sido mi mayor fuente de inspiración. A mi Abuelita Eva Yumbra Torres que es la mujer que más admiro que con su amor y sabiduría me ha enseñado a enfrentar la vida. A mis hermanos Christian Fernando Zhiminaicela y Allison Fajardo gracias por siempre confiar en mí y motivarme a seguir adelante. A mi tío Patricio Zamora por su sabiduría y su incansable apoyo tiene una parte de mi corazón. A mi tía Mery Zamora que no solo me ha enseñado a ser fuerte, sino también a soñar. A mi Primo Elvis Zamora por siempre pensar en nosotros. A mi Prima Maite gracias por volver a alegrar mi vida. A mis Tías Karina y Alejandra siempre estarán presentes

Miriam

Agradecimiento

En primer lugar, agradecemos a Dios por habernos dado la oportunidad de estudiar y vivir una enriquecedora experiencia en la Universidad Politécnica Salesiana. Gracias por brindarnos un espacio lleno de oportunidades para nuestro crecimiento y aprendizaje. Extendemos nuestro agradecimiento a los docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental por su paciencia y por las valiosas enseñanzas impartidas a lo largo de nuestra formación. De manera especial, agradecemos a la Inge. Paola Duque por ser nuestra tutora, por el tiempo y esfuerzo que dedicó a guiarnos y apoyarnos con su conocimiento, el cual ha sido clave en este proceso académico. Su orientación ha sido fundamental para nuestro desarrollo profesional y en la realización de este trabajo de titulación. También queremos expresar nuestro agradecimiento a nuestros amigos, quienes nos han brindado su apoyo, compañía y motivación en todo momento. Su amistad ha sido un pilar esencial a lo largo de este recorrido.

Maria del Carmen y Miriam

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	17
1.1	Antecedentes.....	17
1.2	Justificación	19
1.3	Delimitación del área de estudio.....	20
2	OBJETIVOS	22
2.1.1	<i>Objetivo General</i>	22
2.1.2	<i>Objetivo Específico</i>	22
3	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	23
3.1	<i>Definiciones</i>	23
3.1.1	<i>Cuenca hidrográfica</i>	23
3.2	<i>Partes de una cuenca</i>	23
3.3	<i>Características morfométricas de una cuenca</i>	24
3.3.1	<i>Parámetros generales</i>	24
3.3.2	<i>Parámetros de forma</i>	27
3.4	<i>Calidad de agua</i>	29
3.5	<i>Índice de calidad de agua (ICA)</i>	30
3.5.1	<i>Índice por la fundación de los Estados Unidos (ICA – NSF)</i>	30
3.6	<i>Parámetros físicos, químicos y microbiológicos que considera el (ICA – NSF)</i>	31
3.6.1	<i>Cambio de Temperatura – CT (°C)</i>	31
3.6.2	<i>Sólidos Disueltos Totales– SDT (mg/L)</i>	32
3.6.3	<i>Turbiedad – T (NTU)</i>	32
3.6.4	<i>Potencial de hidrógeno – pH (Unidades de pH)</i>	33

3.6.5	<i>Oxígeno Disuelto – OD (% de saturación)</i>	34
3.6.6	<i>Demanda bioquímica de oxígeno- DBO5 (mg/L)</i>	36
3.6.7	<i>Nitratos – NO3 (mg/L)</i>	37
3.6.8	<i>Fosfatos – PO4 (mg/L)</i>	38
3.6.9	<i>Coliformes fecales – NMP (colonias/100mL)</i>	39
3.7	<i>Cálculo del Índice de la Fundación Nacional de Saneamiento</i>	40
3.8	<i>Macro invertebrados acuáticos</i>	43
3.8.1	<i>Índice BMWP / Col y ASPT</i>	44
3.8.2	<i>Índice de Ephemeroptera, Plecóptera, Thichoptera (ETP)</i>	46
3.9	<i>Contaminación por actividad minera</i>	48
3.10	<i>Metales pesados</i>	48
3.11	Texto unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente	49
3.12	<i>Análisis estadísticos de datos mediante modelos de dispersión</i>	50
3.12.1	<i>Modelos de dispersión y su importancia en la evaluación de contaminantes</i> 51	
4	MATERIALES Y MÉTODOS	51
4.1	<i>Metodología</i>	51
4.2	<i>Delimitación de la Subcuenca del Rio Santa Barbara</i>	52
4.3	<i>Características morfométricas</i>	53
4.3.1	<i>Parámetros generales</i>	53
4.4	<i>Georreferenciación</i>	54
4.4.1	<i>Georreferenciación para el análisis de metales pesados en la cuenca del río Santa Bárbara</i> 54	

4.4.1.1	<i>Definición de puntos de muestreo</i>	54
4.5	<i>Georreferenciación de la red hídrica que alimenta el rio Santa Bárbara</i>	55
4.5.1	<i>Identificación de afluentes</i>	55
4.5.2	<i>Análisis de redes de flujo</i>	55
4.6	<i>Normas INEN para la Recolección de Muestras: Guía, Técnica y Requisitos</i> ...	56
4.6.1	<i>Determinación del índice de calidad del agua (ICA – NSF)</i>	58
4.6.2	<i>Materiales y equipos</i>	58
4.7	<i>Toma de muestras</i>	58
4.8	<i>Conservación y transporte de las muestras</i>	60
4.8.1	<i>Periodo y frecuencia de monitoreo</i>	60
4.8.2	<i>Métodos utilizados para medir los parámetros fisicoquímico y microbiológico</i>	61
4.9	<i>Análisis de los parámetros fisicoquímicos en laboratorio</i>	62
4.9.1	<i>Análisis de los parámetros físicos</i>	62
4.10	<i>Análisis de los parámetros químicos</i>	65
4.11	<i>Análisis de los parámetros microbiológicos</i>	68
4.12	<i>Análisis y métodos para la identificación de macroinvertebrados</i>	69
4.12.1	<i>Recolección de macroinvertebrados</i>	70
4.12.2	<i>Proceso de identificación de macroinvertebrados en laboratorio</i>	70
4.12.3	<i>Cálculos de Índice BMWP/COL</i>	71
4.12.4	<i>Índice de Ephemeroptera, Plecoteptra, Thichoptera (ETP)</i>	71
4.12.5	<i>Recopilación de datos ETAPA</i>	72

5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	72
5.1	Delimitación del área de estudio	72
5.2	Distancia entre puntos de muestreo.....	73
5.3	Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.....	73
5.4	Análisis del índice de calidad de agua	74
5.5	Análisis físico-químico	75
5.5.1	Índice de Calidad de Agua en la Zona Minera	86
5.5.2	Índice de Calidad de agua en la Zona Urbana	89
5.5.3	Índice de Calidad de agua en la Zona Rural.....	91
5.6	Cuantificación de parámetros para evaluar la calidad de agua mediante ICA. 94	
5.7	Metales Pesados.....	104
5.8	Análisis de datos de la Cuenca del Rio Santa Barbara frente a los criterios de calidad del agua en el TULSMA Libro VI, Anexo 1.	104
5.8.1	Análisis comparativo entre la Normativa Ambiental vigente y los resultados obtenidos en la Zona Minera.....	105
5.8.2	Análisis comparativo entre la Normativa Ambiental vigente y los resultados obtenidos en la Zona Urbana	106
5.8.3	Análisis comparativo entre la Normativa Ambiental vigente y los resultados obtenidos en la Zona Rural.....	107
5.8.4	Análisis macroinvertebrados	108
6	CONCLUSIONES RECOMENDACIONES	112
6.1	Conclusiones	112
6.2	Recomendaciones.....	113
7	BIBLIOGRAFÍA.....	114

8 ANEXOS.....	122
Anexo: 1Tabla de datos físico-químicos	122
Anexo: 2Zona Minera _M1.....	124
Anexo: 3 Zona Urbana_M2.....	125
Anexo: 4 Zona Rural _M3	126
Anexo: 5 Tablas de cálculo del índice de calidad ICA-NSF_ campaña 1	127
Anexo: 6 Tablas de cálculo del índice de calidad ICA-NSF_ campaña 2	128
Anexo: 7 Tablas de cálculo del índice de calidad ICA-NSF_ campaña 3	129
Anexo: 8 Tablas de cálculo del índice de calidad ICA-NSF_ campaña 4	130
Anexo: 9 Resultados de metales pesados otorgados por ETAPA.....	131
Anexo: 10 Análisis de metales pesados_ cianuro.....	132
Anexo: 11 Análisis de metales pesados_ sustancias solubles al hexano.....	132
Anexo: 13 Análisis de metales pesados_ mercurio	133
Anexo: 14 Análisis de metales pesados_ plata.....	133
Anexo: 15 Análisis de metales pesados_ plomo	134
Anexo: 16 modelo de dispersión mercurio	135
Anexo: 17 modelo de dispersión plata.....	136
Anexo: 18 modelo de dispersión plomo	137

LISTADO DE FIGURAS

Figura: 1 Partes de una cuenca hidrográfica	24
Figura: 2 Divisorias de aguas	25
Figura: 3 Longitud axial	26
Figura: 4 Valoración de la calidad de agua en función de la Temperatura.....	31
Figura: 5 Valoración de la calidad del agua en función del Residuo Total.....	32
Figura: 6 Valoración de la calidad de agua en función de la Turbidez	33
Figura: 7 Valoración de la calidad de agua en función del pH	34
Figura: 8 Valoración de la calidad de agua en función del % de Saturación del Oxígeno	36
Figura: 9 Valoración de la calidad de agua en función de la $[[\text{DBO}]]_{-5}$	37
Figura: 10 Valoración de la calidad de agua en función del Nitrógeno.....	38
Figura: 11 Valoración de la calidad de agua en función del Fósforo	39
Figura: 12 Valoración de la calidad de agua en función de Coliformes Fecales	40
Figura: 13 Esquema de metodología	52
Figura: 14 Área, perímetro y longitud del cauce principal de la cuenca del río Santa Barbara	53
Figura: 15 Toma de muestras de agua en el río Santa Barbara	59
Figura: 16 Solidos Disueltos Totales	63
Figura: 17 Turbidez.....	64
Figura: 18 pH – ex situ.....	65
Figura: 19 Oxígeno Disuelto	66

Figura: 20 Fosfato	67
Figura: 21 Nitrato	68
Figura: 22 Coliformes Totales	69
Figura: 23 Red Surber	69
Figura: 24 Macroinvertebrados recolectados	70
Figura: 25 ESTEROESCOPIO	71
Figura: 26 Análisis físico-químico-Temperatura	75
Figura: 27 Análisis físico-químico-pH	77
Figura: 28 Análisis físico-químico-Turbidez	79
Figura: 29 Análisis físico-químico-SDT.....	81
Figura: 30 Análisis físico-químico-OD.....	83
Figura: 31 Índice de calidad de agua zona minera	86
Figura: 32 : Índice de calidad de agua zona urbana	89
Figura: 33 Índice de calidad de agua zona rural.....	91
Figura: 34 índice de Calidad de Agua	93
Figura: 35 Cambio de Temperatura- ICA.....	94
Figura: 36 Turbidez - ICA	95
Figura: 37 Solidos Disueltos Totales - ICA.....	96
Figura: 38 pH - ICA.....	97
Figura: 39 Oxígeno Disuelto - ICA.....	98
Figura: 40 DBO5 - ICA.....	99
Figura: 41 Nitratos - ICA	100

Figura: 42 Fosfatos - ICA.....	101
Figura: 43 Coliformes Totales - ICA	103
Figura: 44 Índice BMWP/Col	108

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Ubicación geográfica de la cuenca del Río Santa Barbara	21
Tabla 2: Área de una cuenca	25
Tabla 3: Clasificación e interpretación ambiental del coeficiente de compacidad de Gravelius.....	28
Tabla 4: Factor de forma según Horton.	28
Tabla 5: Rangos de los índices de alargamiento y sus respectivas clases.....	29
Tabla 6: Solubilidad del Oxígeno en Agua Dulce	35
Tabla 7: Pesos relativos para cada parámetro del “ICA”	41
Tabla 8: CLASIFICACION DEL “ICA” PROPUESTO POR BROWN.....	42
Tabla 9: Índice biótico BMWP/Col.....	45
Tabla 10: Clases de calidad y los valores asignados al BMWP/Bol.....	45
Tabla 11: Ponderación para el índice EPT	47
Tabla 12: Efectos de metales pesados.....	49
Tabla 13: Normativa Ambiental Vigente Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce	50
Tabla 14: <i>Coordenadas y ubicación de puntos</i>	55
Tabla 15: Descripción para la conservación de muestras en los diferentes parámetros que se van analizar.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 16: Tiempos de Recolección de Muestras	59

Tabla 17: Frecuencia de Muestreo.....	61
Tabla 18: Métodos para el análisis de los parámetros físico-químicos y microbiológicos	61
Tabla 19: Características morfométricas de la cuenca	72
Tabla 20: Parámetros físico-químico y microbiológico del río Santa Barbara.....	¡Error!
Marcador no definido.	
Tabla 21: Comparación de la normativa vigente con los resultados de la Zona Minera	105
Tabla 22: Comparación de la normativa vigente con los resultados de la Zona Urbana	106
Tabla 23: Comparación de la normativa vigente con los resultados de la Zona Rural..	107

LISTADO DE MAPAS

Mapa 1: Subcuenca del río Santa Barbara	21
Mapa 2: Distancia entre puntos de muestreo	73

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En Ecuador la minería ha existido durante varios años que se remonta a la época precolombina, cuando las civilizaciones indígenas y cañaris extraían metales como el oro y plata, siendo modo de vida y subsistencias de varias familias (Estupiñán et al., 2021). Sin embargo, a fines del siglo XIX e inicios del siglo XX la minería ha tomado una gran escala al explorar y desarrollar yacimientos de minerales en diferentes provincias del país como Manabí, Esmeraldas, Cañar y Azuay con actividades de cobre y oro.

Donde ha generado diferentes impactos económicos, sociales y ambientales a lo largo de los años siendo tema de controversia debido a los impactos en el medio ambiente. (“La Contaminación Ambiental Ocasionada Por La Minería En La Provincia de El Oro,” 2020). Desde inicios del siglo XX, tanto las empresas extranjeras y nacionales han estado explotando minerales metálicos principalmente el oro, en la zona de Zaruma y Portovelo, al sudoeste del país. Esta actividad se ha llevado a cabo en forma simultánea con el aprovechamiento de placeres auríferos por parte de pobladores locales, entre ellos comunidades indígenas.

Según el (Banco Central del Ecuador, 2020) en el último boletín minero en Ecuador se ha incrementado la superficie total concesionada para minería metálica, donde están distribuidas en las siete provincias del país, así mismo según él (MINEM, 2022) la inversión en los proyectos de minería en Ecuador podría estar experimentando un aumento significativo, por lo que ha provocado un gran problema por contaminación de metales pesados como fuentes de aguas, degradación del suelo, deforestación y pérdida de

biodiversidad, generación de desechos que suelen contener sustancias tóxicas y residuos químicos que presentan un riesgo para la salud humana, el medio ambiente que se han visto reflejados en la Provincia del Azuay.

En Ecuador, se ha observado un incremento significativo en las actividades mineras, muchas de las cuales operan fuera del marco legal. La minería artesanal o ilegal, ha provocado un aumento alarmante de la contaminación por metales pesados, afectando gravemente a las áreas adyacentes a ríos o afluentes. En particular la minería artesanal se ha establecido en la parte más alta de la cuenca del río Santa Bárbara, donde tiene un impacto devastador sobre el medio ambiente (Reyes et al., 2016).

A pesar de los intentos del gobierno por regular la actividad minera, la insuficiencia de infraestructura y recursos para supervisar y controlar las operaciones ha permitido que la minería ilegal prospere. Los mineros ilegales, atraídos por la promesa de ingresos rápidos, comenzaron a explotar depósitos minerales sin permisos adecuados. Utilizando métodos rudimentarios que no solo pone en riesgo la seguridad personal, sino que genera un daño significativo al ecosistema circundante (Duque & et. al., 2022; Duque-Sarango, Cajamarca-Rivadeneira, et al., 2019b, 2019a).

Este estudio se realizó, para evaluar los impactos ambientales generados por la minería ilegal en el río Santa Bárbara, particularmente en el cantón Sígig, Azuay. La minería ilegal en este cantón se ha alterado significativamente el curso de los ríos, ha afectado áreas de conservación como el bosque protector de Infiernillos y ha provocado la pérdida de vegetación y la contaminación del agua debido al manejo inapropiado de los recursos. La razón fundamental para realizar este estudio radica en los graves problemas ambientales que la minería ilegal está ocasionando, a pesar de los esfuerzos gubernamentales para controlar la actividad, como el cierre de rutas y los operativos de

seguridad. Estos esfuerzos se han visto limitados por la resistencia de los mineros, quienes continúan buscando formas de acceder a la zona con maquinaria pesada. Este estudio tiene como objetivo proporcionar datos científicos que ayuden a comprender la magnitud de los impactos de la minería ilegal en los recursos hídricos con la finalidad de ofrecer soluciones efectivas para mitigar los daños y preservar la integridad ambiental de un ecosistema crucial para la región.

1.2 Justificación

El Gobierno Nacional decidió impulsar la industria minera, destacando el potencial del país con reservas de oro, plata y cobre, además de empleo y recursos diversos. Por ello, creó el Ministerio de Minería mediante el Decreto Ejecutivo 578 (13 de febrero de 2015) para regular y promover esta actividad con principios de sostenibilidad y eficiencia. (Banco Central del Ecuador, 2020)

En los últimos años, el país se ha enfrentado a terribles efectos de contaminación medioambiental y de salud a causa de la minería. Aunque las tecnologías pueden reducir o minimizar los riesgos, pero no pueden evitar que exista un impacto medioambiental. (“La Contaminación Ambiental Ocasionada Por La Minería En La Provincia de El Oro,” 2020). La minería ha aumentado considerablemente en Ecuador, provocando una gran contaminación debido al uso de metales pesados en sus procesos. Una de las áreas más afectadas es la provincia del Azuay (Duque-Sarango, P., & Hernández, 2020; Duque-Sarango & Pinos, 2022). Esta actividad es la principal causante de graves problemas en los sectores cercanos a ríos y afluentes, como ocurre en la cuenca alta del Río Santa Bárbara en el cantón Sígfig, que contribuye a la Cordillera Oriental con una altitud 2.587 m.s.n.m. (GAD Parroquial Cuchil , 2019)

La minería es una actividad que genera un impacto significativo en el medio ambiente, especialmente en los recursos hídricos. La liberación de metales pesados como mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb) y plata (Ag), así como sustancias solubles en hexano, pueden contaminar ríos, suelos y ecosistemas, afectando la biodiversidad y la calidad del agua.

Al realizar el estudio de la calidad del agua del Río Santa Barbara, se busca determinar la contaminación por metales pesados y solubles en este recurso hídrico. Este análisis proporciona datos esenciales para comprender los procesos de dispersión de los contaminantes y evaluar las afecciones a esta fuente, que se utiliza tanto para actividades recreativas y como para abrevadero.

1.3 Delimitación del área de estudio

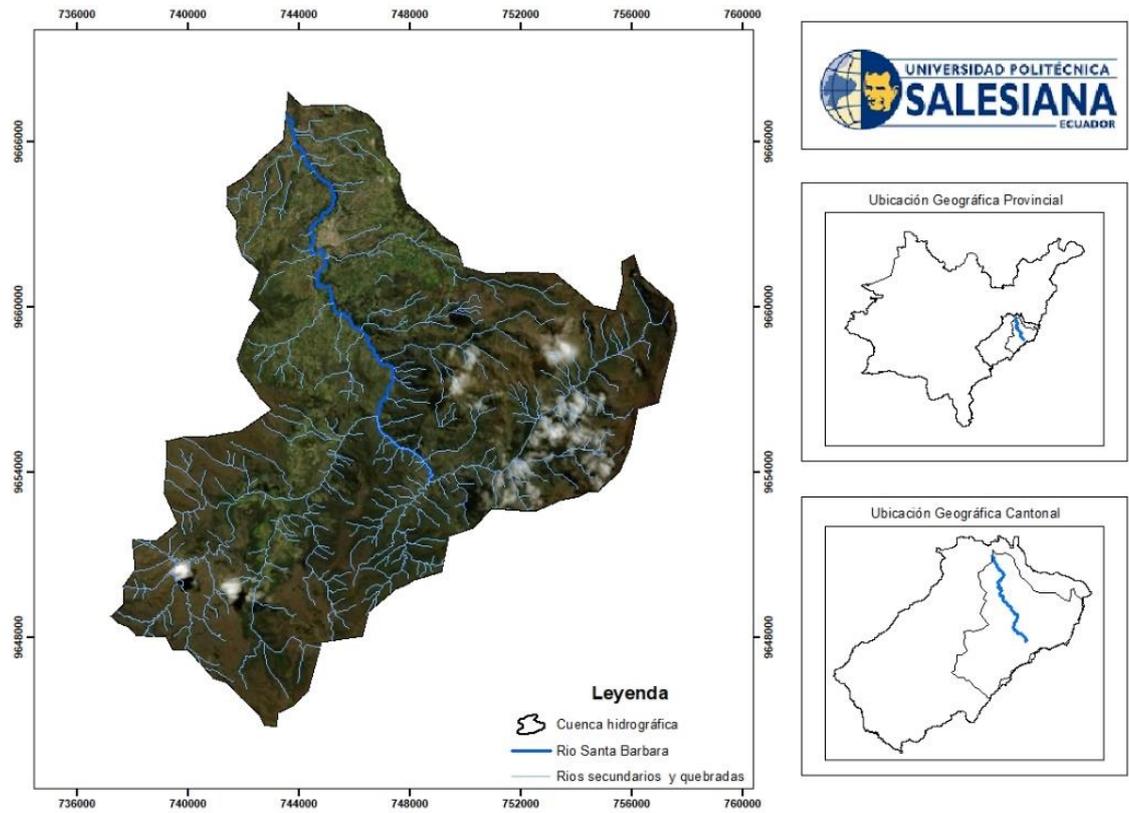
El Río Santa Barbara, localizado en el cantón Sigsig de la provincia del Azuay, Ecuador, es una de las microcuencas que forman parte de la cuenca hidrográfica que desemboca en el río Paute, uno de los principales afluentes del río Santiago, el cual finalmente fluye hacia el río Amazonas. Esta microcuenca incluye varias subcuencas más pequeñas que drenan agua hacia el río principal. (Ecuador Travel, 2023)

La cuenca del río Santa Barbara es una de las más importantes en la región debido a su contribución en varios aspectos ambientales y socioeconómicos. Desempeña un papel fundamental como fuente para el consumo humano y agrícola siendo esencial para el riego de cultivos y, por ende, para la economía agrícola de la región. Además, su caudal contribuye al flujo del río Paute, crucial para la generación de energía eléctrica en una de las hidroeléctricas más importantes del país. (Vargas-Velázquez, 2010)

La belleza natural de la microcuenca del río Santa Barbara atrae a turistas y ofrece oportunidades para actividades recreativas como la pesca y el senderismo lo cual,

beneficiando así a la economía local (Duque-Sarango, Patiño, et al., 2019; Duque-Sarango & Zagal-Andrade, 2023).

Mapa 1: Subcuenca del río Santa Barbara



Fuente: Elaboración propia

Esta subcuenca esta se encuentra en las coordenadas geográficas que se detallan en la siguiente tabla (tabla 1)

Tabla 1: Ubicación geográfica de la cuenca del Río Santa Barbara

COORDENADA “X” DEL CENTROIDE	COORDENADA “Y” DEL CENTROIDE
747576.40	9683627.20
Sistema de coordenadas UTM elipsoide WGS84 Zona 17sur	

Fuente: Elaboración propia

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar la contaminación del recurso hídrico en la cuenca del río Santa Bárbara derivada de la actividad minera, mediante el monitoreo de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, bioindicadores (macroinvertebrados) y la aplicación de un modelo de dispersión para analizar el transporte de contaminantes.

2.2 Objetivo Específico

- Evaluar la calidad del agua en la zona de estudio de la cuenca del Rio Santa Barbara mediante la medición de parámetros fisicoquímicos y la aplicación del índice de Calidad de Agua (ICA).
- Cuantificar la concentración de metales pesados y otros (**Cianuro, Mercurio, Plomo, Plata, Sustancias solubles en hexano**) en los puntos seleccionados identificando las principales fuentes de contaminación asociadas a la actividad minera.
- Contrastar los resultados de calidad de agua mediante al análisis de macro invertebrados vs parámetros físicos químicos analizados anteriormente.

3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 Definiciones

3.2 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica, también llamada cuenca de drenaje o fluvial, es la unidad territorial que recoge y conduce el agua superficial hacia un río, quebrada u otro cuerpo receptor.

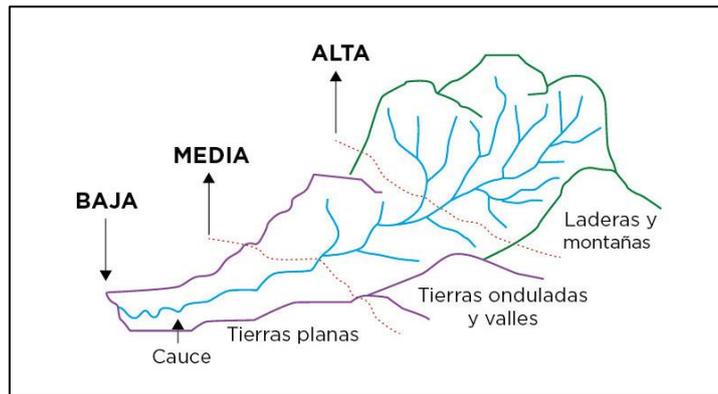
Factores como la calidad del agua, la precipitación, la infiltración del suelo y la integración entre la vegetación y el sustrato influyen en los procesos que determinan la funcionalidad y residencia de ecosistemas de la cuenca.

3.3 Partes de una cuenca

Una cuenca hidrográfica es una unidad territorial que capta y conduce el flujo de agua hacia un punto de salida común, como un drenaje concentrado. Puede integrarse en una cuenca mayor e incluir subcuencas. Sus límites, denominados divisorias de drenaje, define el área, mientras que el punto de salida corresponde al punto más bajo donde el agua abandona la cuenca.(Ordoñez, 2011)

- Cuenca alta: se caracteriza por áreas montañosas con pendientes elevadas, valles estrechos y procesos fluviales erosivos.
- Cuenca media: Presenta un cauce principal más definido, pendientes menos abruptas y moderados procesos erosivos, recibiendo aportes de cauces menores.
- Cuenca baja: Cambio abrupto de pendiente, en el río desemboca en zonas bajas con un curso sinuoso, predominando la sedimentación.(F. J. Gaspari et al., 2020)

Figura: 1 Partes de una cuenca hidrográfica



Fuente: (Emaze, 2013)

3.4 Características morfométricas de una cuenca

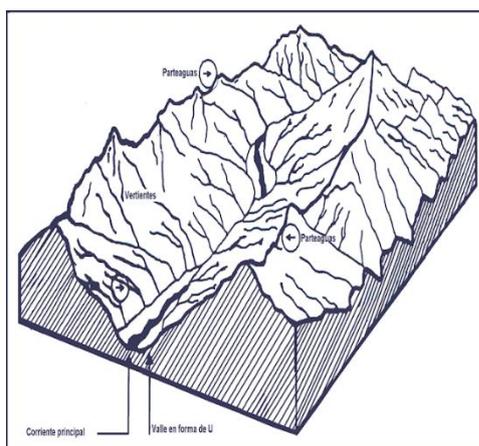
Son medidas cuantitativas que describen (forma de una cuenca, relieve, la red de drenaje, etc.). Estas características son esenciales para comprender el comportamiento de la cuenca (Obi Reddy et al., 2004a).

3.5 Parámetros generales

3.5.1.1 Divisorias de aguas topográficas o parteaguas

Las divisorias topográficas o parteaguas son líneas imaginarias que delimitan las cuencas hidrográficas, separando las aguas que fluyen hacia diferentes ríos, lagos u océanos. Estas divisorias se ubican en los puntos más altos del terreno y definen las áreas de captación de agua de cada cuenca. (Obi Reddy et al., 2004)

Figura: 2 Divisorias de aguas



Fuente: (Vásquez V. , 2015)

3.5.1.2 Área de la cuenca

Influye en la cantidad y velocidad de agua que puede acumularse y fluir a través de ella en proyección horizontal sobre el cual cae las gotas de lluvia(Allen, 2007). Según el tamaño del área de la cuenca puede variar cuenca, subcuenca o microcuenca.(AGUA.org.mx, 2016) consultar la (Tabla 2).

Tabla 2:Área de una cuenca

ÁREA (Km2)	NOMBRE
< 5	Unidad
5-20	Sector
20-100	Microcuenca
100-300	Subcuenca
>300	Cuenca

Fuente: (Global Water Partnership (GWP), 2018)

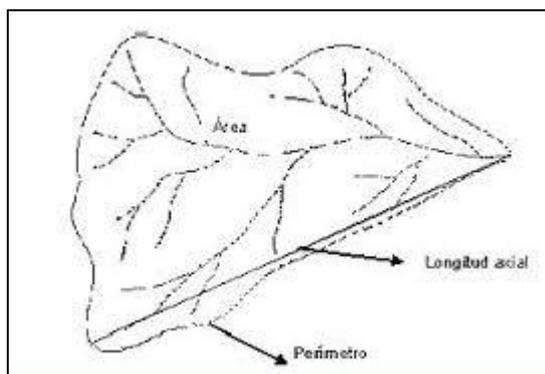
3.5.1.3 Perímetro (P) (Km)

Corresponde a la extensión de la línea que delimita la cuenca hidrográfica, siguiendo la divisoria topográfica de agua.(Camino et al., 2018)

3.5.1.4 Longitud axial (La) (Km)

Es la distancia entre la desembocadura y el punto más lejano de la divisoria de aguas de la cuenca, definida como la longitud de la línea recta que une los extremos de la cuenca de manera paralela al curso principal (F. Gaspari et al., 2012)

Figura: 3 Longitud axial



Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA), 2020)

3.5.1.5 Longitud de la corriente principal

Es la distancia desde el punto de salida en la cota más baja de la cuenca hasta el punto más alto donde se origina el cauce principal.(Breña & Jacobo, 2006)

3.5.1.6 Ancho

Es la relación geométrica entre el área y la longitud de la cuenca.(Camino et al., 2018)

3.5.1.7 Desnivel altitudinal

El Desnivel altitudinal (DA), se define como la diferencia entre la cota más alta y la más baja de la cuenca, expresando ($DA = H_{Max} - H_{min}$). (García García et al., 2021a)

$$DA = HM - Hm$$

Donde:

DA: Desnivel altitudinal, en msnm

HM: Altura máxima, en msnm

Hm: Altura mínima, en msnm

3.6 Parámetros de forma

3.6.1.1 Forma de una cuenca

Es un factor adimensional que describe la regulación de la concentración del escurrimiento superficial en la cuenca hidrográfica, utilizando índices como los de Gravelius y el de Horton para analizar su forma. (Camino et al., 2018)

3.6.1.2 Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad

Es una medida utilizada en hidrología para evaluar la forma de una cuenca hidrográfica. Este índice proporciona una indicación de cuán compacta es una cuenca en comparación con un círculo, que es el más compacta posible. (García García et al., 2021b)

Se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi} * A}$$

Donde:

K_c : Factor de compacidad.

P: Perímetro de la cuenca (km).

A: Área total de la cuenca (km²).

Un coeficiente de Gravelius igual a 1 indica que la cuenca tiene la forma de un círculo perfecto. Valores mayores a 1 indican que la cuenca es menos compacta y tiene una forma más alargada o irregular. (Matovelle & Heras, 2020)

Los valores interpretativos del factor de forma de Horton, pueden verse en la Tabla 3:

Tabla 3: Clasificación e interpretación ambiental del coeficiente de compacidad de Gravelius.

kc	Clasificación	Interpretación ambiental
1 a 1,25	Casi redonda a oval-redonda	Alta tendencia a inundaciones
1,25 a 1,5	Oval redonda a oval-alargada	Mediana tendencia a inundaciones
1,5 a 1,75	Oval alargada a alargada	Baja tendencia a la inundación
>1,75	Alargada	Cuencas propensas a conservación

Fuente: (Gaspari, Díaz , Delgado, & Senisterra, 2015)

3.6.1.3 Factor de forma de Horton

Es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca.

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

A: Área total de la cuenca (km²).

Lc: Longitud del cauce de la cuenca (Km)

Tabla 4: Factor de forma según Horton.

Valores Aproximados	Forma de la Cuenca
< 0.22	Muy alargada
0.22 – 0.300	Alargada
0.300 – 0.37	Ligeramente alargada
0.37 – 0.450	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 – 0.80	Ensanchada
0.80 – 1.20	Muy ensanchada
> 1.200	Rodeando el desague

Fuente: (Ortiz Vera, 2004)

Este índice mide cuán cuadra o alargada es una cuenca. Una cuenca con un factor de forma bajo esta menos expuesta a crecidas que una igual área, pero con un factor de forma más alto.

3.6.1.4 Índice de alargamiento

Este índice relaciona la longitud del cauce principal de la cuenca con su ancho máximo medio. Si el valor es significativamente mayor a uno, la cuenca se considera alargada; si es menor a uno, se considera achatada (da Cunha & Bacani, 2016)

$$I_a = \frac{L_a}{W}$$

Donde:

Ia: Índice de alargamiento.

W: Ancho de la cuenca en (Km).

La: Longitud axial de la cuenca en (Km).

Tabla 5: Rangos de los índices de alargamiento y sus respectivas clases.

Rangos de (Ia)	Clases de alargamiento
0,0 – 1,4	Poco alargada
1,5 – 2,8	Moderadamente alargada
2,9 – 4,2	Muy alargada

Fuente: (Aranda, 1992)

3.7 Calidad de agua

La calidad de agua, según la OMS y otros organismos internacionales, se refieren a las condiciones físicas, químicas y biológicas del agua, tanto en su estado natural como después de haber sido alterada por la actividad humana. Tradicionalmente, este concepto se ha asociado principalmente al uso de consumo de humano, riego agrícola, la recreación o el hábitat de la vida silvestre. Se puede definir la calidad de agua en función de ello.(Vásquez et al., 2006)

El deterioro de la calidad de agua es una preocupación mundial creciente, impulsada por el aumento de la población, la expansión de las actividades industriales y agrícolas, y el impacto del cambio climático, que este alterando significativamente el ciclo hidrológico. (Banco Mundial, 2011)

El Desarrollo Mundial del Agua 2012 de United Nations – Water resalta que la mala calidad del agua generada elevados costos económicos, incluyendo la degradación de los servicios eco sistemáticos, gastos en salud, efectos negativos sobre las actividades económicas y el incremento de los costos de tratamiento.

3.8 Índice de calidad de agua (ICA)

3.9 Índice por la fundación de los Estados Unidos (ICA – NSF)

El índice de calidad de agua (ICA) creado por la fundación Nacional de Sanidad (NSF) de los Estados Unidos, tiene sus orígenes en la década de 1970, cuando se empleó la técnica de investigación Delphi de la Rand Corporation.(Marselina et al., 2022). El ICA es uno de los índices más utilizados para evaluar la calidad del agua. Permite medir cambios en la calidad a lo largo del tiempo en tramos específicos de ríos, comparando diferentes secciones del mismo río o entre ríos. Los resultados indican si un tramo de río es saludable, lo que es clave para la gestión y protección de los recursos hídricos.

Para la determinación del ICA interviene 9 parámetros entre los cuales son ocho fisicoquímicos: pH, DBO₅ (mg/L), Nitratos (NO_4), Fosfatos (PO_4), Turbiedad (NTU), Sólidos Disueltos Totales (mg/L), Cambio de temperatura (°C), Oxígeno Disuelto (O_2), y un parámetro microbiológico Coliformes Fecales (NMP (colonias/100mL)). (SNET, 2016)

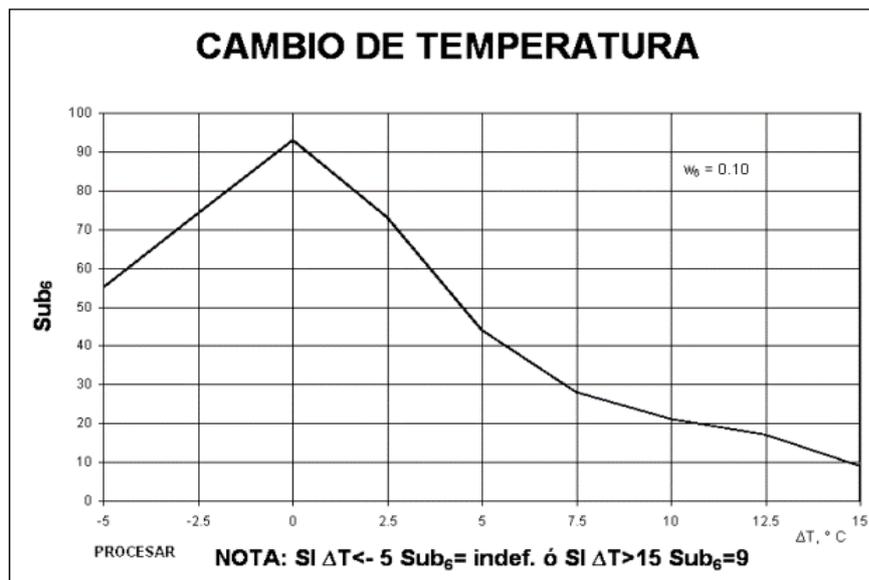
3.10 Parámetros físicos, químicos y microbiológicos que considera el (ICA – NSF)

3.11 Cambio de Temperatura – CT (°C)

La temperatura del agua es clave para la solubilidad del oxígeno y los procesos biológicos acuáticos. A temperaturas más altas, el agua retiene menos oxígeno debido al aumento en la velocidad de las moléculas. En temperaturas bajas, el agua se vuelve más densa y retiene más oxígeno. Además, la temperatura afecta otras mediciones como alcalinidad, conductividad eléctrica, actividad biológica y oxígeno disuelto.

Es necesario calcular el criterio de grado térmico, que se considera tanto temperatura ambiente ($T_{ambiente}$) y la temperatura muestra ($T_{muestra}$). Si la diferencia es mayor a 15°C, el valor de (Sub5) es igual a 9. Si la diferencia es menor de 15°C, se utiliza el valor en el eje X de la figura 4 y se interpola para encontrar el valor correspondiente en el eje Y. Finalmente, el resultado representa el Q – CT de la temperatura. Finalmente, para concluir, se multiplica el valor Q – CT por el peso W – CT.(SNET, 2016)

Figura: 4 Valoración de la calidad de agua en función de la Temperatura



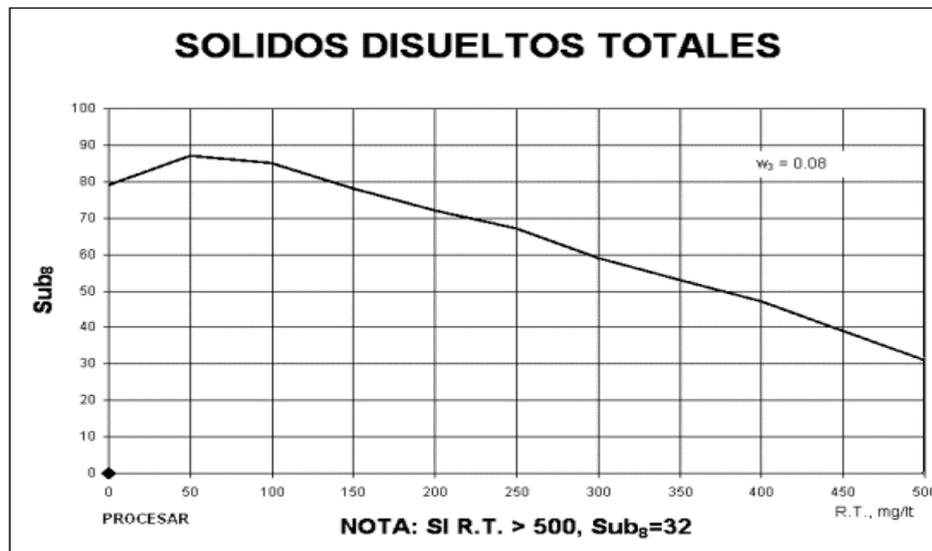
Fuente: (Landwehr & Denninger, 1976)

3.12 Sólidos Disueltos Totales– SDT (mg/L)

Los sólidos totales provienen de diversas fuentes, mientras que los sólidos suspendidos incluyen partículas visibles en el agua, como sedimentos, arcillas, materia orgánica. Estas partículas afectan la claridad del agua y le hábitat acuático, y contiene compuestos químicos disueltos, como minerales y nutrientes, que impactan la calidad del agua .(Saravia Solares, 2017)

Si los sólidos totales son mayores de 500 mg/L, el valor de Sub_8 es igual a 3. Si es menor de 500 mg/L, se busca el valor en el eje X de la figura 5 y se interpola para encontrar el valor correspondiente en el eje Y. El valor obtenido representa el Q – ST de los sólidos totales. Finalmente, para concluir, se multiplica el valor de Q – ST por el peso W – ST.(SNET, 2016)

Figura: 5 Valoración de la calidad del agua en función del Residuo Total



Fuente: (Landwehr & Denninger, 1976)

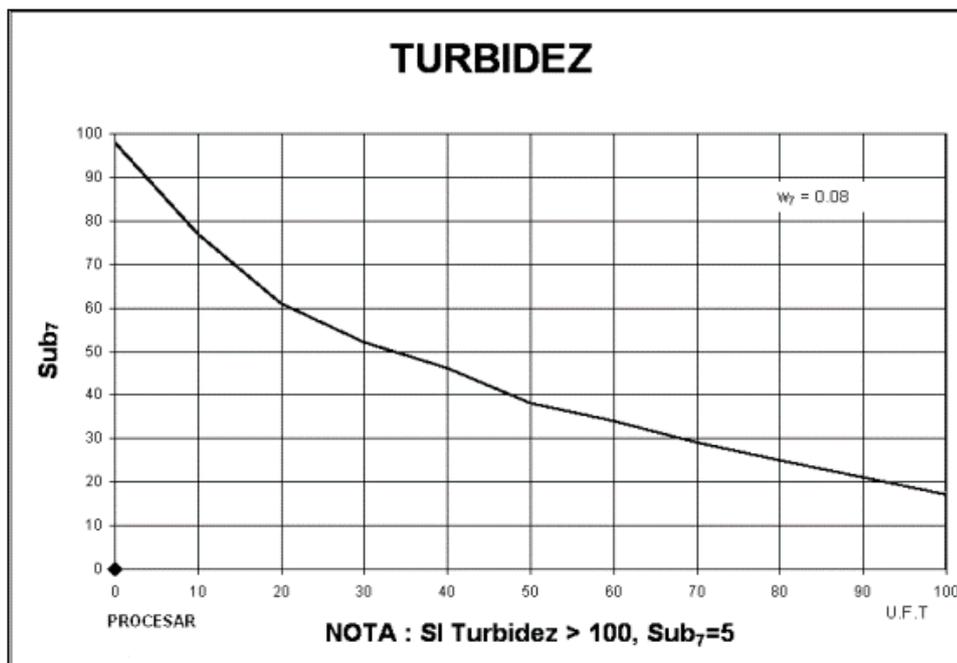
3.13 Turbiedad – T (NTU)

La turbidez es un parámetro fundamental en el análisis de agua potable, ecosistemas acuáticos y procesos industriales. Este parámetro se mide utilizando

nefelómetros, que analizan la dispersión de la luz provocada por las partículas suspendidas en el agua, expresándose en unidades (NTU). Un aumento en la turbidez puede indicar contaminación, erosión o proliferación de microorganismos. Lo que afecta la salud pública y el medio ambiente.(González Toro, 2014)

Si la turbidez es mayor a 100 FAU, el valor de Sub_7 es igual a 5. Si la turbidez es menor a 100 FAU, se busca el valor del eje X de la figura 6 y se interpola para encontrar el valor del eje Y. Al valor obtenido se representa con Q – T de la turbiedad. Al concluir, se multiplica el valor de Q – T por el peso de W – T (SNET, 2016).

Figura: 6 Valoración de la calidad de agua en función de la Turbidez



Fuente: (Landwehr & Denninger, 1976)

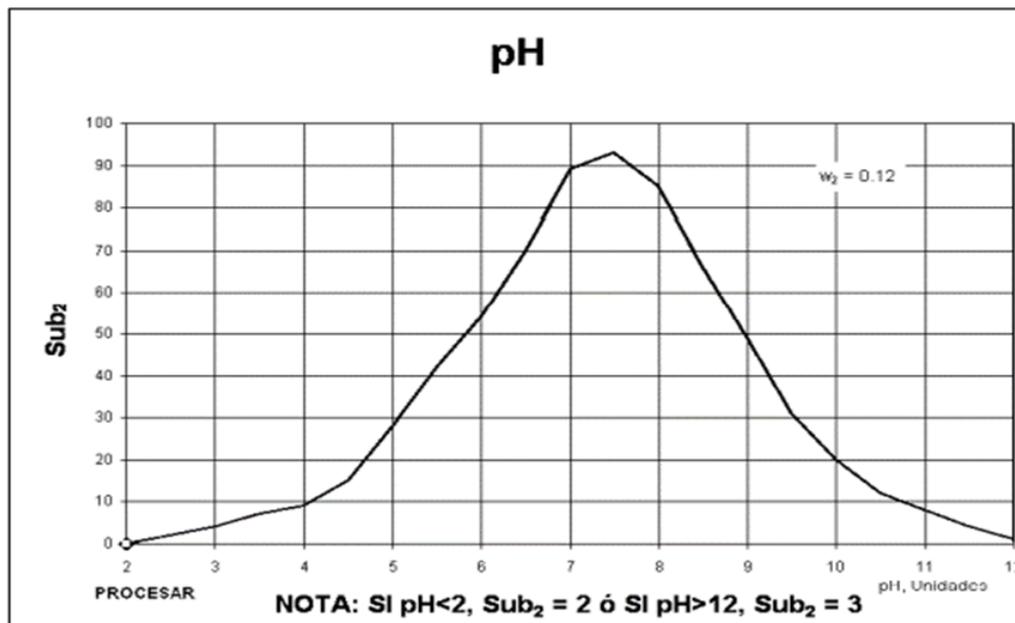
3.14 Potencial de hidrógeno – pH (Unidades de pH)

El pH es un indicador crucial para determinar la acidez o alcalinidad del agua, con una escala que varía de 0 a 14. Valores menores a 7 indican que el agua es acida, mientras que valores mayores a 7 indican que es alcalina. Este parámetro es vital para los ecosistemas acuáticos, ya que afectan la disolución de nutrientes esenciales y la

accesibilidad de metales, lo que impacta directamente en la salud de los organismos acuáticos.(WHO, 2008)

En este parámetro de pH, si el valor es menor a 2 o igual a 2 unidades, Sub_2 es igual a 2, si el valor a 2 y 10 unidades, se debe buscar el valor correspondiente en el eje X de la figura 7 y procederá a interpolar en el valor de eje Y. El resultado se representa $Q - Ph$, donde se multiplica el valor de $Q - pH$ por el peso $W - pH$.(SNET, 2016)

Figura: 7 Valoración de la calidad de agua en función del pH



Fuente: (Landwehr & Denninger, 1976)

3.15 Oxígeno Disuelto – OD (% de saturación)

El oxígeno disuelto (OD) es un indicador fundamental de la calidad del agua y desempeña un papel crucial en la vida acuática. Se refiere a la cantidad de oxígeno molecular (O_2) presente en el agua en forma disuelta. Niveles adecuados de OD son esenciales para mantener los ecosistemas acuáticos, ya que sustentan una amplia gama de organismos, incluyendo peces, crustáceos, bacterias y algas.

La disolución del oxígeno en el agua depende de factores como la temperatura, ya que a temperaturas bajas el oxígeno se disuelve más fácilmente, por lo que las aguas frías tienen mayor concentración de oxígeno. La presión atmosférica también influye, ya que una presión baja dificulta la disolución de oxígeno. (Alvarado & Aguilar, 2009)

Para el parámetro de Oxígeno Disuelto (OD), primero es necesario calcular el porcentaje de saturación de OD en el agua. Este cálculo requiere identificar el valor de saturación OD correspondiente a la temperatura del agua. (SNET, 2016). Como se indica en la (tabla 6).

Tabla 6: Solubilidad del Oxígeno en Agua Dulce

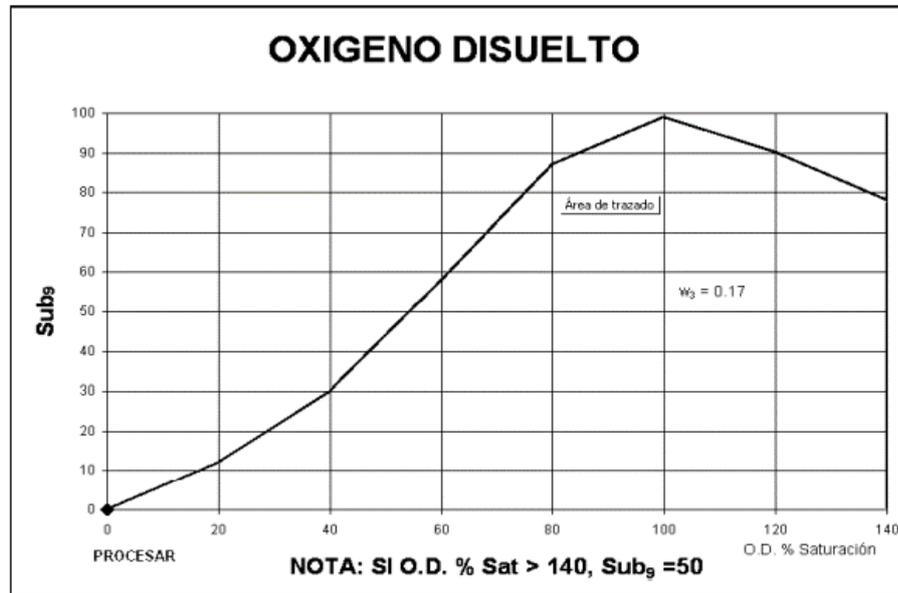
Temp °C	OD (mg/L)						
1	14.19	12	10.76	23	8.56	34	7.05
2	13.81	13	10.52	24	8.4	35	6.93
3	13.44	14	10.29	25	8.24	36	6.82
4	13.09	15	10.07	26	8.09	37	6.71
5	12.75	16	9.85	27	7.95	38	6.61
6	12.43	17	9.65	28	7.81	39	6.51
7	12.12	18	9.45	29	7.67	40	6.41
8	11.83	19	9.26	30	7.54	41	6.31
9	11.55	20	9.07	31	7.41	42	6.22
10	11.27	21	8.90	32	7.28	43	6.13
11	11.01	22	8.72	33	7.16	44	6.04

Fuente: (Adaptado de SNET, 2007)

Para el parámetro de Oxígeno Disuelto (OD), si el porcentaje de saturación de OD es superior al 140%, el valor de Sub_0 es igual a 4.7, si el porcentaje de saturación de OD es inferior al 140%, se debe buscar el valor en el eje X de la figura 8 y proceder a interpolar

para encontrar el valor correspondiente en el eje Y. El resultado obtenido Q – OD de oxígeno disuelto, se multiplica el valor de Q – OD por el peso W – OD(SNET, 2016).

Figura: 8 Valoración de la calidad de agua en función del % de Saturación del Oxígeno



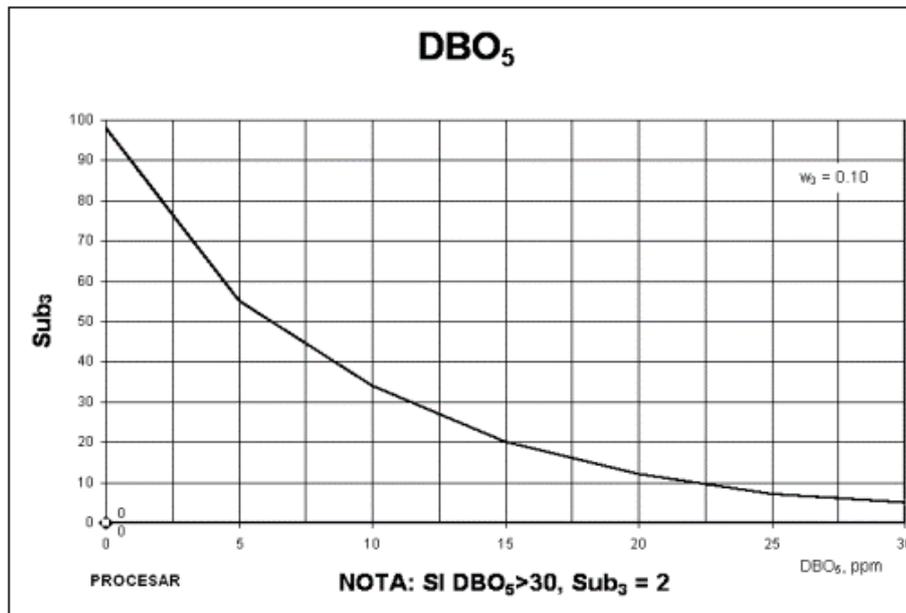
Fuente: (Landwehr & Denninger, 1976)

3.16 Demanda bioquímica de oxígeno- DBO_5 (mg/L)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días, (DBO_5), mide la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan para descomponer la materia orgánica en el agua durante un periodo de 5 días. Este parámetro es esencial para evaluar la contaminación orgánica en el agua, ya que indica el oxígeno requerido para descomposición de la materia orgánica. Niveles elevados de DBO_5 reflejan una alta carga orgánica y una mayor demanda de oxígeno por partes del microorganismo descomponedores.

El DBO_5 , si el valor es mayor de 30 mg/L, Sub_3 es igual a 2. Si el valor de DBO_5 es menor a 30 mg/L, se busca el valor correspondiente en el eje X de la figura 9 y se interpola para encontrar el valor del eje Y. El resultado obtenido Q - DBO_5 , se multiplica el valor de Q - DBO_5 por el peso W- DBO_5 (SNET, 2016)

Figura: 9 Valoración de la calidad de agua en función de la DBO_5 _5



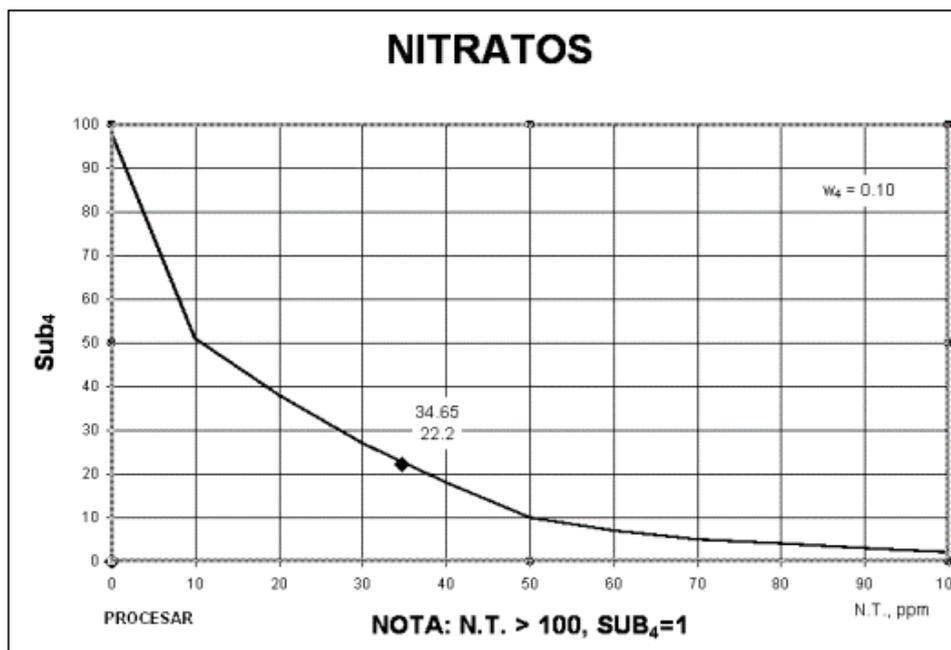
Fuente: (Landwehr & Denninger, 1976)

3.17 Nitratos – NO_3 (mg/L)

Los nitratos son compuestos formados por nitrógeno y oxígeno que pueden contaminar el agua debido a la escorrentia agrícola o el uso excesivo de fertilizantes. Su presencia en el agua es un indicador clave de contaminación, especialmente en fuentes de agua potables. La principal fuente de nitratos es la agricultura, donde los fertilizantes nitrogenados, aplicados en exceso o de manera incorrecta, pueden filtrarse al suelo y alcanzar fuentes de aguas superficiales o subterráneas. También, los desechos ganaderos contribuyen a esta contaminación. La acumulación de nitratos puede afectar la salud humana y los ecosistemas acuáticos. (Biswas, 1991)

Para este parámetro de nitratos, si el valor es mayor de 100 mg/L, Sub_4 , es igual a 2, si el valor de nitratos es menor de 100 mg/L, se busca el valor correspondiente en el eje X de la figura 10 y se interpola para encontrar el valor del eje Y. Este valor resultante representa Q – N de los nitratos, donde se multiplica el valor de Q – N por el peso W – N (SNET, 2016)

Figura: 10 Valoración de la calidad de agua en función del Nitrógeno



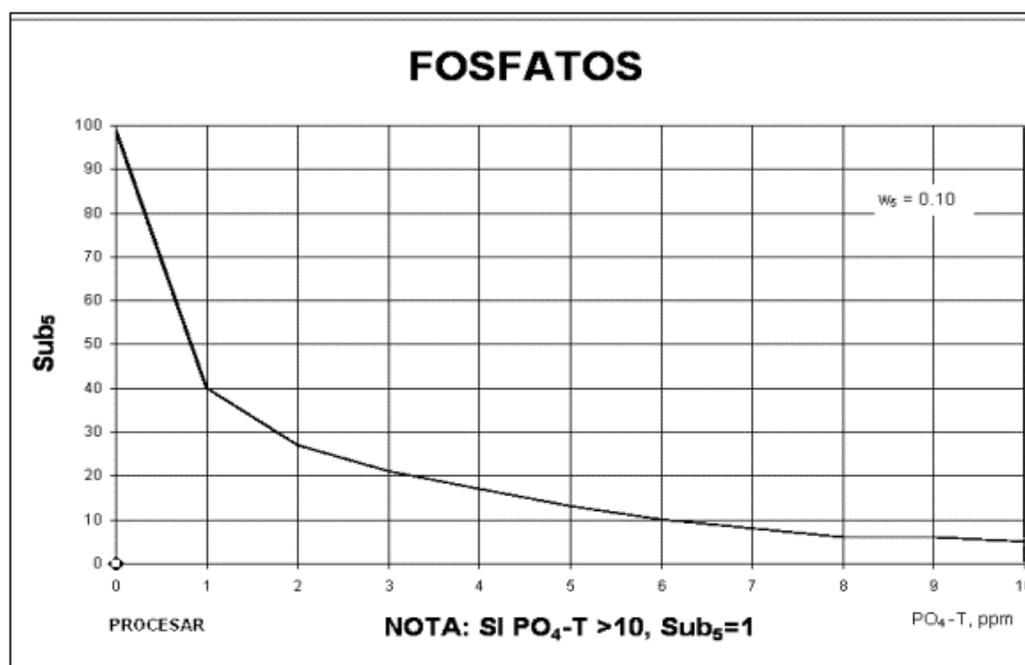
Fuente: (Landwehr & Denninger, 1976)

3.18 Fosfatos – PO_4 (mg/L)

Los fosfatos son nutrientes esenciales para las plantas, pero su exceso puede generar problemas ecológicos graves, como la eutrofización en cuerpos de agua. Cuando los fosfatos se acumulan en exceso, favorecen el crecimiento descontrolado de algas y otras plantas acuáticas, formando densas capas en la superficie. A medida que las algas mueren y se descomponen, los microorganismos consumen grandes cantidades de oxígeno, reduciendo su disponibilidad para otros organismos acuáticos, lo que pueden llevar a hipoxia. (Valsami-Jones, 2015)

Para este parámetro si el valor es mayor a 10 mg/L, Sub_5 es igual a 5. Si el valor de fosfatos es menor de 10 mg/L, se busca el valor correspondiente en el eje X de la figura 11 y se interpola para encontrar el valor en el eje Y. El valor obtenido $Q - P$ de los fosfatos se multiplica el valor de $Q - P$ por el peso $W - P$ (SNET, 2016)

Figura: 11 Valoración de la calidad de agua en función del Fósforo



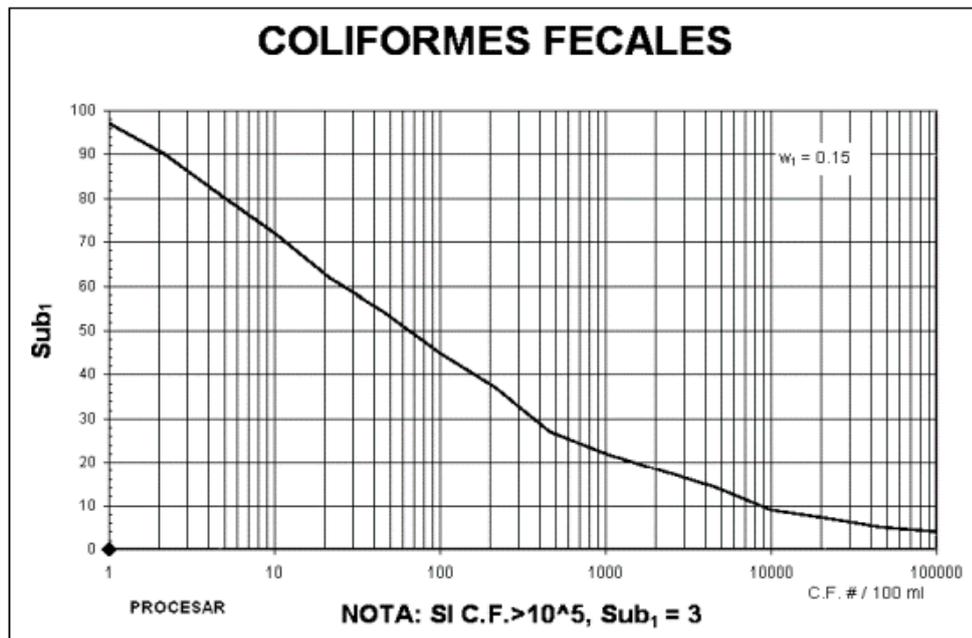
Fuente: (Landwehr & Denninger, 1976)

3.19 Coliformes fecales – NMP (colonias/100mL)

La detección de coliformes fecales en el agua pueden originarse de diversas fuentes de contaminación, incluyendo aguas residuales no tratadas, desbordamiento de sistema sépticos, infiltración de aguas pluviales y la proximidad de animales de granja a las fuentes de agua. Estos indicadores ayudan a evaluar la calidad de agua y la seguridad sanitaria, ya que su presencia señala la necesidad de tomar acciones correctivas para proteger la salud pública (Swistock et al., 2020).

Para el parámetro de coliformes fecales, si el valor es mayor de 100000 colonias por 100 ml, el Q – CF se establece en 3, cuando las colonias son inferiores a 100000 por cada 100 mL, se establece el valor correspondiente en el eje X de la figura 12 y se procede a interpolar para obtener el valor del eje Y. Este resultado de Q – CF de Coliformes Fecales, donde se multiplica el valor de Q- CF por el peso de W - CF (SNET, 2016)

Figura: 12 Valoración de la calidad de agua en función de Coliformes Fecales



Fuente: (Landwehr & Denninger, 1976)

3.20 Cálculo del Índice de la Fundación Nacional de Saneamiento

Brown propuso una evaluación cuantitativa del Índice de Calidad del Agua de la Fundación Nacional de Saneamiento (ICA NSF) mediante métodos multiplicativos y ponderados. Este enfoque utiliza asignaciones de pesos específicos para cada parámetro de calidad del agua, permitiendo una evaluación más precisa y holística de la calidad de agua. Para calcular este índice se puede utilizar una suma lineal ponderada de los subíndices esto se puede expresar matemáticamente(SNET, 2016)

$$ICA = \sum_{i=1}^n Qi * W$$

Donde:

- i: Parámetro considerado
- Q_i : Valor del parámetro i
- n: Número de parámetros

- W_i : Factor de ponderación para el parámetro i

Los factores relativos asignados a cada parámetro se ajustan en un rango de 0 a 1 de manera que la suma total sea igual a uno. Estos factores representan la ponderación de cada parámetro en relación con los demás, reflejando su importancia relativa en la evaluación global del índice de Calidad de Agua (ICA). Posteriormente, con el factor de corrección, los pesos relativos obtienen valores significativos (Garcés Villalba & Flórez Vergara, 2014) (Garcés Villalba & Flórez Vergara, 2014)

Tabla 7: Pesos relativos para cada parámetro del "ICA"

i	Sub_i	Unidades	W_i
1	Oxígeno Disuelto	% de saturación	0.17
2	Coliformes Fecales	NMP/100mL	0.15
3	pH	pH	0.12
4	DBO_5	mg/l	0.10
5	Nitratos	mg/l	0.10
6	Fosfatos	mg/l	0.10
7	Temperatura	°C	0.10
8	Turbiedad	NTU	0.08
9	Sólidos Totales	mg/l	0.08

Fuente: (Brown, 1970)

Una vez realizado el cálculo del índice de Calidad del Agua (ICA), se procede a su clasificación con base en el resultado numérico, el cual debe oscilar entre 0 -100. (Tabla8)

Tabla 8: CLASIFICACION DEL "ICA" PROPUESTO POR BROWN

Calidad de Agua	Color	Valor
Excelente		91 – 100
Buena		71 – 90
Regular		51 – 70
Mala		26 – 50
Pésima		0 - 25

Fuente: (Brown, 1970)

- **Excelente (91 – 100):** Indica condiciones en las cuales los niveles de varios parámetros claves son óptimos, capaces de mantener una alta diversidad de vida acuática. Este nivel de calidad de agua indica la ausencia de contaminantes dañinos, lo que hace adecuada para actividades recreativas y el consumo humano sin riesgos para la salud (Amado-Alvarez et al., 2018)(Amado-Alvarez et al., 2018)
- **Buena (71 – 90):** Cumplen con los estándares aceptables establecidos para asegurar la salud humana y la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos. En este nivel de contaminantes, pero no son perjudiciales. Esta calidad de agua es adecuada para actividades recreativas y es apta para consumo humano con tratamiento básico, garantizando así la seguridad y el bienestar tanto para las personas como para los ecosistemas(García-González et al., 2021)(García-González et al., 2021)
- **Regular (51 -70):** Se caracteriza por parámetros que se encuentran en los límites aceptables o que han experimentado fluctuaciones significativas. Este estado requiere una supervisión continua implementado y la implementación de medidas correctivas para evitar una mayor degradación. Las aguas de calidad regular pueden estar asociadas con riesgos potenciales tanto para la salud humana como

para el ecosistema acuático. Por lo tanto, es necesario realizar tratamientos específicos para garantizar su seguridad y minimizar los riesgos asociados(Pradillo, 2022)(Pradillo, 2022)

- **Mala (26 – 50):** Se caracteriza por la presencia de niveles de contaminantes y otros parámetros que exceden los límites aceptables establecidos por las normas de salud pública y ambientales. Esta condición tiene repercusiones negativas tanto para la salud humana, causando enfermedades gastrointestinales y como para los ecosistemas acuáticos, resultando en una baja diversidad biológica. Para su uso seguro, estas aguas requieren tratamientos intensivos y una vigilancia rigurosa para mitigar los riesgos asociados(Paucar Peñaranda et al., 2023).(Paucar Peñaranda et al., 2023).
- **Pésima (0 -25):** Indica que los niveles contaminantes se encuentran en la peor condición posible. Está situación representa una amenaza significativa para la salud humana, con consecuencias graves como el desarrollo de enfermedades crónicas. En los ecosistemas acuáticos, esta condición causa una drástica disminución en la biodiversidad y afecta gravemente en la funcionalidad ecológica. El agua en esta categoría requiere tratamientos intensivos para cualquier uso y una vigilancia rigurosa para mitigar los riesgos(SNET, 2016)(SNET, 2016)

3.21 Macro invertebrados acuáticos

Los macroinvertebrados son excelentes indicadores de calidad de agua. Los macroinvertebrados acuáticos son organismos visibles a simple vista que habitan en ambientes de agua dulce: esteros, ríos, lagos y lagunas. Se denominan “macro” debido a su tamaño, que varía entre 2 milímetros y 30 centímetros, e “invertebrados” porque carecen de columna vertebral. (Ortiz Contreras et al., 2021)

3.22 Índice BMWP / Col y ASPT

El índice biótico desarrollado por Hellawell en 1970 en Inglaterra es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar la tolerancia de las familias macroinvertebrados a la contaminación orgánica y determinar la calidad de agua en ríos y arroyos. Este índice se basa en la identificación y clasificación de macroinvertebrados acuáticos, asignando una puntuación que varía típicamente de 1 a 10 donde una puntuación de 1 indica alta tolerancia a la contaminación y 10 denota una alta sensibilidad a la contaminación. Este sistema permite a los investigadores y gestores ambientales cuantificar y monitorear la calidad de agua de manera eficiente (Naranjo-López, 2013). (Naranjo-López, 2013).

En el cálculo del BMWP (Biological Monitoring Working Party), se recolecta las muestras de macroinvertebrados utilizando una red de muestreo. Los organismos se identifican hasta el nivel de familia y se les asigna una puntuación BMWP basadas en la taxonomía de familias (**Tabla 9**). Las puntuaciones asignadas a cada familia se suman para obtener un valor total, el cual se compara con rangos predefinidos de calidad de agua para determinar el estado ecológico del cuerpo. Este método proporciona una evaluación precisa y objetiva de la salud y calidad ecológica de ríos y lagos, facilitando la toma de decisiones en la gestión ambiental (González et al., 2013) (González et al., 2013)

El índice de ASPT (Puntuación promedio por taxa) es un índice derivado de BMWP que proporciona una medida de la calidad de agua basada en la puntuación promedio de taxones de macroinvertebrados presentes en una muestra, donde los rangos de valores se encuentran entre 0 y 10 donde se expresa el promedio de calidad de agua que tienen las familias de macroinvertebrados identificados, donde se correlacionan con cinco grados

de contaminación y cinco colores que representa la calidad de las aguas(Devarayan et al., 2023)(Devarayan et al., 2023)

Tabla 9: Índice biótico BMWP/Col

Familia	Puntuación
Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hidridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae	10
Ampullariidae, Dystiscidae, Ephemeridae, Euthplociidae, Gyrinidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopatomiidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae	9
Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hidrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelpusidae, Saldidae, Simuliidae, Vellidae.	8
Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossosomatidae, Hyaellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptothyphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae.	7
Aeshnidae, Ancyliidae, Corydalidae, Elmidae, Libelullidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae.	6
Belostomatidae, Gelastocoridae, Mesoveiidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae.	5
Chysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydrometridae, Noteridae, Dolichopodidae.	4
Ceratopogonidae, Glossiphonidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae.	3
Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae, Syrphidae	2
Tubificidae	1

La ventaja de este índice es la fiabilidad de los resultados, así como la rapidez y sencillez de su aplicación. En la (Tabla 10), se presenta los rangos que determina la clase de calidad de agua establecido por el índice propuesto BMWP/Bol.(González et al., 2013)(González et al., 2013)

Tabla 10: Clases de calidad y los valores asignados al BMWP/Bol

Clase	Calidad	BMWP/Bol	ASPT	Características	Color
I	Buena	>120 101 - 120	>910 >89	Aguas muy limpias. Aguas no contaminadas	Azul
II	Aceptable	61 – 100	>6,5 – 8	Ligeramente contaminadas: se evidencia efectos de contaminación	Verde
III	Dudosa	36 – 60	>4 – 5 – 6,5	Aguas moderadamente contaminadas	Amarillo
IV	Critica	16 – 35	>3 – 4,5	Aguas muy contaminadas	Naranja

V	Muy crítica	< 15	1 – 3	Aguas fuertemente contaminadas, situación crítica	Rojo
---	-------------	------	-------	---	------

Fuente: (Asensio, 2013)

3.23 Índice de Ephemeroptera, Plecóptera, Thichoptera (ETP)

El índice EPT (Ephemeroptera, Plecóptera, Thichoptera) es un método biológicamente ampliamente utilizado para evaluar la calidad del agua en ecosistemas fluviales. Se basa en la presencia, abundancia y diversidad de macroinvertebrados de tres órdenes de insectos acuáticos, que son indicadores sensibles de contaminación y alteraciones ambientales en agua. (Harper et al., 1994)

Ephemeroptera

Esta orden incluye a insectos acuáticos comúnmente conocidos como "moscas de mayo". Su ciclo de vida incluye una fase acuática que es muy sensible a los cambios en la calidad de agua, especialmente a contaminantes y bajos niveles de oxígeno disuelto. La presencia de abundante de Ephemeroptera sugiere agua de buena calidad, ya que estos organismos de aguas limpias y bien oxigenadas para vivir. (Carrasco Cedeño & Ordoñez Acosta, 2017)

Plecóptera

Son conocidos como "moscas de piedra", también insectos acuáticos que suelen encontrarse en corrientes de agua clara y fría. Su ciclo de vida larval en el agua dura entre uno y tres años, lo que particularmente útiles como bioindicadores a largo plazo de la calidad de agua. (Contreras-Ramos, 2010)

Thichoptera

Estos insectos, conocidos como "friganeas", construyen capullos con materiales del entorno y habitan en una variedad de hábitats acuáticos, Aunque algunos pueden ser tolerantes ciertos niveles de contaminación, muchas especies son sensibles a cambios en la composición química del agua, lo que los convierte en un indicador útil en el índice EPT.(Barbour et al, 1999)

3.23.1.1 Cálculo de Índice EPT

Conteo de especies y/o géneros

Se identifica y cuenta el número de taxones de los órdenes Ephemeroptera, Plecóptera, Trichoptera en las muestras recolectadas. Cada taxon (especie o genero) tiene un puntaje asignado basado en su tolerancia a la contaminación.

Asignación de puntaje

El índice puede calcularse utilizando la proporción de especies EPT en relación con el total de macroinvertebrados muestreados. Esta proporción se expresa comúnmente como un porcentaje, con la siguiente ecuación: (Cairns & Pratt, 1993)

$$\text{Índice ETP} = \frac{\text{Total de individuos EPT}}{\text{Total de macroinvertebrados}} \times 100$$

Se compara con rangos de referencia

Tabla 11: Ponderación para el índice EPT

Rangos	Calidad de agua
75 – 100 %	Muy Buena
50-74 %	Buena
25 – 49 %	Regular
0 – 24 %	Mala

Fuente: (Hauer & Lamberti, 2011)

3.24 Contaminación por actividad minera

Desde sus inicios, la actividad minera ha contribuido significativamente a la economía de muchos países, beneficiando a ciertos sectores y a una minoría de la población. Sin embargo, la constante fluctuación de los precios de los minerales ha llevado a muchas empresas mineras a abandonar los campamentos una vez finalizado sus operaciones, sin llevar a cabo una planificación para el cierre y la disposición de los desechos generados. Esta falta de responsabilidad provoca un grave deterioro ambiental, afectando tanto a la atmósfera como a los recursos hídricos, y poniendo en riesgo la salud de las personas y la biótica en general, incluyendo flora y fauna.

Las descargas de residuos mineros suelen verterse en cuerpos de agua dulce, como ríos, que recorren cientos de kilómetros y se combinan con otros cursos de agua, creando nuevos cuerpos hídricos. Este fenómeno expone a personas que no residen cerca de la zona de extracción a los contaminantes presentes en el agua, debido al desconocimiento de los elementos tóxicos disueltos en ella.

Este escenario pone en riesgo crítico la salud de las personas y el estado de la flora y fauna acuática y terrestre. La contaminación de los cuerpos de agua como metales pesados y otros residuos mineros afectan los ecosistemas de manera directa, deteriorando la calidad de agua y alterando los hábitats naturales. La exposición a estos contaminantes puede provocar problemas en la salud graves en la población humana, como enfermedades crónicas y agudas, así como la disminución de la biodiversidad y el deterioro de ecosistemas acuáticos y terrestres (Effen, 2010)

3.25 Metales pesados

La minería artesanal y de pequeña escala es una actividad que puede generar graves impactos ambientales debido a la presencia y liberación de metales pesados y otras

sustancias toxicas que alerta daños a la población, flora y fauna donde identificamos los efectos específicos de cada uno de los compuestos (Ana, 2021)(Tabla12).

Tabla 12: Efectos de metales pesados

Metales Pesados	Efectos
Cianuro	El cianuro es altamente toxico y pude causar la muerte de organismos acuáticos y terrestres si no se maneja adecuadamente. Además, tiene el potencial de contaminar las fuentes de agua, afectando a las comunidades locales (Moyo & Schwamberger, 2021).
Mercurio	El mercurio es un neurotóxico potente que puede causar daños severos al sistema nervioso, tanto en los mineros como en la comunidad, esta contaminación puede afectar los cuerpos de agua y la cadena alimentaria, particularmente en la bioacumulación (Huidobro & Veiga, 2008).
Plomo	El plomo es toxico y puede causar envenenamiento, afectando el desarrollo neurológico y causando daños en la salud humana, en el ecosistema acuática afecta a la reproducción de especies, además pueden acumular plomo en su cuerpo
Plata	Aunque la plata no es toxica como el mercurio o el plomo, en altas concentraciones puede ser perjudicial para la vida acuática y la salud humana (Moya, 2018)
Sustancias solubles en hexano	Estas sustancias suelen ser compuestos orgánicos utilizados en la minería para procesos de extracción y separación de metales. Son solventes que pueden ser tóxicos y tienen el potencial de contaminar el suelo y el agua, afectando la flora y fauna local (jaramillo, 2020).

Fuente: Elaboración Propia

La probabilidad de ingreso de estos metales en humanos y animales es mayor durante el verano, cuando las precipitaciones son escasas. En contraste, esta probabilidad disminuye en la temporada de invierno, debido a que a mayor frecuencia de lluvias facilita la disolución y dispersión de los metales(Oviedo-Anchundia et al., 2017)(Oviedo-Anchundia et al., 2017)

3.26 Texto unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente

En el Ecuador, el Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente (TULSMA) establece los límites máximos permisibles de concentración de

metales pesados en descargas a cuerpos de agua dulce. Estos límites se especifican en la tabla 13 del TULSMA, titulada “Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce”, se establece los valores máximos permisibles para diversas sustancias. A continuación, se presentan las concentraciones máximas permitidas para distintos metales pesados Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

Tabla 13: Normativa Ambiental Vigente Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Cianuro total	CN	mg/l	0,1
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Aceites y Grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3

Fuente: (Ministerio Ambiente , 2016)

3.27 Análisis estadísticos de datos mediante modelos de dispersión

El uso de modelos de dispersión como QUAL2K nos permite simular y analizar el comportamiento de la calidad del agua, considerando factores como la carga de contaminantes, la hidrodinámica, y la transformación de sustancias a lo largo del río o corriente. QUAL2K, es un modelo de calidad del agua de una sola dimensión desarrollando para simular ríos y se basa en ecuaciones diferenciales para representar procesos físicos, químicos y biológicos, permitiendo así un análisis detallado de parámetros de calidad el agua en diferentes condiciones de flujo. (Pelletier et al., 2006)(Pelletier et al., 2006)

Este modelo es ampliamente utilizado en estudios de gestión ambiental para pronosticar el impacto de actividades antrópicas y contaminantes específicos, apoyando

la toma de decisiones en la conservación de los recursos hídricos.(Park & Lee, 2002)(Park & Lee, 2002)Los estudios basados en QUAL2K se benefician de su capacidad para proyectar el impacto de diversos escenarios de carga, lo que hace un instrumento valioso en planificación y gestión de la calidad del agua. (Pelletier et al., 2006)(Pelletier et al., 2006)

3.28 Modelos de dispersión y su importancia en la evaluación de contaminantes

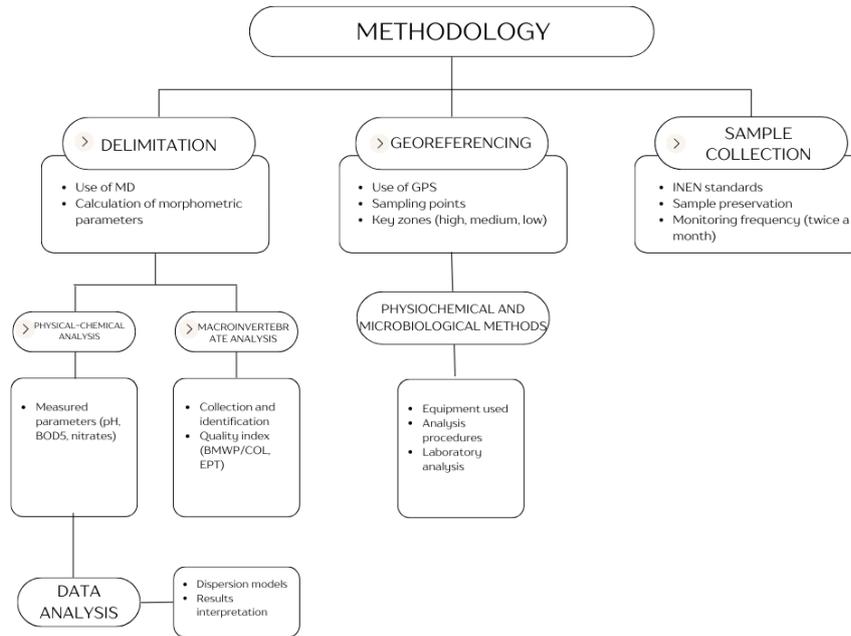
Los modelos de dispersión son herramientas analíticas fundamentales en la evaluación de contaminantes en el medio ambiente, ya que permiten estimar la distribución y el comportamiento de sustancias contaminantes en diversos ecosistemas. En estos modelos se emplean ecuaciones para la simulación de la dispersión, degradación de contaminantes en medios como agua y aire.(Diop et al., 2016)(Diop et al., 2016). En el caso de los cuerpos de agua, estos modelos nos facilitan la predicción de la concentración de contaminantes a lo largo del río o algo lo cual es esencial para evaluar el impacto ambiental de las actividades humanas y diseñar estrategias de mitigación efectivas,

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Metodología

El estudio se desarrolló en varias fases: diseño del muestreo, recolección y análisis de datos, y la modelización de la dispersión de los contaminantes. Cada una de estas etapas es fundamental para alcanzar los objetivos planteados en esta investigación.

Figura: 13 Esquema de metodología



Fuente: Elaboración propia

4.2 Delimitación de la Subcuenca del Rio Santa Barbara

Para la delimitación de la microcuenca del rio Santa Barbara, se utilizó un Modelo Digital del Terreno (MDT) con una resolución espacial de 3.3 metros, lo que indica que cada celda de ráster representa la superficie de 3.3m x 3.3m en el terreno. Este MDT fue importando en el software ArcMap 10.6. Este programa permite cargar y visualizar los datos , que fueron obtenidos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Esta información facilita una representación detallada de la topografía del área de estudio, donde nos permite identificar con precisión los límites de la cuenca hidrográfica y definir las áreas de influencia de río.

4.3 Características morfométricas

4.4 Parámetros generales

El área, perímetro y longitud del cauce principal de la cuenca se calcularon utilizando ArcMap 10.6. Para ello, se empleó la herramienta **Calculate Geometry** en la tabla de atributos, lo que permitió obtener de manera precisa las dimensiones de la cuenca y las características.

Figura: 14 Área, perímetro y longitud del cauce principal de la cuenca del río Santa Barbara

FID	Shape *	Layer	Area	Perimetro
0	Polygon	Santa Barbara	221.66	79112.25

OBJECTID *	Shape *	Layer	Shape_Length	longitud
1	Polyline	Santa Barbara	18592.63	18.59

Fuente: Elaboración propia

- › Para el cálculo de longitud axial de la cuenca, se utilizó la herramienta **Measure** en ArcMap. Esta herramienta permitió medir la distancia máxima a lo largo del eje principal de la cuenca.
- › El cálculo del ancho y del desnivel altitudinal de la cuenca se realizó aplicando las ecuaciones descritas en el marco teórico. Estas fórmulas permitieron obtener los parámetros.

4.5 *Georreferenciación*

4.6 *Georreferenciación para el análisis de metales pesados en la cuenca del río Santa Bárbara*

Se realizó la georreferenciación de las áreas de muestreo en tres zonas claves de la cuenca del río Santa Bárbara, considerando su extensión de **14.34 km** y las diferentes condiciones de uso de suelo e influencia antrópica, para ello se establecieron tres puntos estratégicos de muestreo:

- **Zona minera:** Ubicada en la parte alta de la cuenca, donde la actividad minera tiene un impacto significativo, Según el **PDOT**, el uso de suelo en esta **área corresponde a bosque y vegetación protectora.**
- **Zona urbana:** Corresponde al centro poblado, donde predominan actividades residenciales. De acuerdo con el **PDOT**, el uso de suelo está clasificada como **residencial-vivienda**
- **Zona rural:** Se encuentra en la parte baja de la cuenca, caracterizada por su influencia fluvial y el desarrollo de actividades agropecuarias. Según el **PDOT**, el uso de suelo en esta zona es **agrícola, pecuaria y zona de expansión.**
(Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Sigsig, 2020)

4.6.1.1 *Definición de puntos de muestreo*

Se selecciono puntos estratégicos a lo largo del cauce del río para la recolección de muestras de agua y macroinvertebrados. Estos puntos están georreferenciados mediante el uso de GPS.

4.6.1.2 Georreferenciación de los puntos

Cada punto de muestreo se ha marcado en un sistema de Coordenadas Geográficas Uniformes (UTM, WGS 1984) utilizando ArcGIS. Esto permitió integrar datos de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos en la plataforma GIS.

Tabla 14: Coordenadas y ubicación de puntos

PUNTOS DE MUESTREO	ZONA	UTM	
		X	Y
Infiernillos P1	Zona Minera	743677.06	9666819.91
HILÁN P2	Zona Urbana	7447714.00	9663115.00
el Verde P3	Zona Rural	746878.52	9656421.76

Fuente: Elaboración propia

4.6.1.3 Integración en Qual2K:

Se importo los análisis de laboratorio (ETAPA) de metales pesados en el software Qual2K, asociando los valores obtenidos en cada punto.

4.7 Georreferenciación de la red hídrica que alimenta el rio Santa Bárbara

4.8 Identificación de afluentes

Se mapearon los afluentes principales y secundarios que alimentan al rio santa Barbara utilizando la capa hidrográfica georreferenciada.

4.9 Análisis de redes de flujo

Se utilizo la herramienta de **Flow accumulation** y **Flow direction** en ArcMap para determinar el flujo y la dirección del agua dentro de la cuenca, ayudando a identificar las principales áreas de recarga y descarga.

4.10 Normas INEN para la Recolección de Muestras: Guía, Técnica y Requisitos

La recolección de muestras de agua se llevó a cabo siguiendo los procedimientos establecidos en las normas INEN 2169:2013, INEN 2176:2013 que proporcionan directrices sobre la **“Calidad del Agua, Muestreo, Manejo y Conservación de Muestras”**. Estas normas garantizan que las muestras sean representativas de las condiciones ambientales en cada punto de monitoreo, evitando la contaminación durante el proceso de recolección.

INEN 2169:2013 - INEN 2176:2013: Esta norma establece los requisitos y procedimientos técnicos para el **muestreo de agua**, con el fin de asegurar que las muestras obtenidas sean representativas de las condiciones originales en el punto de muestreo. La norma proporciona directrices sobre el uso de recipientes, apropiados, técnicas de muestreo adecuadas y medidas para evitar la contaminación durante la recolección, asegurando que las características físico – químicas y microbiológicas de las muestras no se alteran antes del análisis. La norma detalla el uso de equipos de muestreo limpios y calibrados, el etiquetado adecuado de las muestras, la documentación de la cadena de custodia para garantizar la trazabilidad, y los métodos de conservación apropiados, que incluye refrigeración o el uso de preservantes químicos según el tipo de análisis. También se especifica las condiciones para el transporte de las muestras en entornos controlados, minimizando cualquier alteración de sus propiedades para asegurar la fiabilidad y precisión de los análisis de calidad de agua.(INEN, 2013)(INEN, 2013)

Tabla 15: Técnicas generales para la conservación de muestras - análisis físico-químico.

Parámetro	Tipo de recipiente V, vidrio; P, plásticos; VB, vidrio borosilicatado	Volumen típico (ml) técnica de envasado	Técnica de preservación	Tiempo máximo recomendado de preservación antes del análisis después de la conservación	Comentarios	Método de ensayo NTE INEN
Aceites y grasa	V lavado con solvente	1000	Acidificar a pH 1 a 2 con HCL o H_2SO_4	1 mes		
Acidez y alcalinidad	P o V	500 llenar contenedor completamente para excluir el aire.	Se enfría a entre 1 °C y 5°C	24h	14 días Las muestras preferiblemente deben ser analizadas en el lugar (en particular para las muestras con alto contenido de gases disueltos). Reducción y oxidación durante el almacenamiento puede cambiar la muestra	
Aluminio	P lavado con ácido V o VB lavados con ácido	100	Acidificar a entre pH 1 a 2 con HNO_3	1 mes		
Amoniaco, libre e ionizado	P o V	500	Acidificar a entre pH 1 a 2 con H_2SO_4 , enfriar a 1°C y 5°C	21 días	Filtrar en el lugar antes de la conservación	
	P	500	Congelar a -20°C	1 mes		
Aniones (Br, F, Cl, NO_2 , PO_4 y SO_4 ,	P o V	500	Se enfría entre 1 °C y 5°C	24h	Filtrar en el lugar antes de la conservación	
	P	500	Congelar a -20°C	1 mes		
Antimonio	P lavado con ácido V lavado con ácido	100	Acidificar a entre pH 1 a 2 con HCL o HNO_3	1 mes	HCl debe ser utilizado si la técnica de hidruro se utiliza para el análisis	
Arsénico	P lavado con ácido V lavado con ácido	500	Se Acidifico a entre pH 1 a 2 con HNO_3	1 mes	HCl debe ser utilizado si la técnica de hidruro se utiliza para el análisis	980
Bario	P lavado con ácido V lavado con ácido	100	Acidificar a entre pH 1 a 2 con HNO_3	1 mes	No utilice H_2SO_4 ,	
Berilio	P lavado con ácido V lavado con ácido	100	Acidificar a entre pH 1 a 2 con HNO_3	1 mes		
Bicarbonatos	Ver "Acidez y alcalinidad"					
Bifenilos policlorados (PCB)	V, lavado con disolvente, tapa con revestimiento de PTFE	1000 No enjuagar previamente recipiente con la muestra; analíticos se adhiere a la pared de la botella. No llene completamente contenedor de muestras.	Se enfría a entre 1 °C y 5°C	7 días	Extraer in situ cuando sea viable. Si la muestra se encuentra clorinada, para cada 1000 ml de muestra, agregar 80mg de $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ al contenedor antes de la recolección.	

Fuente: (INEN, 2169:2013)

4.11 Determinación del índice de calidad del agua (ICA – NSF)

Se seleccionaron puntos estratégicos de monitoreo a lo largo del río Santa Barbara, considerando criterios técnicos como la proximidad a fuentes potenciales de contaminación, en cada uno de estos puntos de muestreo se midieron las nuevas variables fundamentales establecidas por el Índice de Calidad del Agua (ICA – NSF), las cuales incluyen parámetros fisicoquímicos y microbiológicos clave para la evaluación integral de la calidad del agua. Estas mediciones se realizaron de acuerdo con los protocolos normalizados, asegurando la representatividad y confiabilidad de los datos para el cálculo del ICA – NSF en la cuenca.(Carrillo & Urgilés, 2016)(Carrillo & Urgilés, 2016)

4.12 Materiales y equipos

Los materiales y equipos utilizados para la manipulación y recolección de las muestras de agua incluyeron guantes desechables de nitrilo para evitar la contaminación, un dispositivo GPS para georreferenciar los puntos de muestreo, mandil y botas de seguridad para la protección personal durante el trabajo de campo. Además, se emplearon envases estériles de 100 ml y 1000 ml de (vidrio o polietileno), adecuados para la preservación de las muestras. Se utilizaron rotuladores y etiquetas para una correcta identificación de cada muestra.

4.13 Toma de muestras

Se realizaron tomas de muestras compuestas en tres puntos estratégicos del río Santa Barbara (P1, P2, P3), con un intervalo de una hora entre cada submuestra. Este método permite obtener una muestra representativa de las condiciones del agua a lo largo del día, combinando submuestra recolectadas a intervalos regulares. La toma de submuestras a intervalos facilita la captura de fluctuaciones naturales y antropogénicas en la calidad del

agua, lo que resulta especialmente relevante en cuerpos de agua sujetas a descargas intermitentes o variaciones por actividades humanas y condiciones climáticas. Al combinar estas muestras, se obtiene una muestra compuesta que refleja un promedio de las condiciones del agua durante el periodo de muestreo, proporcionando una visión más integral de su calidad. Este enfoque es utilizado ampliamente en el monitoreo ambiental(Autoridad Nacional del Agua-ANA, 2011). Según la Guía Técnica de Senaguas, la frecuencia de monitoreo debe ser sujeta a las condiciones de la fuente y entorno.(SENAGUA, 2016)

Tabla 16: Tiempos de Recolección de Muestras

Punto de muestreo	Submuestra1	Submuestra2	Submuestra3
P1(Zona Alta)	08:00 AM	09:00 AM	10:00AM
P2(Zona media)	11:00AM	12:00AM	13:00 AM
P3 (Zona baja)	14:00PM	15:00PM	16:00PM

Fuente: Elaboración propia

Figura: 15 Toma de muestras de agua en el río Santa Barbara



Fuente: Elaboración propia

4.14 Conservación y transporte de las muestras

Los recipientes empleados para la conservación de las muestras fueron envases de polietileno de 1000ml, destinados al análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Las muestras fueron conservadas a una temperatura de 4.5°C mediante el uso de un cooler térmico y refrigerantes tipo gel-pack, siguiendo los protocolos de preservación. Este proceso asegura la integridad de las muestras hasta su análisis en laboratorio, el cual se realizó en menos de 24h. , conforme a las normas **NTE INEN 2169:2013 - NTE INEN 2176:2013**, que establece tiempos máximos de conservación para preservar la integridad de los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos, evitando alteraciones por proliferación bacteriana o reacciones químicas. (INEN, 2013b)

4.15 Periodo y frecuencia de monitoreo

El periodo de monitoreo se llevó entre los meses de noviembre y diciembre del presente año, incluyendo la temporada de sequía. Durante este intervalo, se realizaron la toma de muestras de agua 2 veces por mes, lo que permitió evaluar la variabilidad en la calidad de agua en respuesta a las condiciones climáticas y bajo el impacto potencial de las actividades mineras en la zona.

El monitoreo en periodos críticos es fundamental para obtener datos representativos de las condiciones más adversa. La reducción del caudal durante la sequia reduce la capacidad de dilución del río, lo que puede incrementar la concentración de metales pesados. En noviembre, se registró un periodo de 118 días consecutivos sin precipitaciones, evidenciando un alto índice de sequía. En contraste, en diciembre el diciembre las condiciones meteorológicas cambiaron significativamente, registrándose precipitaciones diarias entre 55 y 80mm.

Tabla 17: Frecuencia de Muestreo

MES	DIA	FRECUENCIA
Noviembre	26/11/2024	1/mes
Diciembre	4/12/2024	1/mes
Diciembre	16/12/2024	1/mes
Diciembre	19/12/2024	1/mes

Fuente: Elaboración propia

4.16 Métodos utilizados para medir los parámetros fisicoquímico y microbiológico

En los tres puntos de monitoreo, se evaluaron los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos necesarios para calcular el índice de Calidad del Agua (ICA – NSF). La temperatura y el pH se midieron in situ – ex situ. Los parámetros de nitratos, fosfatos, oxígeno disuelto, turbidez y solidos disueltos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y los coliformes fecales se analizaron en el laboratorio de Ciencias de la Vida y en el laboratorio de Sanitaria de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, realizando tres mediciones y se promediaron los resultados obtenidos.

Tabla 18: Métodos para el análisis de los parámetros fisico-químicos y microbiológicos

Parámetro	Unidad	Método
pH	Unidades de pH	Multiparameter
DBO5	mg/L	Multiparameter
Nitratos	mg/L	Multiparameter Photometer
Fosfatos	mg/L	Multiparameter Photometer
Temperatura	°C	Termómetro de mercurio
Turbidez	NTU	Turbidimeter
Sólidos disueltos totales	mg/L	
Oxígeno Disuelto	% saturado	Multiparameter

Coliformes fecales	NMP/100mL	
--------------------	-----------	--

Fuente: Elaboración propia

4.17 Análisis de los parámetros fisicoquímicos en laboratorio

4.18 Análisis de los parámetros físicos

Cambio de temperatura

Luego de la toma de muestras de agua, se introdujo un termómetro de mercurio en el líquido durante unos segundos para permitir estabilizar la lectura. Se observó cuidadosamente el valor en la escala numérica. Es importante destacar que, entre cada medición, se lavó minuciosamente el bulbo del termómetro con agua destilada, ya que esta parte entra en contacto directo con al agua a analizar. Para realizar las precisiones, se realizan tres mediciones en cada punto, promediando los resultados obtenidos.

Sólidos disueltos Totales (SDT)

Los sólidos disueltos totales son partículas finas que permanecen en una solución al filtrar la muestra. Para determinar su concentración el agua filtrada se evapora y su residuo se pesa para obtener la cantidad de SDT.(Hach, 2022)

Procedimiento:

1. Colocar la capsula en la estufa para eliminar residuos presentes.
2. Colocar 100ml de la muestra en una capsulas de porcelana.
3. La capsula con la muestra en una estufa a 105°C durante 24hrs para asegurar la evaporación de la muestra.

4. Tras el secado, dejar enfriar la capsula en el desecador llevar a una balanza analítica para obtener los resultados.

Figura: 16 Solidos Disueltos Totales



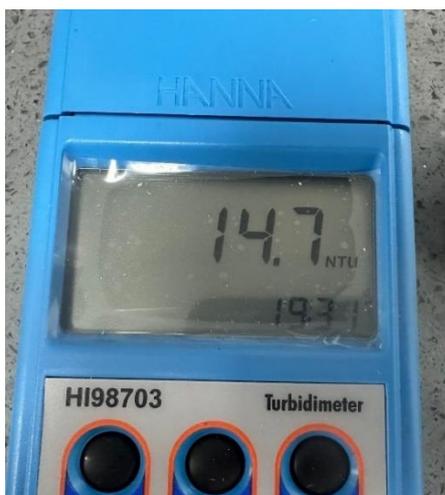
Fuente: Elaboración propia

Turbidez

Luego de calibrar correctamente el turbidímetro portátil HANNA, se debe dejar encendido durante unos minutos para permitir que el equipo se estabilice. A continuación, se coloca agua destilada en la celda y se inserta en el equipo, presionando el botón "Scan Black" para establecer un cero de referencia.

Posteriormente, se retira la celda con agua destilada y se sustituye por la celda que contiene la muestra de agua a analizar. Es crucial enjuagar la celda de dos a tres veces con la muestra para evitar contaminaciones cruzadas.

Figura: 17 Turbidez



Fuente: Elaboración propia

pH

Se realizó la calibración del equipo utilizando soluciones tampón de pH 7.01 y 4.01 o 10.1, dependiendo del rango requerido. El electrodo se enjuagó cuidadosamente con agua destilada entre cada solución, y la calibración en dos puntos para asegurar la precisión del instrumento.

Una vez calibrado fue introducido en cada muestra de agua durante unos segundos hasta que la lectura se estabilizó en la pantalla del equipo.

Figura: 18 pH – ex situ



Fuente: Elaboración propia

4.19 Análisis de los parámetros químicos

Oxígeno disuelto (OD)

Para realizare este análisis se debe preparar dos viales: uno con agua destilada, que se denominara como blanco, y otro con las muestras analizar, se debe colocar estos viales en un termo reactor a 105°C durante 2 horas, pasado este tiempo retirar los viales, dejar enfriar a temperatura ambiente. Finalmente, medir los valores utilizando un fotómetro, asegurándonos de calibrar correctamente antes de tomar las lecturas de las muestras para obtener resultados precisos.

Figura: 19 Oxígeno Disuelto



Fuente: Elaboración propia

Fosfatos

Colocar en la cubeta con 10 mL de la muestra con agua destilada, hasta la marca indicada, y cerrar la tapa. Colocar la cubeta en el soporte del medidor y cierra la tapa del instrumento. Seguido Presionar la tecla "Zero". Al completar la medición en blanco, la pantalla mostrara "-0.0-", indicando que el equipo esté listo para la medición. Colocar en la cubeta con 10mL de la muestra, agregar 10gotas del reactivo fosfato A y 1 paquete de reactivo fosfato B a la muestra y agitar sumamente. Colocar la cubeta en el medidor, iniciar el temporizador o esperar 5 minutos, luego presionar "Read" donde obtenemos el resultado de la concentración en mg/L.

Figura: 20 Fosfato



Fuente: Elaboración propia

Nitratos

Seleccionar el método "Nitrito HR" según el manual.

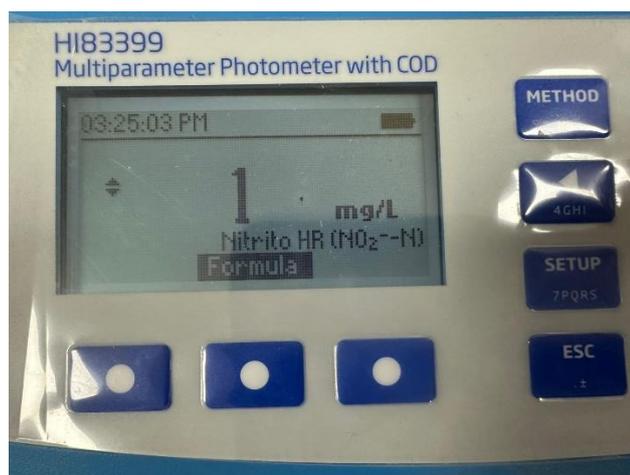
Colocar en la cubeta con 10mL de muestra sin reaccionar y cierre la tapa.

Coloque la cubeta en el medidor y presione "Zero" hasta que aparezca "0-0".

Agregue un paquete del reactivo nitrito HI 93708-0, cierre la tapa y agite sumamente.

Se colocó la cubeta nuevamente en el medidor, inicie el temporizador a 10 minutos, luego presione "Red" para obtener la concentración de nitrito (NO_3) en mg/L.

Figura: 21 Nitrato



Fuente: Elaboración propia

Demanda Química de Oxígeno (DBO5)

Para estimar la DBO5 a partir de Oxígeno Disuelto, se debe multiplicar el valor de OD, por un factor de biodegradabilidad (FC), que suele ser 0.6. Con la siguiente fórmula.

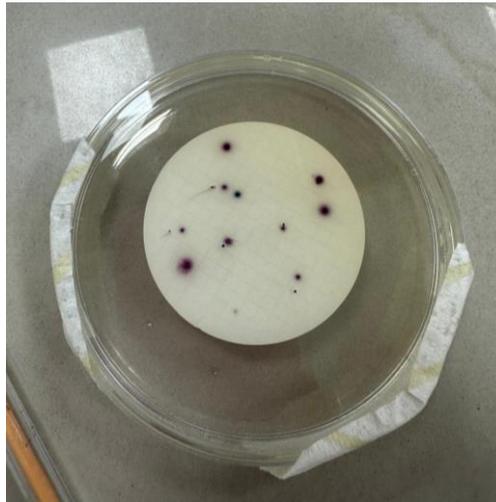
$$\text{DBO5} = \text{OD} * \text{FC}$$

El valor obtenido indica la cantidad de oxígeno consumido por microorganismos para descomponer la materia orgánica biodegradable en 5 días.

4.20 Análisis de los parámetros microbiológicos.

Para la determinación de coliformes totales mediante filtración, se prepara el medio de cultivo, como agar cromo génico, que se disuelve en agua destilada, se esteriliza por autoclave a 121°C por 15 minutos, se deja enfriar a 45-50°C. Posteriormente, se filtra un volumen conocido de la muestra utilizando una membrana de 0.45µm, que retiene los coliformes presentes en la muestra. El filtro se coloca en una placa con el medio antes ya mencionado. La placa es llevada a incubación a 35°C por 24-48 horas en condiciones anaeróbicas. Tras la incubación se cuenta las colonias visibles en el filtro.

Figura: 22 Coliformes Totales



Fuente: Elaboración propia

4.21 Análisis y métodos para la identificación de macroinvertebrados

El análisis de macroinvertebrados en cuerpos de agua es una técnica fundamental para evaluar la calidad ecológica, para este estudio, se seleccionará puntos estratégicos en zonas representativas donde se va a utilizar una red de mallas finas denominada '**red surber**' que permitirá capturar organismos de bentos (suelos acuáticos) de forma eficiente. (Machado et al., 2018)

Figura: 23 Red Surber



Fuente: Elaboración propia

4.22 Recolección de macroinvertebrados

La presente investigación se enmarca en un enfoque cualitativo y tiene como objetivo la recolección de macroinvertebrados presentes en cada punto de muestreo como se observa en la (figura 24).

Figura: 24 Macroinvertebrados recolectados



Fuente: Elaboración propia

4.23 Proceso de identificación de macroinvertebrados en laboratorio

La identificación de macroinvertebrados se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, utilizando estereoscopio y una caja Petri para alojar a los organismos durante el proceso de identificación y clasificación por familia. Se consultaron los siguientes manuales: **“Guía de macroinvertebrados bentónicos de la provincia de Orellana”** y **“Los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua”**.

Donde se determina las características morfológicas de cada individuo, se empleó el estereoscopio proporcionado por la universidad, lo que permitió un enfoque adecuado para observar detalladamente atributos como el cuerpo, color, patas, antenas, cabeza y

abdomen. A través de estas observaciones, se pudo identificar las familias presentes en los puntos de muestreo analizado.

Figura: 25 ESTEREOSCOPIO



Fuente: (Lunazzi et al., 2015)(Lunazzi et al., 2015)

4.24 Cálculos de Índice BMWP/COL

Para el cálculo del índice BMWP/COL, es necesario primero identificar las familias de macroinvertebrados recolectadas en los distintos puntos de muestreo. Este índice es considerado un método eficaz, sencillo y rápido para evaluar la calidad del agua.

El puntaje asignado a cada familia varía de 1 a 10, donde 1 corresponde a los grupos más tolerantes a la contaminación y 10 a aquellos más sensibles. Se presenta una tabla que muestra el puntaje de sensibilidad correspondiente a cada familia de macroinvertebrados identificados en los sitios de muestra. (Tabla 10).(Castro, 2020)

4.25 Índice de Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera (ETP)

4.25.1.1 Método de Evaluación

Para calcular el índice, se recolecta muestras de macroinvertebrados en diferentes puntos del cuerpo de agua. Luego, se identifica la cantidad de individuos de las órdenes EPT y se calcula el porcentaje total de estos en relación con la comunidad de

macroinvertebrados. Cuando es la proporción de los individuos ETP en la muestra, mejor es la calidad de agua. (Hodkinson et al., 1981)

4.26 Recopilación de datos ETAPA

Datos obtenidos mediante el laboratorio de ETAPA de puntos de muestreo con información sobre la concentración de contaminantes (Cianuro, Mercurio, Plomo, Plata, Sustancias solubles en hexano) en cada punto.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Delimitación del área de estudio

En el software Arc Gis se obtuvieron datos correspondientes a los parámetros morfométricos generales de la cuenca del río Santa Barbara. Los resultados se obtuvieron a partir de procesamiento y análisis de modelos digitales de elevación (MDE) y la herramienta de análisis hidrológico nos permite obtener de una manera precisa y detallada el análisis técnico.

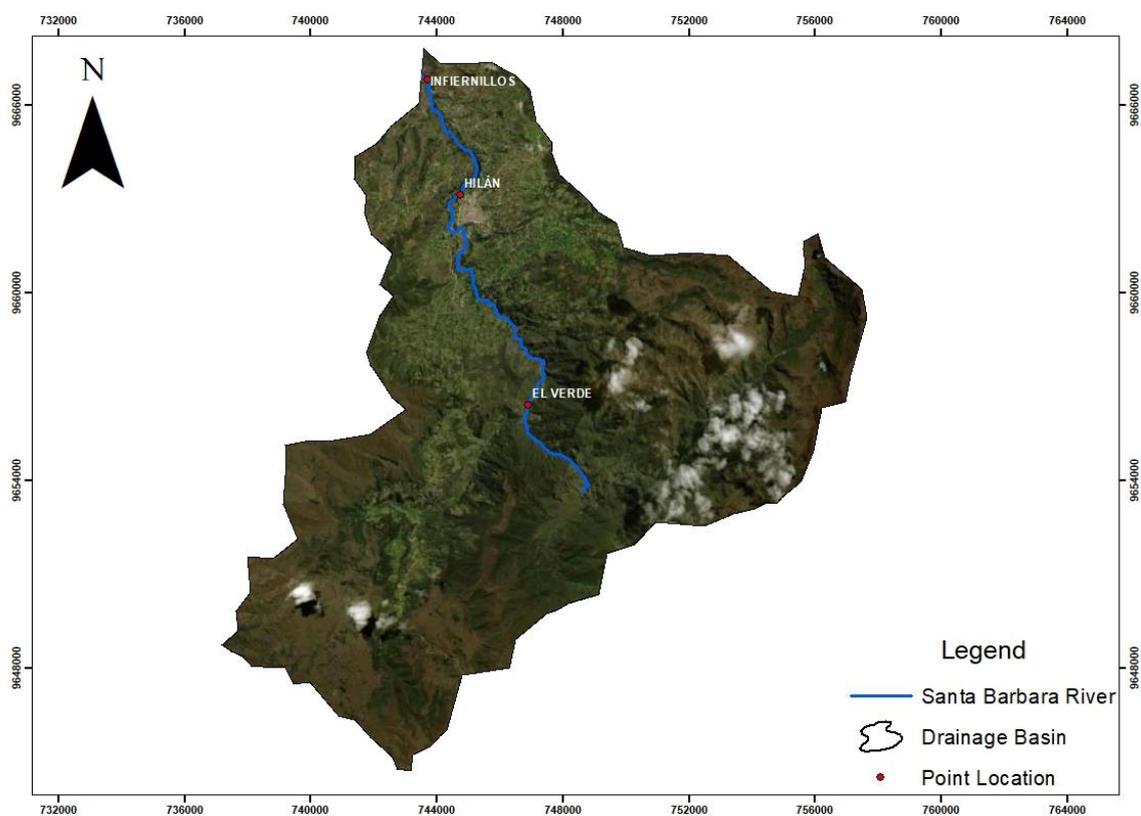
Tabla 19: Características morfométricas de la cuenca

Características morfométricas de la cuenca		
CARACTERISTICAS	VALOR	UNIDAD
AREA	221.66	Km_2
PERIMETRO DE LA CUENCA	79.11	Km
LONGITUD DE LA CUENCA	18.59	km
LONGITUD AXIAL	14.5	km
ANCHO	15.29	km
DESNIVEL	4.09	Km

Fuente: Elaboración propia

5.2 Distancia entre puntos de muestreo

Mapa 2: Distancia entre puntos de muestreo



Fuente: Elaboración propia

El mapa muestra la ubicación de los puntos de muestreo: **M1** corresponde a la zona minera, **M2** a la zona urbana, **M3** a la zona rural, de acuerdo con los sitios seleccionados para el análisis.

5.3 Parámetros físicoquímicos y microbiológicos

Los parámetros físicoquímicos y microbiológicos están detallados en la **tabla 20** las muestras fueron recolectadas durante cuatro campañas de muestreo realizadas en diferentes estaciones climáticas. Los puntos de muestreo, denominados **M1**, **M2**, **M3** están ubicados específicamente en la cuenca del río Santa Bárbara. Cada campaña de muestreo abarcó estos puntos representativos, lo que permitió una evaluación integral de la calidad del agua, considerando las variaciones estacionales y la posible contaminación derivada de la actividad minera de la zona.

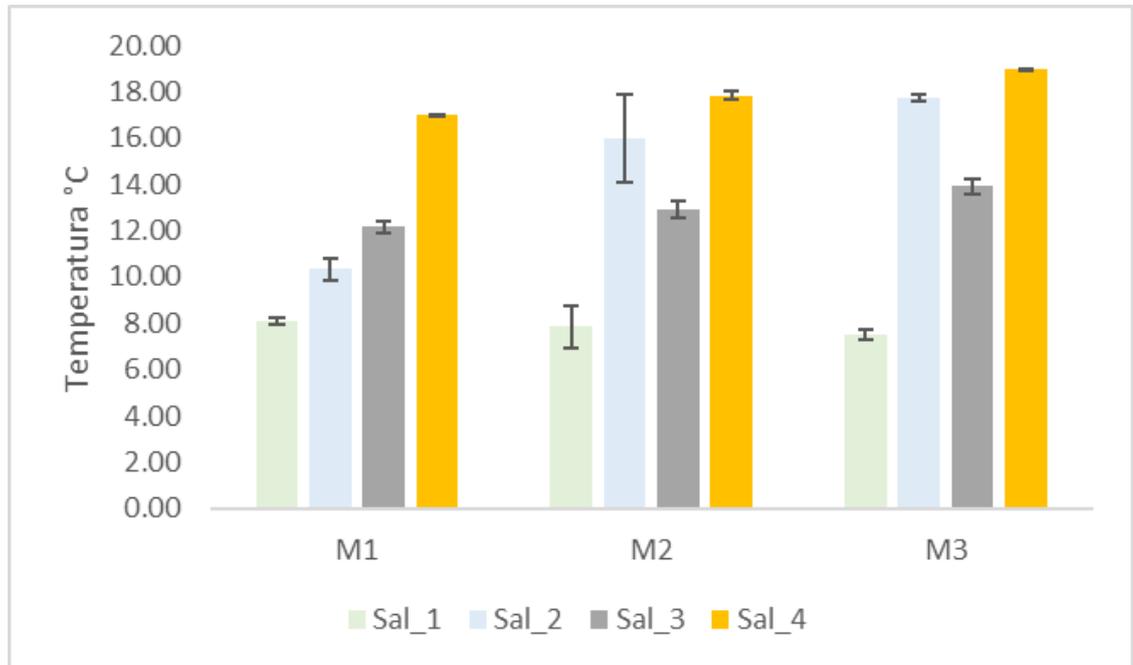
5.4 Análisis del índice de calidad de agua

A través del análisis de laboratorio, se obtuvieron los valores necesarios para la construcción de tablas de calidad del agua. Cada uno de los parámetros están evaluados detalladamente con el fin de determinar su cumplimiento con los estándares de calidad y su implicancia en la salud ambiental y humana.

5.5 Análisis físico-químico

Temperatura

Figura: 26 Análisis físico-químico-Temperatura



Fuente: Elaboración propia

Variabilidad: En la M1 y M3 nos indica valores consistentes (baja desviación estándar), mientras que en la M2 presenta mayor variabilidad, especialmente en Sal_2.

Punto M1 (Parte Alta)

- Distribución térmica: Se observa una variación de temperatura entre ($\sim 8.09^{\circ}\text{C}$) Sal_1 y ($\sim 17.02^{\circ}\text{C}$) Sal_4, con una diferencia térmica de ($\sim 8.93^{\circ}\text{C}$) entre las muestras.
- Variabilidad térmica: Las desviaciones estándar en este punto son bajas (0.12-0.47), lo que sugiere condiciones térmicas relativamente estables.
- Interpretación: La menor temperatura en Sal_1 puede estar asociada a zonas de captación con mayor cobertura vegetal, menor incidencia solar o aportes de aguas

subterráneas. Por otro lado, el incremento térmico en Sal_4 indica un posible impacto de actividades antrópicas, como descargas de efluentes o exposición a radiación solar o con alta cobertura vegetal.

Punto M2 (Parte Media)

- **Distribución térmica:** Se evidencia un aumento de la temperatura, con valores que oscilan entre ($\sim 7.84^{\circ}\text{C}$) Sal_1 y ($\sim 17.84^{\circ}\text{C}$) Sal_4, con una diferencia de 10.00°C entre los puntos de muestreo.
- **Variabilidad térmica:** Mayor variabilidad térmica en toda la cuenca, especialmente en Sal_2 (1.89) y Sal_1 (0.94). Esta variedad térmica indica la existencia de múltiples fuentes de entrada de calor o mezclas de aguas de diferentes características térmicas.
- **Interpretación:** La variabilidad observada sugiere que M2 es una zona de transición donde se pueden estar incorporando aguas provenientes de vertimientos agrícolas o urbanos, lo que explicaría los aumentos de temperatura en Sal_2 y Sal_4. Además, los procesos de mezcla y sedimentación pueden estar afectando la disipación del calor en esta sección del río.

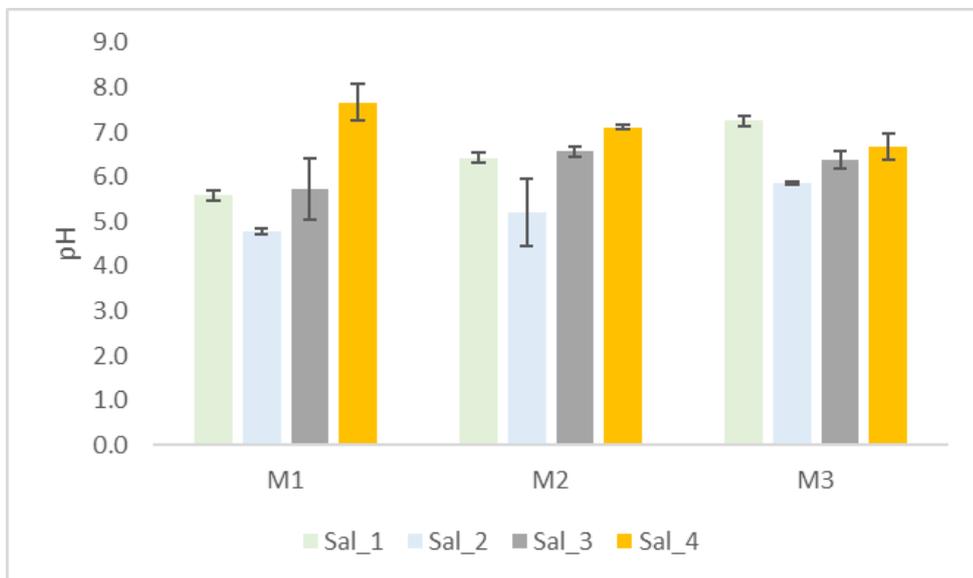
Punto M3 (Parte Baja)

- **Distribución térmica:** Se registran las temperaturas más elevadas alcanzando hasta ($\sim 18.96^{\circ}\text{C}$) en Sal_4, con una diferencia de ($\sim 11.46^{\circ}\text{C}$) respecto a la muestra más fría (Sal_1, 7.50°C).
- **Variabilidad térmica:** Se observa una reducción en la desviación estándar en comparación con M2, con valores entre 0.12 y 0.35. Esto indica una mayor estabilidad térmica en este punto.
- **Interpretación:** La estabilización térmica puede estar relacionada con una reducción en la velocidad del flujo, permitiendo la acumulación de calor y

favoreciendo el equilibrio térmico entre las masas de agua. Además, el efecto de dispersión y la mayor distancia de transporte pueden contribuir a la homogenización de la temperatura. Sin embargo, la persistencia de temperaturas elevadas en Sal_2 y Sal_4 puede tener implicaciones en la calidad del agua, como la disminución del oxígeno disuelto.

pH

Figura: 27 Análisis físico-químico-pH



Fuente: Elaboración propia

Variabilidad: en los puntos M1 y M3 presenta mayor estabilidad en la Sal_1 y Sal_2 (desviación estándar bajas), mientras tanto en la Sal_3 y Sal_4, las desviaciones son más altas, indicando fluctuaciones mayores.

Punto M1 (Parte Alta)

- Distribución del pH: Se observa un ambiente ácido en Sal_2 (~4.78) y en menor medida en Sal_1 (~5.59) y Sal_3 (~5.73), mientras que Sal_4 presenta un valor significativamente más alto (~7.67).

- Variabilidad: La mayor desviación estándar se encuentra en Sal_3 (0.69), lo que indica fluctuaciones importantes en la acidez en este punto.

- Interpretación:

El pH ácido en Sal_2 (~4.78) y Sal_3 (~5.73) presenta una lixiviación de metales pesados.

La mayor variabilidad en Sal_3 sugiere que existen descargas intermitentes de efluentes mineros, lo que genera fluctuaciones en la acidez del agua.

El valor más alto en Sal_4 (~7.67) podría deberse a una menor afectación directa de los residuos mineros o a procesos de mezcla con aguas menos impactadas en este punto.

Punto M2 (Parte Media)

- Distribución del pH: Se observa un aumento del pH en comparación con M1, con valores entre (~5.20) Sal_2 y (~7.11) Sal_4.
- Variabilidad: La desviación estándar más alta se encuentra en Sal_2 (0.76), lo que indica una gran fluctuación en la acidez, probablemente debido a descargas intermitentes de aguas residuales.
- Interpretación: La presencia de materia orgánica y vertimientos domésticos podría estar alterando el pH, generando episodios de acidez.

La menor variabilidad en Sal_3 y Sal_4 indica impactos de la acidez minera, aunque los vertimientos urbanos aún afectan la estabilidad química del agua.

La alta variabilidad en Sal_2 demuestra que existen descargas irregulares de efluentes, lo que puede estar relacionado con el vertimiento de aguas residuales sin tratamiento adecuado.

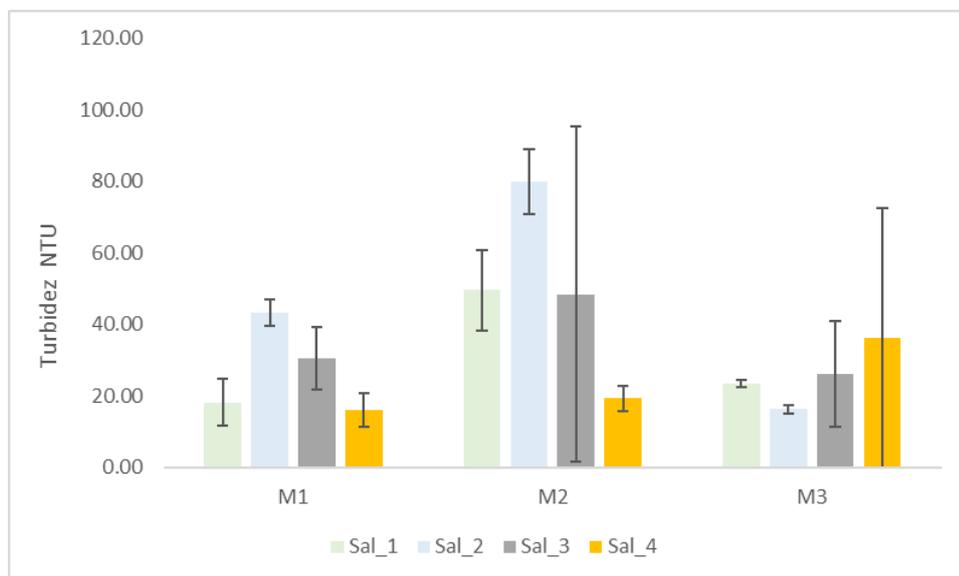
Punto M3 (Parte Baja)

- Distribución del pH: Se observan valores entre (~5.85) Sal_2 y (~7.25) Sal_1, con una tendencia hacia la neutralización del agua.
- Variabilidad: Se registran valores de desviación estándar entre (0.03) y (0.30), lo que indica que el sistema ha alcanzado una mayor estabilidad química.
- Interpretación: La escorrentía agrícola y el uso de fertilizantes podrían estar contribuyendo a la alcalinización del agua en algunos puntos, ayudando a neutralizar la acidez proveniente de las zonas aguas arriba.

La persistencia de valores bajos en Sal_2 (~5.85) indica que aún hay residuos de contaminación minera y urbana que han sido transportados hasta esta zona.

Turbidez

Figura: 28 Análisis físico-químico-Turbidez



Fuente: Elaboración propia

Variabilidad: En el punto M2 nos indica alta inestabilidad en la Sal_3; M3 es estable Sal_1, Sal_2, pero es variable en Sal_4.

Punto M1 (Parte Alta)

- La turbidez es moderada en Sal_2 (~42 NTU) y menor en Sal_1 (~20 NTU), mientras que Sal_3 (~30 NTU) y Sal_4 (~15 NTU) presentan valores más bajos.
- Esto puede deberse a la cercanía de la fuente del río, donde la actividad humana e industrial es limitada. Sin embargo, el incremento en Sal_2 puede estar relacionado con eventos naturales (desprendimientos de suelo, lluvias) o actividades agrícolas de baja escala.

Punto M2 (Parte Media)

- Se observa el valor más alto de turbidez en Sal_2 (~80 NTU) y una alta variabilidad en Sal_3 (~45 NTU), reflejando inestabilidad, probablemente por descargas directas de residuos, procesos erosivos o afluentes contaminados.
- La baja turbidez en Sal_4 (~20 NTU) sugiere que este sector puede experimentar procesos de sedimentación o condiciones estacionales que reducen la carga de sólidos suspendidos. Estos procesos, influenciados por la topografía o condiciones estacionales, pueden estar relacionados con la actividad minera aguas arriba, contribuyendo a la acumulación de contaminantes en el hecho del río, afectando negativamente al ecosistema acuático.

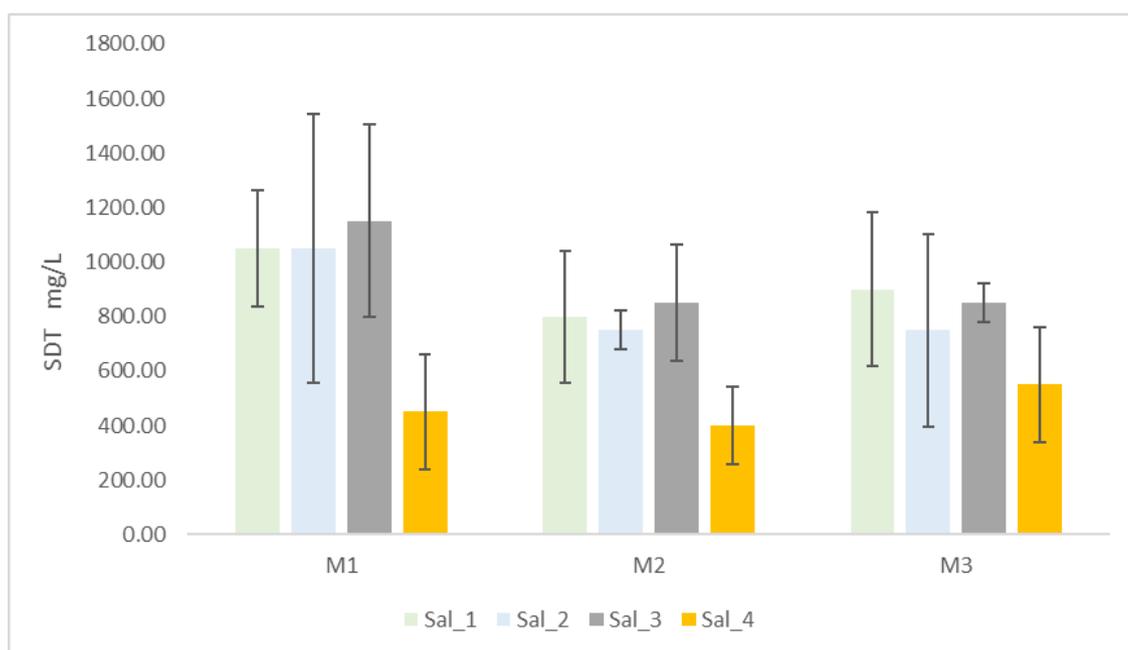
Punto M3 (Parte Baja)

- La turbidez es más uniforme en Sal_1 (~22 NTU) y Sal_2 (~18 NTU), indicando cierta estabilidad. Sin embargo, Sal_4 (~35 NTU) presenta alta variabilidad, posiblemente por acumulación de contaminantes arrastrados desde las zonas altas y medias.

- Esto podría explicarse por la influencia de actividades urbanas, descargas de aguas residuales o el efecto de la pendiente reducida que facilita la deposición de sedimentos.

Solidos Disueltos Totales

Figura: 29 Análisis físico-químico-SDT



Fuente: Elaboración propia

Variabilidad: En los puntos M1 tiene una variabilidad alta en la Sal_2, en el punto M2 presenta una variabilidad moderada en la Sal_1 y Sal_3, en el punto M3 tiene una variabilidad más equilibrada, aunque Sal_1 tiene una desviación más alta.

P 1 (Parte Alta de la Cuenca)

- **Altas concentraciones de SDT en Sal_2 y Sal_3** (superiores a 1000 mg/L), con una variabilidad considerable, sugieren aportes significativos de materiales disueltos. Esta condición es coherente con la presencia de minería artesanal, donde

el uso de químicos y el movimiento de suelos sin control generan lixiviados que contaminan el agua.

- **Posibles fuentes de contaminación** incluyen residuos de metales pesados (mercurio, plomo, arsénico) y sales minerales provenientes de procesos de extracción. La falta de medidas de mitigación ambiental permite que estos contaminantes lleguen directamente al cauce del río.

Punto M2 (Parte Media de la Cuenca)

- Los valores de SDT disminuyen respecto a M1, pero aún se mantienen elevados, especialmente en Sal_1 (~800 mg/L) y Sal_3 (~900 mg/L), con moderada variabilidad.
- Esto podría deberse a procesos de dilución natural y sedimentación de partículas más pesadas, pero también a la incorporación de nuevos contaminantes provenientes de actividades agrícolas o de vertimientos no controlados aguas arriba.
- La persistencia de altos niveles de SDT indica que los contaminantes disueltos no han sido totalmente retenidos y continúan afectando la calidad del agua.

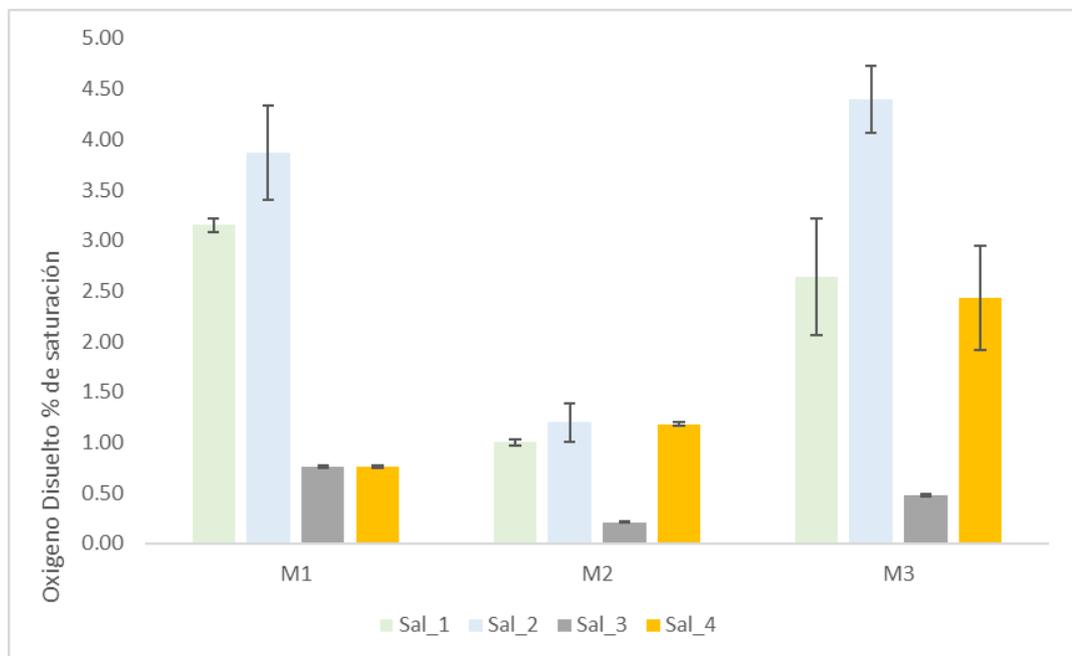
Punto M3 (Parte Baja de la Cuenca)

- Se observa una disminución general de los SDT en comparación con M1 y M2, pero se mantiene una concentración considerable, especialmente en Sal_1 (con mayor desviación estándar).

- La variabilidad más equilibrada entre las muestras sugiere que los procesos de dispersión de contaminantes han alcanzado cierta estabilidad, aunque el impacto sigue siendo notable.
- Este comportamiento podría estar relacionado con la sedimentación parcial de partículas en suspensión y la menor velocidad del flujo, lo que permite que algunos sólidos disueltos se mantengan en el agua.

Oxígeno Disuelto

Figura: 30 Análisis físico-químico-OD



Fuente: Elaboración propia

Variabilidad: en el punto M1 tiene poca variabilidad, con desviaciones estándar muy baja en la Sal_1 y Sal_4, en el punto M2 presenta una variabilidad moderada, en Sal_2, mientras que el punto M3 tiene la mayor variabilidad, particularmente en Sal_1 y Sal_4.

Punto M1 (Parte Alta de la Cuenca)

- Altos valores de OD en Sal_1 (~3.1%) y Sal_2 (~3.9%) indican condiciones relativamente saludables, compatibles con menor carga contaminante y buena aireación natural, propia de zonas de cabecera de cuenca.
- Bajos valores de OD en Sal_3 (~0.6%) y Sal_4 (~0.7%) podrían ser consecuencia directa de la minería ilegal presente en esta zona. Los residuos sólidos y líquidos, junto con la materia orgánica, aumentan la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), disminuyendo los niveles de OD.
- La baja variabilidad sugiere estabilidad en los aportes de oxígeno en Sal_1 y Sal_4, pero la notable diferencia con Sal_3 podría estar asociada a descargas puntuales de contaminantes o alteraciones en el flujo del agua.

Punto M2 (Parte Media de la Cuenca)

- Los valores de OD disminuyen considerablemente, especialmente en Sal_1 (~1.0%) y Sal_2 (~1.2%), reflejando una condición de estrés ambiental severo. Esto podría deberse a la acumulación de contaminantes arrastrados desde la parte

alta y a la posible presencia de descargas domésticas o agrícolas, los cuales incrementan la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), reduciendo la disponibilidad de OD.

- Sal_3 mantiene valores bajos (~0.2%), lo que refuerza la hipótesis de contaminación orgánica o química, afectando la capacidad del agua para retener oxígeno.
- Sal_4 (~1.1%) muestra un ligero aumento respecto a Sal_3, posiblemente por procesos de autodepuración o dilución, aunque los valores siguen siendo críticos para la vida acuática.
- La variabilidad moderada sugiere fluctuaciones en los aportes de contaminantes o cambios en el caudal, influenciados por factores climáticos o actividades humanas.

Punto M3 (Parte Baja de la Cuenca)

- Se observa un incremento en los niveles de OD en Sal_2 (~4.5%), lo que podría atribuirse a procesos de recuperación natural, mezcla con afluentes menos contaminados o mayor turbulencia que favorece la aireación.
- Sin embargo, los valores de Sal_3 (~0.3%) siguen siendo extremadamente bajos, lo que indica persistencia de contaminantes y posiblemente zonas de estancamiento donde el agua no se renueva fácilmente.
- Sal_1 (~2.6%) y Sal_4 (~2.5%) muestran una alta variabilidad, lo que sugiere condiciones inestables probablemente influenciadas por descargas intermitentes o por la sedimentación de materiales contaminantes

5.5.1 Índice de Calidad de Agua en la Zona Minera

La zona minera presento mayor influencia, donde se ve afectado significativamente la calidad del agua.

Figura: 31 Índice de calidad de agua zona minera

Parámetros	Salidas a campo				Promedio	Unidades	Subíndice	Peso Relativo	F.sumatoria	F.multiplicat				
	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4										
Cambio de Temperatura	7.50	17.75	13.92	18.96	14.53	°C	25	W_i	0.1	2.5	1.38			
Turbidez	23.44	16.30	26.17	36.35	25.57	NTU	45		0.08	3.6	1.36			
PH	7.25	5.85	6.38	6.67	6.49		40		0.12	4.8	1.56			
Fosfatos	1.07	0.58	1.02	0.55	0.89	mg/L	40		0.1	4	1.45			
Nitratos	13.84	5.83	21.17	12.00	13.61	mg/L	35		0.1	3.5	1.43			
Solidos Disueltos Totales	900.00	750.00	850.00	550.00	833.33	mg/L	32		0.08	2.56	1.32			
OD	0.54	4.40	0.48	2.43	1.81	mg/L	8		0.17	1.36	1.42			
DBO	0.32	2.64	0.29	0.15	0.85	mg/L	75		0.1	7.5	1.54			
Coliformes Totales	37100.00	41000.00	75000.00	43000.00	49025.00	NMP/100	9		0.15	1.35	1.39			
									ICA	31.17	12.84			
										MALA	PESIMA			

Zona Minera

Parámetros	Salidas a campo				Promedio	Unidades	Subíndice	Peso Relativo	F.sumatoria
	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4					
Cambio de Temperatura	7.50	17.75	13.92	18.96	14.53	°C	25	0.1	2.5
Turbidez	23.44	16.30	26.17	36.35	25.57	NTU	45	0.08	3.6
PH	7.25	5.85	6.38	6.67	6.49		40	0.12	4.8
Fosfatos	1.07	0.58	1.02	0.55	0.89	mg/L	40	0.1	4
Nitratos	13.84	5.83	21.17	12.00	13.61	mg/L	35	0.1	3.5
Solidos DisueltosTotales	900.00	750.00	850.00	550.00	833.33	mg/L	32	0.08	2.56
OD	0.54	4.40	0.48	2.43	1.81	mg/L	8	0.17	1.36
DBO	0.32	2.64	0.29	0.15	0.85	mg/L	75	0.1	7.5
Coliformes Totales	37100.00	41000.00	75000.00	43000.00	49025.00	NMP/100	9	0.15	1.35
								ICA	31.17
									MALA

Zona Minera

Parámetros	Salidas a campo				Promedio	Unidades	Subíndice	Peso Relativo	F.sumatoria
	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4					

Cambio de Temperatura	7.50	17.75	13.92	18.96	14.53	°C	25	0.1	2.5
Turbidez	23.44	16.30	26.17	36.35	25.57	NTU	45	0.08	3.6
PH	7.25	5.85	6.38	6.67	6.49		40	0.12	4.8
Fosfatos	1.07	0.58	1.02	0.55	0.89	mg/L	40	0.1	4
Nitratos	13.84	5.83	21.17	12.00	13.61	mg/L	35	0.1	3.5
Solidos DisueltosTotales	900.00	750.00	850.00	550.00	833.33	mg/L	32	0.08	2.56
OD	0.54	4.40	0.48	2.43	1.81	mg/L	8	0.17	1.36
DBO	0.32	2.64	0.29	0.15	0.85	mg/L	75	0.1	7.5
Coliformes Totales	37100.00	41000.00	75000.00	43000.00	49025.00	NMP/100	9	0.15	1.35
								ICA	31.17
									MALA

Impacto en el medio ambiente: En esta zona minera revela una grave afección en la calidad de agua, los niveles elevados de parámetros como nitrato, fosfato, turbidez, coliformes totales, junto con el oxígeno disuelto, esto nos indica una alta contaminación. El ICA, donde se clasifico la calidad de agua en mala y pésima, nos refleja el impacto negativo por las actividades mineras, donde pone en riesgo la salud ambiental y humana (Asensi et al., 2019; Duque-sarango et al., 2018; Montalvo-Ochoa et al., 2020)

5.5.2 Índice de Calidad de agua en la Zona Urbana

Figura: 32 : Índice de calidad de agua zona urbana

Parámetros	Zona Urbana										
	Salidas a campo				Promedio	Unidades	Subíndice	Peso Relativo	F.sumatoria	F.multiplicat	
	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4							
	Cambio de Temperatura	7.84	16.00	12.92	17.84	13.65	°C	20	0.1	2	1.35
Turbidez	49.62	149.83	48.46	19.33	66.81	NTU	32	0.08	2.56	1.32	
PH	6.42	5.20	6.56	7.11	6.32		45	0.12	5.4	1.58	
Fosfatos	1	2.87	0.13	0.42	1.11	mg/L	60	0.1	6	1.51	
Nitratos	30.5	53.33	2.17	17.00	25.75	mg/L	42	0.1	4.2	1.45	
Solidos DisueltosTotales	800	750.00	750.00	400.00	675.00	mg/L	35	0.08	2.8	1.33	
OD	1.28	1.20	0.21	1.18	0.97	mg/L	8	0.17	1.36	1.42	
DBO	0.768	0.72	0.13	0.71	0.58	mg/L	90	0.1	9	1.57	
Coliformes Totales	17200	16250.00	16500.00	63750.00	28425.00	NMP/100	9	0.15	1.35	1.39	
									ICA	34.67	12.92
										MALA	PESIMA

Fuente: Elaboración propia

Impacto Ambiental

En la Zona Urbana, se analizó los parámetros mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA), donde el análisis revela una calidad de agua mala a pésima, sabiendo que los niveles de turbidez, nitratos, fosfatos y coliformes totales, nos indican una fuerte contaminación orgánica y microbiológica, es excesiva por la actividad humana. La baja concentración de oxígeno disuelto y el alto valor de DBO reflejan un entorno acuático deficiente en oxígeno, lo que afecta negativamente a los ecosistemas acuáticos donde se presenta un gran riesgo para la salud pública.

5.5.3 Índice de Calidad de agua en la Zona Rural

Figura: 33 Índice de calidad de agua zona rural

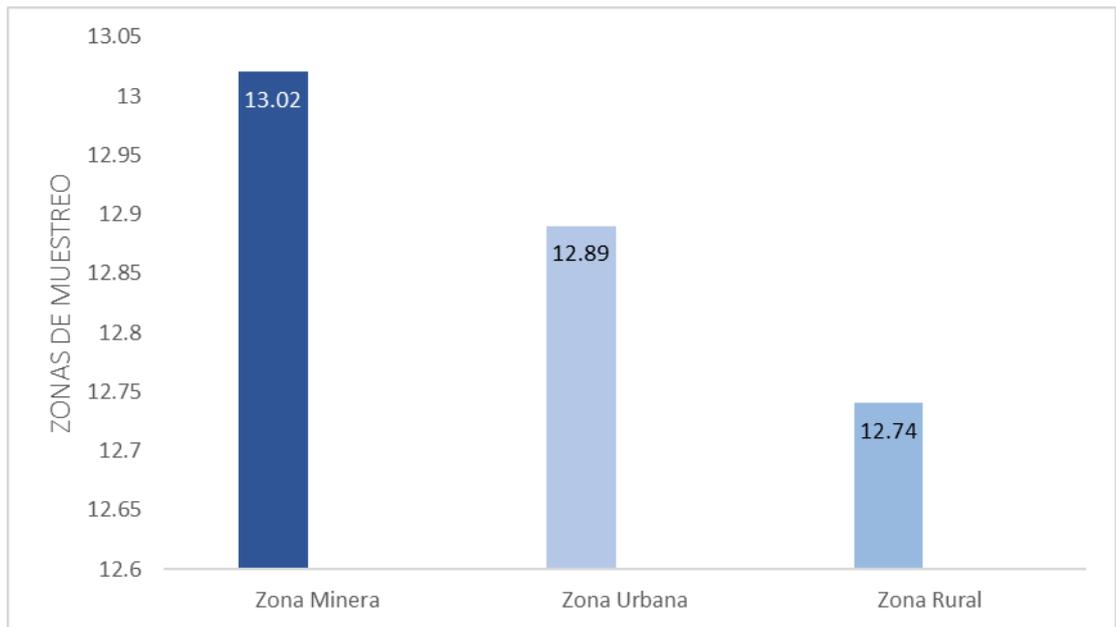
Zona Rural										
Parámetros	Salidas a campo				Promedio	Unidades	Subíndice	Peso Relativo	F.sumatoria	F.multiplicat
	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4						
	Cambio de Temperatura	8.09	10.33	12.17						
Turbidez	18.22	43.28	30.56	16.04	27.03	NTU	60	0.08	4.8	1.39
PH	5.59	4.78	5.73	7.67	5.94		52	0.12	6.24	1.61
Fosfatos	0.39	0.95	0.15	0.72	0.55	mg/L	60	0.1	6	1.51
Nitratos	12.17	29.33	2.67	18.17	15.59	mg/L	20	0.1	2	1.35
Solidos DisueltosTotales	1050.00	1050.00	1150.00	450.00	925.00	mg/L	48	0.08	3.84	1.36
OD	3.87	3.87	0.76	0.76	2.32	mg/L	8	0.17	1.36	1.42
DBO	2.32	2.32	0.46	0.46	1.39	mg/L	92	0.1	9.2	1.57
Coliformes Totales	3560.00	39750.00	38000.00	39250.00	30140.00	NMP/100	9	0.15	1.35	1.39
								ICA	36.79	12.95
									MALA	PESIMA

Fuente: Elaboración propia

Impacto Ambiental

En la Zona Rural, los resultados de los análisis de los parámetros mediante el Índice de Calidad de Agua (ICA), nos indica la presencia de agua de mala a pésima, donde los valores elevados de turbidez, nitratos, fosfatos, DBO5, y coliformes totales se refleja una contaminación orgánica y microbiológica significativa, donde proviene de actividades humanas y agrícolas, además, con la baja concentración de oxígeno disuelto es un ambiente con niveles críticos de oxígeno, donde está afectando la salud de los ecosistemas acuáticos

Figura: 34 índice de Calidad de Agua



Fuente: Elaboración propia

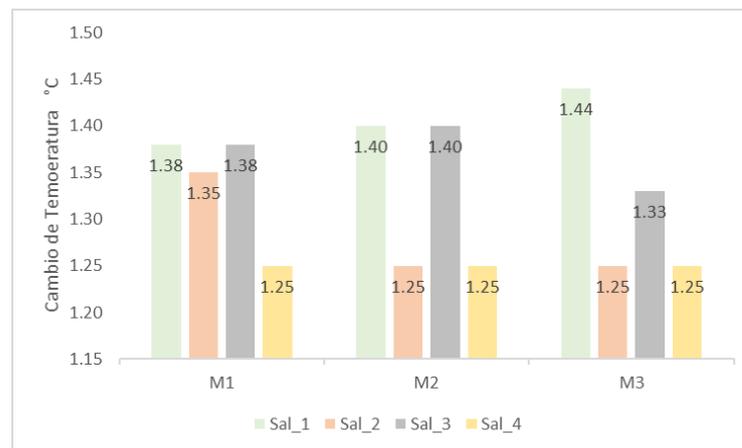
En análisis del Índice de Calidad de Agua (ICA) para las tres zonas evaluadas, posee una calidad pésima en condiciones altamente degradadas en el cual se ve reflejada que la peor calidad de agua es en la **zona minera** con un valor ICA de 13.02.

5.6 Cuantificación de parámetros para evaluar la calidad de agua mediante ICA.

Cambio de temperatura

Muestran variaciones significativas en cada zona.

Figura: 35 Cambio de Temperatura- ICA



Fuente: Elaboración propia

M1 (Zona Minera)

- **Rango:** 1.25 – 1.38
- Los análisis con leves fluctuaciones, indican un impacto técnico moderado debido actividades mineras, se podrían alterar la temperatura debido al drenaje.

M2 (Zona Urbana)

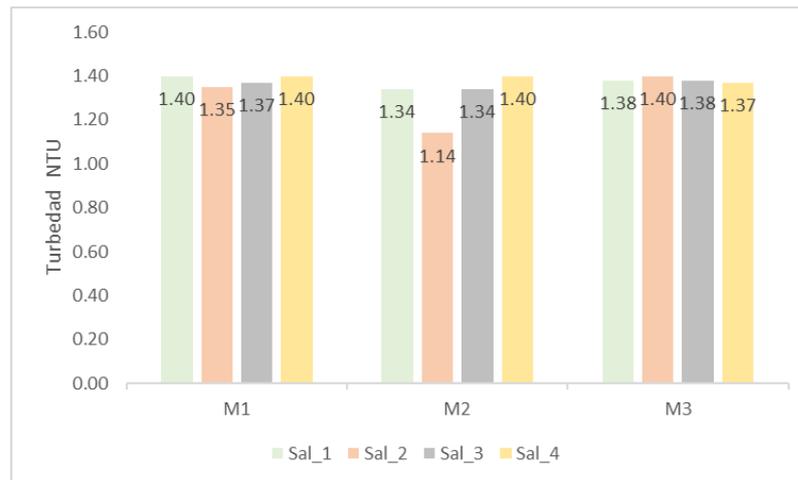
- **Rango:** 1.25 - 1.40
- Posee una ligera variación por el impacto de las actividades urbanas, que podrían causar pequeños aumentos de temperatura.

M3 (Zona Rural)

- **Rango:** 1.25 – 1.44
- Las actividades agrícolas alteran las temperaturas donde se muestran una mayor variabilidad.

Turbidez

Figura: 36 Turbidez - ICA



Fuente: Elaboración propia

M1 (Zona Minera)

- **Rango:** 1.35 – 1.40
- La turbidez es relativamente constante, posiblemente debido a la suspensión de partículas finas generadas por el movimiento de tierra en la actividad minera.

M2 (Zona Urbana)

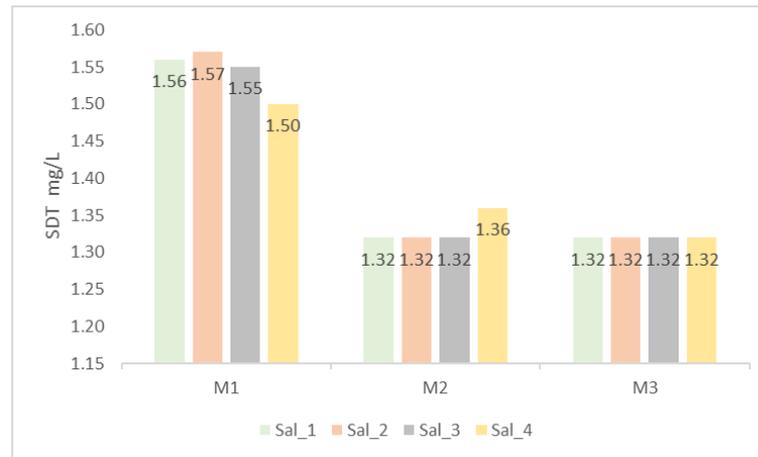
- **Rango:** 1.14 – 1.40
- Posee un ligero descenso debido a las intensas lluvias, aunque la sedimentación en el área urbana ha influenciado significativamente.

M3 (Zona Rural)

- **Rango:** 1.37 – 1.40
- En este punto nos indica una turbidez estable.

Solidos Disueltos Totales

Figura: 37 Solidos Disueltos Totales - ICA



Fuente: Elaboración propia

M1 (Zona Minera)

- **Rango:** 1.50 – 1.57
- Nos indica que es la zona con mayor concentración de SDT, que podría ir aumentando de acuerdo a las actividades minera y la presencia de minerales y residuos derivados de la extracción.

M2 (Zona Urbana)

- **Rango:** 1.32 – 1.36
- Con una variación moderada, lo que sugiere que las descargas de aguas residuales urbanas tienen un menor impacto.

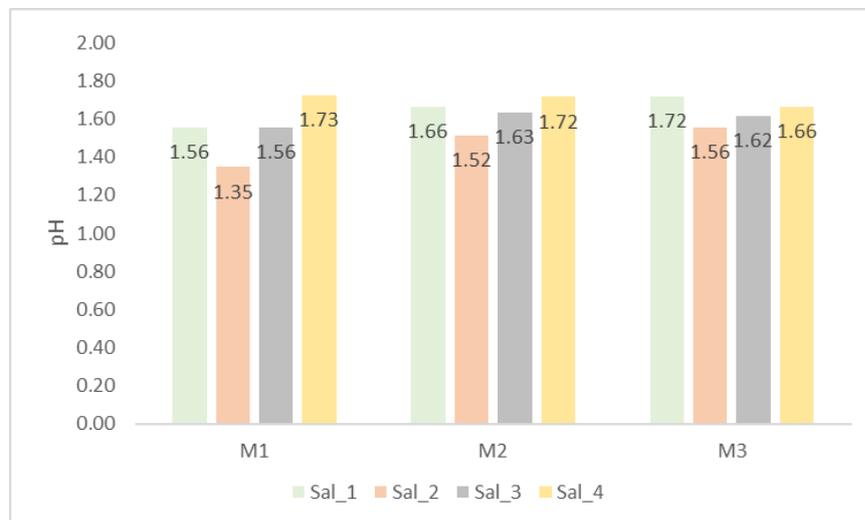
M3 (Zona Rural)

- **Rango:** 1.32
- Indica una total estabilidad en los SDT, donde se refleja baja intervención humana en cuanto a fuentes de contaminación.

pH

El análisis de pH evidencia un impacto significativo según las actividades en cada zona.

Figura: 38 pH - ICA



Fuente: Elaboración propia

M1 (Zona Minera)

- **Rango:** 1.35 – 1.73
- El pH indica un índice bajo, causado por el drenaje de ácido de mina o lixiviación en actividades mineras, que presenta un riesgo para la vida acuática por lo que los niveles ácidos alteran el ecosistema.

M2 (Zona Urbana)

- **Rango:** 1.52 – 1.72

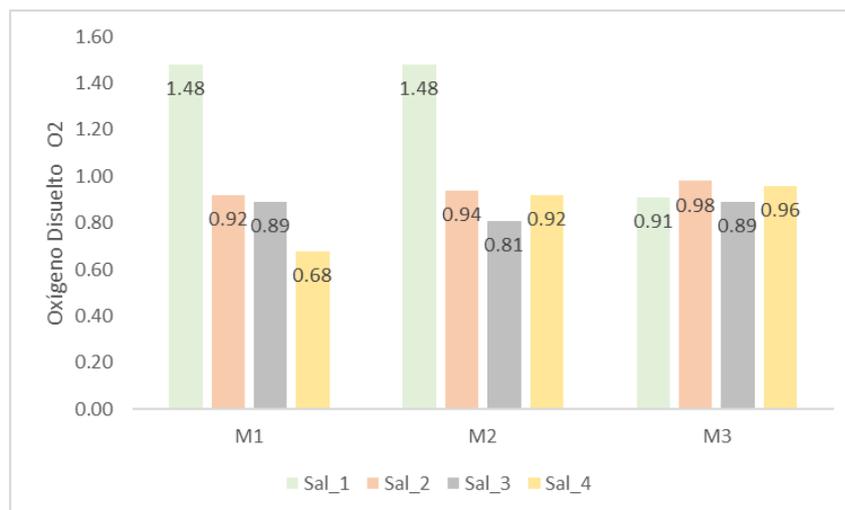
- Refleja una leve acidificación de agua, posiblemente por las descargas de aguas residuales. camal (matadero), donde estas actividades urbanas alteran la calidad de agua.

M3 (Zona Rural)

- **Rango:** 1.56 – 1.72
- Está relacionado con la influencia de actividades agrícolas que alteran ligeramente la química del agua.

Oxígeno Disuelto

Figura: 39 Oxígeno Disuelto - ICA



Fuente: Elaboración propia

M1 (Zona Minera)

- **Rango:** 0.68 – 1.48
- Indica una menor concentración de oxígeno en áreas cercana a las actividades mineras.

M2 (Zona Urbana)

- **Rango:** 0.81 – 0.94
- Tiene menores concentraciones de oxígeno en áreas urbanas por la presencia de contaminantes orgánicos.

M3 (Zona Rural)

- **Rango:** 0.89 – 0.98
- Indica una calidad de agua estable y relativamente buena, esto se debe a menor contaminación y actividad humana.

Demanda Bioquímica de Oxígeno

Figura: 40 DBO5 - ICA



Fuente: Elaboración propia

M1 (Zona Minera)

- **Rango:** 1.55 – 1.56
- Se relaciona con la presencia de materia orgánica y contaminantes de la actividad minera.

M2 (Zona Urbana)

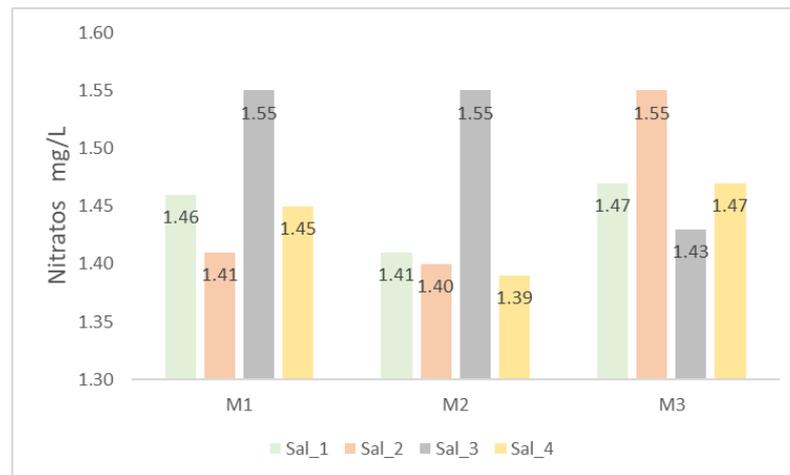
Los valores son constantes, lo que indica una DBO5 más alta y estable, mayormente es la presencia en zonas urbanas debido a una mayor carga de materia orgánico.

M3 (Zona Rural)

- **Rango:** 1.54 – 1.58
- En la zona rural posee menos contaminantes, las actividades agrícolas y el uso de fertilizantes podrían incrementar ligeramente la demanda de oxígeno.

Nitratos

Figura: 41 Nitratos - ICA



Fuente: Elaboración propia

M1 (Zona Minera)

- **Rango:** 1.41 – 1.55 mg/L
- Su concentración de nitratos es moderada, ya que los nitratos pueden originarse de fuentes como la actividad minera, el uso de explosivos y la escorrentía de aguas contaminadas.

M2 (Zona Urbana)

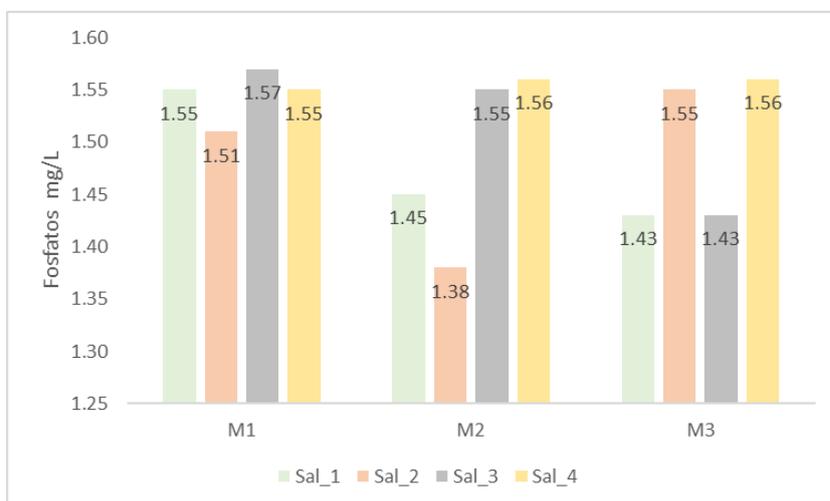
- **Rango: 0.99 – 1.55 mg/L**
- Con una concentración más elevada, con una influencia de actividades urbanas, como uso de fertilizantes, aguas residuales y la presencia de un matadero, los residuos de animales pueden contener nitrógeno en forma de amoníaco y compuestos nitrogenados que ser arrastrado hacia fuente de aguas cercanas.

M3 (Zona Rural)

- **Rango: 1.43 – 1.55 mg/L**
- Con una concentración más alta por el uso de fertilizantes, agrícolas.

Fosfatos

Figura: 42 Fosfatos - ICA



Fuente: Elaboración propia

M1 (Zona Minera)

- **Rango: 1.55 – 1.57 mg/L**

- Su influencia es por los procesos de extracción que liberan fosfatos en el agua. Estos niveles indican una posible carga de contaminación por actividades de mineras.

M2 (Zona Urbana)

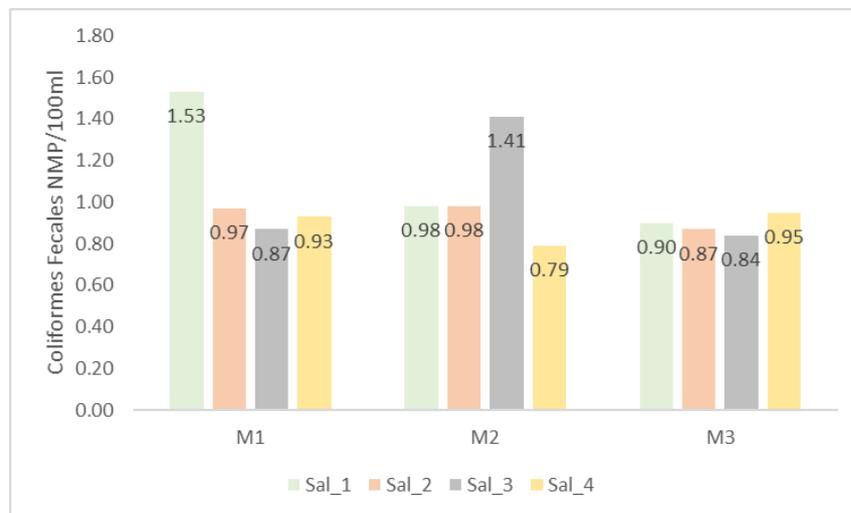
- **Rango:** 1.45 – 1.56 mg/L
- El principal aporte proviene de las actividades domésticas, como el uso de detergentes, incluyendo los mataderos, esto puede contribuir a la eutrofización del cuerpo de agua.

M3 (Zona Rural)

- **Rango:** 1.43 – 1.56 mg/L
- Su principal fuente de contaminación son los fertilizantes agrícolas, aunque comparando los valores con las otras zonas, el uso intensivo puede generar acumulación de fosfatos, que afecta a largo plazo la calidad de agua.

Coliformes Fecales

Figura: 43 Coliformes Totales - ICA



Fuente: Elaboración propia

M1 (Zona Minera)

- **Rango:** 0.87 – 1.53 NMP
- La presencia de coliformes totales en esta zona está relacionada con el manejo inadecuado de residuos o filtraciones de agua de actividades mineras por lo que presenta altos valores.

M2 (Zona Urbana)

- **Rango:** 0.79 – 1.41 NMP
- Influencia de actividades urbanas de descargas de agua residuales, sus valores altos podrían estar provocados por infraestructuras sanitarias o redes de alcantarillados.

M3 (Zona Rural)

- **Rango:** 0.84 – 0.95 NMP

- En esta zona la presencia de coliformes puede estar atribuida a la escasa infraestructura de saneamiento, un manejo de baja escala de aguas residuales y prácticas agrícolas.

El análisis de calidad de agua detalla que en la **zona minera (M1)**, las actividades mineras afectan parámetros como el pH, SDT y el OD. En la **zona urbana(M2)**, las actividades alteran ligeramente el pH, nitratos y turbidez. En la **zona rural(M3)**, las actividades agrícolas afectan principalmente los nitratos, fosfatos y la turbidez, en esta zona el impacto es menor que en otros parámetros. La presencia de coliformes Totales en la zona minera y urbana, mientras que en la zona rural tiene valores más bajos.

5.7 Metales Pesados

La representación de datos se llevó a cabo mediante el análisis estadístico en Excel, lo que permite realizar comparaciones con los límites máximos establecidos por el TULSMA Libro VI, Anexo 1. Este enfoque nos permitió la evaluación de si existe contaminación en el río Santa Barbara como resultado de la actividad minera. Además, se elaboró mapas de dispersión utilizando Arc Gis para visualizar la distribución espacial de los contaminantes.

5.8 Análisis de datos de la Cuenca del Rio Santa Barbara frente a los criterios de calidad del agua en el TULSMA Libro VI, Anexo 1.

5.9 Análisis comparativo entre la Normativa Ambiental vigente y los resultados obtenidos en la Zona Minera

Tabla 20: Comparación de la normativa vigente con los resultados de la Zona Minera

Parámetro	Límite máximo permisible	Resultados	Cumplimiento		Unidades
			SI	NO	
CIANURO LIBRE	0.1	<1.0		X	mg/L
SUSTANCIA SOLUBLES AL HEXANO	0.005	0	X		mg/L
MERCURIO	0.1	<6		X	mg/L
PLATA	0.2	5.57		X	mg/L
PLOMO	0.3	<50		X	mg/L

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con valores obtenidos, se determinó que cuatro de los cinco parámetros analizados no cumple con los límites máximos permisibles que son establecidos por la normativa ambiental vigente. Los parámetros de cianuro libre, mercurio, plata y plomo presentan excedentes a los valores regulados, donde se evidencia un incumplimiento significativo y un alto riesgo ambiental, la sustancia soluble al hexano, con un valor de 0 mg/L estos valores se encuentran dentro de los límites máximos permisibles 0.005 mg/L, que es aplicable en la normativa ambiental.

5.10 Análisis comparativo entre la Normativa Ambiental vigente y los resultados obtenidos en la Zona Urbana

Tabla 21: Comparación de la normativa vigente con los resultados de la Zona Urbana

Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce - Zona Urbana					
Parámetro	Limite máximo permisible	Resultados	Cumplimiento		Unidades
			SI	NO	
CIANURO LIBRE	0.1	<1.0		x	mg/L
SUSTANCIA SOLUBLES AL HEXANO	0.005	0	x		mg/L
MERCURIO	0.1	<6		x	mg/L
PLATA	0.2	12.91		x	mg/L
PLOMO	0.3	<50		x	mg/L

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en la zona urbana indica un incumplimiento de la normativa ambiental vigente, ya que cuatro de los cinco parámetros exceden los límites máximos permisibles, únicamente las sustancias solubles al hexano (0 mg/L frente a 0.005 mg/L) cumple con la normativa ambiental.

6 Análisis comparativo entre la Normativa Ambiental vigente y los resultados obtenidos en la Zona Rural

Tabla 22: Comparación de la normativa vigente con los resultados de la Zona Rural

Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce - Zona Rural						
Parámetro	Límite máximo permisible	Resultados	Cumplimiento		Unidades	
			SI	NO		
CIANURO LIBRE	0.1	<1.0		x	mg/L	
SUSTANCIA SOLUBLES AL HEXANO	0.005	0	x		mg/L	
MERCURIO	0.1	<6		x	mg/L	
PLATA	0.2	<5		x	mg/L	
PLOMO	0.3	<50		x	mg/L	

Fuente: Elaboración propia

En la zona rural, los análisis indican que los parámetros evaluados superan los límites permisibles que son establecidos por la normativa ambiental cuatro de los cinco no cumplen, mientras que las sustancias solubles al hexano (0 frente a 0.005 mg/L) cumplen con los valores regulatorios

6.1 Análisis macroinvertebrados

6.1.1.1 Índice BMWP/ COL

Figura: 44 Índice BMWP/Col

Familia	Puntuación	Cuantificación (M1)	SUMA1	Cuantificación (M2)	SUMA1	Cuantificación (M3)	SUMA1
Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hidridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae	10					Psephenidae	20
Ampullariidae, Dystiscidae, Ephemeridae, Euthplociidae, Gyrinidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopatomidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae	9						
Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hidrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelpusidae, Saldidae, Simuliidae, Vellidae.	8						
Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossosomatidae, Hyaellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptothyphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae.	7	Baetidae	7				
Aeshnidae, Ancyliidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae.	6	Aeshnidae	6	Elmidae	18	Corydalidae Elmidae	36
Belostomatidae, Gelastocoridae, Mesoveiidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae.	5			Planorbiidae	15	Planorbiidae	20

Chysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydrometridae, Noteridae, Dolichopodidae.	4						
Ceratopogonidae, Glossiphonidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae.	3	Ceratopogonidae	12	Cyclobdellidae Glossiphonidae	15	Tipulidae	6
Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae, Syrphida	2	Culicidae	4	Chironomidae Muscidae	6		
Tubificidae	1	Tubificidae	4	Tubificidae	4	Tubificidae	2
BMWP			33		58		84

Fuente: Elaboración propia

Muestra 1 (M1)

Esta muestra se clasifica en **Clase IV** (Aguas muy contaminadas), evidencia un ecosistema acuático gravemente alterado. Cuatro de los cinco parámetros analizados (cianuro libre, mercurio, plata y plomo) superan los límites normativos, representando un alto riesgo ambiental.

Los contaminantes se dispersan en el sistema hídrico, afectando la biodiversidad. El cianuro y el mercurio se movilizan en corriente superficial, mientras la plata y el plomo se acumulan en los sedimentos. La bioacumulación impacta la fauna acuática, favoreciendo organismos resistentes y reduciendo especies sensibles.

La contaminación afecta la composición biológica del ecosistema. Factores como concentración de contaminantes, oxígeno disuelto, pH y materia orgánica determina la presencia de especies tolerantes (Chironomidae, Oligochaeta) y la desaparición de organismos sensibles (Ephemeroptera, Plecóptera, Trichoptera), reflejando la degradación ambiental.

Muestra (M2)

Esta muestra se clasifica en **Clase III** (Aguas moderadamente contaminadas), presenta contaminación evidente con una fauna acuática aun presente, aunque afecta. Cuatro de los cinco parámetros analizados (cianuro libre, mercurio, plata y plomo) superan los límites normativos representando un riesgo ambiental.

Los contaminantes se dispersan y acumulan en el sistema hídrico de manera diferenciada: el cianuro y el mercurio son transportados por corrientes superficiales, mientras que la plata y el plomo tienden a depositarse en sedimentos, favoreciendo su bioacumulación en la fauna acuática y afectando la cadena trófica.

Factores que influyen en la variabilidad de especies son determinados por la, concentración de metales pesados, oxígeno disuelto, pH y turbidez y la persistencia de contaminantes en el ambiente. Impacto en la comunidad biológica, en zonas contaminadas predominan macroinvertebrados tolerantes (Chironomidae, Oligochaeta). Mientras que la disminución de especies sensibles (Ephemeroptera, Plecóptera, Trichoptera) refleja la degradación del hábitat. Para la recuperación del ecosistema depende de la reducción de contaminantes y la mejora de las condiciones del agua.

La variabilidad de especies indica el nivel de deterioro ecológico. La predominancia de organismos tolerantes y la disminución de especies sensibles reflejan el impacto de la contaminación.

Muestra (M3)

Esta muestra se clasifica en **Clase II** (Aguas ligeramente contaminadas), lo que indica relativamente buena, aunque con efectos de contaminación. En la zona Rural, los análisis muestran que cuatro de los cinco parámetros exceden los límites normativos, lo que sugiere procesos de dispersión y acumulación de contaminantes en el sistema hídrico.

Los contaminantes como cianuro libre, mercurio, plata y plomo se transportan río abajo a través de la corriente, se absorbe en sedimentos y pueden bioacumularse en organismos acuáticos. Factores como el pH, la materia orgánica y la temperatura influyen en su movilidad y toxicidad. Además, algunos contaminantes pueden interactuar químicamente, aumentando su persistencia y efectos adversos.

El impacto a largo plazo incluye contaminación del agua, afectación a la biota y riesgos para la salud humana, debido a la acumulación y biomagnificación de metales pesados.

En zonas contaminadas predominan especies tolerantes, mientras que en áreas en recuperación reaparecen organismos sensibles. Estos cambios indican el estado ecológico del río y la necesidad de monitoreo continuo para mitigar impactos y preservar la biodiversidad.

7 CONCLUSIONES RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

En la evaluación integral de la contaminación hídrica en la cuenca del río Santa Barbara, el análisis integral de los parámetros, fisicoquímicos, microbiológicos y bioindicadores en la cuenca del río Santa Barbara evidenció una contaminación significativa que se está asociada a las actividades mineras. Los resultados revelaron que las concentraciones de cianuro libre (CN), mercurio (Mg), plomo(pb), plata (Ag) y sustancias solubles en hexano, superan los límites máximos permisibles en el Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente (TULSMA). Estos hallazgos nos confirman que las actividades mineras son el principal factor del deterioro de la calidad del recurso hídrico de la cuenca.

La aplicación del Índice de Calidad del Agua (ICA) indicó que el recurso hídrico en la cuenca presenta una calidad **mala** en los puntos más cercanos a las operaciones mineras, Esta situación afecta su aptitud para consumo humano, riego agrícola y la biodiversidad acuática. El área más alejada de la influencia directa de las actividades mineras presentó índices de calidad más favorables, aun que presenten indicios de contaminación.

El análisis de macroinvertebrados, utilizando los índices BMWP/Col, permitió evaluar los niveles de biodiversidad acuática en relación con los grados de contaminación. En los puntos seleccionados, se evidenció un impacto significativo asociado a la presencia

de metales pesados y parámetros fisicoquímicos alterados, se observó una reducción drástica en la biodiversidad de las especies sensibles, con una notable predominancia de organismos tolerantes a la contaminación.

Con la aplicación de modelos de dispersión permitió identificar los patrones de transporte de contaminantes a lo largo de la cuenca, evidenciando que los contaminantes se acumulan en zonas de baja velocidad de flujo y propagarse aguas abajo, afectando áreas agrícolas, zonas habitadas y espacios destinados a la recreación, Los resultados permiten delimitar áreas claves donde las intervenciones pueden maximizar la mitigación del impacto ambiental.

7.2 Recomendaciones

Monitoreo continuo: Mantener un sistema de monitoreo constante en puntos críticos de la cuenca es fundamental para identificar en tiempo real nuevas fuentes de contaminación y evaluar la eficacia de las medidas implementadas.

Restauración ecológica y reforestación: Implementar programas de restauración en áreas degradadas, incluyendo la reforestación de margen del río con especies vegetales nativas para la recuperación de hábitats acuáticos. Estas acciones no lo mitigan la erosión, sino también ayuda a mejorar la retención de contaminantes del suelo. Estas acciones contribuirán a la regeneración del ecosistema y a la mejor calidad del agua.

Implementación de medidas para la gestión sostenible en áreas mineras: Es fundamental implementar medidas específicas para mitigar los impactos ambientales

derivados por las actividades mineras. Estas medidas deben enfocarse en la rehabilitación progresiva de las áreas intervenidas, la instalación de sistemas de tratamiento para la remoción de contaminantes en las descargas y el establecimiento de programas de monitoreos regulares que incluyan alertas tempranas, para prevenir y gestionar afecciones del recurso hídrico.

8 BIBLIOGRAFÍA

AGUA.org.mx. (2016). ¿Qué es una cuenca? In *Cuencas Hidrográficas*.

Allen, B. (2007). Hidrología Básica y Aplicada. *Grupo de Investigación En Transporte de Sedimentos*.

Alvarado, J. J., & Aguilar, J. F. (2009). Batimetría, salinidad, temperatura y oxígeno disuelto en aguas del Parque Nacional Marino Ballena, Pacífico, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 57(SUPPL. 1).

Amado-Alvarez, J., Pérez-Cutillas, P., Alatorre-Cejudo, L. C., Olgún-López, J. L., Ramírez-Valle, O., Segovia-Ortega, E. F., & Alarcón-Cabañero, J. J. (2018). Análisis multiespectral para la estimación de la turbidez como indicador de la calidad del agua en embalses del estado de Chihuahua, México. *Revista Geográfica de América Central*, 1(62). <https://doi.org/10.15359/rgac.62-1.2>

Ana, S. (2021). Qris dan era baru transaksi pembayaran 4.0. *Frontiers in Neuroscience*, 14(1).

- Asensi, E., Alemany, E., Duque-Sarango, P., & Aguado, D. (2019). Assessment and modelling of the effect of precipitated ferric chloride addition on the activated sludge settling properties. *Chemical Engineering Research and Design*, 150, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.07.018>
- Autoridad Nacional del Agua-ANA. (2011). Protocolo De Monitoreo De La Calidad De Los Recursos Hidricos. *GreenFacts*.
- Banco Central del Ecuador. (2020). Reporte de Minería. Resultados al primer trimestre de 2020 Julio 2020 SUBGERENCIA DE PROGRAMACIÓN Y REGULACIÓN. *Gestión Analítica e Inteligencia de Datos*.
- Banco Mundial. (2011). Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Chile. In *Departamento del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*.
- Barbour et al, 1996. (1999). Rapid Bioassessment Protocols for Use in Wadeable Streams and. *Montana The Magazine Of Western History, January*.
- Biswas, A. K. (1991). Water for sustainable development in the 21st century: a global perspective. *GeoJournal*, 24(4). <https://doi.org/10.1007/BF00578255>
- Breña, P. A. F., & Jacobo, V. M. A. (2006). Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. *Universidad Autónoma Metropolitana*.
- Cairns, J., & Pratt, J. R. (1993). A history of biological monitoring using benthic macroinvertebrates. *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*.
- Camino, M. A., Bó, M. J., Cionchi, J. L., López de Armentia, A., Del Río, J. L., & De Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1).
- Carrasco Cedeño, D. E., & Ordoñez Acosta, P. G. (2017). “DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE BIOMONITOREO Y EVALUACIÓN DEL ESTADO DE RECUPERACIÓN ECOLÓGICA DE RÍOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS.” *Dspace.Espol.Edu.Ec*.
- Carrillo, M., & Urgilés, P. (2016). Determinación del Índice de calidad de agua ICA-NSF de los ríos Mazar y Pindilig. *Tesis de Grado Previo a La Obtención Del Título de Ingeniero Ambiental*.

- Castro, J. (2020). Servicio Nacional de Estudios Territoriales ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA GENERAL "ICA." *Ministerio Del Ambiente, 1*.
- Contreras-Ramos, A. (2010). Macroinvertebrados Bentónicos Sudamericanos—Sistemática y Biología. *Annals of the Entomological Society of America, 103*(4). <https://doi.org/10.1603/008.103.0401>
- da Cunha, E. R., & Bacani, V. M. (2016). Morphometric Characterization of a Watershed through SRTM Data and Geoprocessing Technique. *Journal of Geographic Information System, 08*(02). <https://doi.org/10.4236/jgis.2016.82021>
- Devarayan, K., Kathavarayan, M., Theivasigamani, A., Sukumaran, M., & Kandasamy, S. (2023). Development of portable colorimeter for on-site determination of water quality in aquaculture. *Pigment and Resin Technology, 52*(6). <https://doi.org/10.1108/PRT-12-2021-0140>
- Diop, S., Wade, S., & Tijani, M. N. (2016). Feasibility Analysis of MERIS as a Tool for Monitoring Lake Guiers (Senegal) Water Quality. *Journal of Water Resource and Protection, 08*(01). <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.81009>
- Duque, P., & et. al. (2022). (PDF) *Proceedings of the V Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2022)*. https://www.researchgate.net/publication/368567663_Proceedings_of_the_V_Ibero-American_Congress_of_Smart_Cities_ICSC-CITIES_2022
- Duque-Sarango, P., & Hernández, B. (2020). Estudio integral del recurso hídrico de la microcuenca del río Guarango, Cuenca – Ecuador. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação, 30*, 240–252. <https://search.proquest.com/docview/2404399354?accountid=32861>.
- Duque-Sarango, P., Cajamarca-Rivadeneira, R., Wemple, B. C., & Delgado-Fernández, M. E. (2019a). Estimation of the water balance of for a small tropical andean catchment. *Granja, 29*(1), 56–69. <https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.05>
- Duque-Sarango, P., Cajamarca-Rivadeneira, R., Wemple, B. C., & Delgado-Fernández, M. E. (2019b). Estimation of the water balance of for a small tropical andean catchment [Estimación Del Balance Hídrico De Una Cuenca Andina Tropical]. *Granja, 29*(1), 56–69. <https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.05>

- Duque-sarango, P., Cando, A., Segarra, F., & Zhingri, A. (2018). Revista Amazónica Ciencia y Tecnología. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 7(3), 172–183.
- Duque-Sarango, P., Patiño, D. M., & López, X. E. (2019). Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical. *Información Tecnológica*, 30(6), 351–362. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000600351>
- Duque-Sarango, P., & Pinos, V. (2022). *Modeling of the Guangarcucho Municipal Wastewater Treatment Plant Using WEST, Cuenca-Ecuador*. 33–46. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93718-8_4
- Duque-Sarango, P., & Zagal-Andrade, C. (2023). Análisis de la eficiencia de una planta de experimentación de humedal subsuperficial de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales: Efficiency analysis of a vertical flow subsurface wetland experiment plant for wastewater treatment. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(2), 1625–1634. <https://doi.org/10.34188/BJAERV6N2-054>
- Effen, M. A. (2010). *Health risks caused by mining pollution and their impact on children*. File:///C:/SciELO/Serial/Rbcst/V12n27/Body/V12n27a05.Htm.
- Estupiñan, R., Romero, P., García, M., Garcés, D., & Valverde, P. (2021). Mining in Ecuador. Past, present and future. *Boletín Geológico y Minero*, 132(4). <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.4.010>
- Garcés Villalba, J., & Flórez Vergara, A. A. (2014). Evaluación de la calidad física, química y microbiológica del agua en la ciénaga de Betancí, Departamento de Córdoba-Caribe colombiano. *Memorias de II Seminario de Ciencias Ambientales Sue-Caribe & VII Seminario Internacional de Gestión Ambiental*.
- García García, N. J., Salinas, N. F., & Blandón Chavarría, L. C. (2021a). Parámetros morfométricos de la unidad hidrológica 69-95259905 Masaya, Nicaragua; como primera etapa en la caracterización hidrológica. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 38. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i38.11954>
- García García, N. J., Salinas, N. F., & Blandón Chavarría, L. C. (2021b). Parámetros morfométricos de la unidad hidrológica 69-95259905 Masaya, Nicaragua; como primera etapa en la

- caracterización hidrológica. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 38.
<https://doi.org/10.5377/farem.v0i38.11954>
- García-González, J., Osorio-Ortega, M. A., Saquicela-Rojas, R. A., & Cadme, M. L. (2021). Determinación del índice de calidad del agua en ríos de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. *Ingeniería Del Agua*, 25(2). <https://doi.org/10.4995/ia.2021.13921>
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2020). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. In *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. <https://doi.org/10.35537/10915/27877>
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, I., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *7mo Congreso de Medio Ambiente*.
- González, V., Caicedo, O., & Aguirre, N. (2013). Aplicación de los índices de calidad de agua NSF, DINIUS y BMWP en la quebrada La Ayura, Antioquia, Colombia. *Revista de Gestión y Ambiente*, 16(1).
- Hach. (2022). *Sólidos totales y disueltos (TSS y TDS) - Parámetros de calidad del agua | Hach*. Hach.
- Harper, D. M., Rosenberg, D. A., & Resh, V. H. (1994). Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates. *The Journal of Applied Ecology*, 31(4). <https://doi.org/10.2307/2404174>
- Hodkinson, I. D., Merritt, R. W., & Cummins, K. W. (1981). An Introduction to the Aquatic Insects of North America. *The Journal of Animal Ecology*, 50(1). <https://doi.org/10.2307/4053>
- INEN. (2013a). Agua. Calidad Del Agua. Muestreo. Manejo Y Conservación De Muestras. *Norma Técnica Ecuatoriana*.
- INEN. (2013b). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2176 : 2013 Primera revisión. *Inen, First Edit*.
- La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro. (2020). *Estudios de La Gestión. Revista Internacional de Administración*. <https://doi.org/10.32719/25506641.2020.8.8>

- Lunazzi, J. J., França, M. C., & da Silva Mori, A. (2015). Revivendo o estereoscópio de Wheatstone. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 37(2). <https://doi.org/10.1590/S1806-11173721618>
- Machado, V., Granda, R., & Endara González, A. (2018). Análisis de macroinvertebrados bentónicos e índices biológicos para evaluar la calidad del agua del río Sardinas, Chocó Andino ecuatoriano. *Enfoque UTE*, 9(4). <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.369>
- Marselina, M., Wibowo, F., & Mushfiroh, A. (2022). Water quality index assessment methods for surface water: A case study of the Citarum River in Indonesia. *Heliyon*, 8(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09848>
- Matovelle, C., & Heras, D. (2020). Análisis comparativo de las características morfométricas de sistemas hidrográficos de la vertiente del Pacífico, Ecuador. *Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 80. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2020803000>
- MINEM. (2022). Análisis de la estadística minera. *MINEM, 2022*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2015). Libro VI - Anexo 1 - NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES : RECURSO AGUA. *Ministerio Del Medio Ambiente*.
- Montalvo-Ochoa, F., Robles-Bykbaev, V., Duque-Sarango, P., & Gonzalez-Arias, K. (2020). An educational rule-based expert system to determine water quality for environmental engineering and biotechnology students. *EDUNINE 2020 - 4th IEEE World Engineering Education Conference: The Challenges of Education in Engineering, Computing and Technology without Exclusions: Innovation in the Era of the Industrial Revolution 4.0, Proceedings*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EDUNINE48860.2020.9149502>
- Naranjo-López, J. C. (2013). BIOLOGICAL MONITORING WORKING PARTY, UN ÍNDICE BIÓTICO CON POTENCIALIDADES PARA EVALUAR LA CALIDAD DE LAS AGUAS EN RÍOS CUBANOS. *Ciencia En Su PC*, 2(2).
- Obi Reddy, G. P., Maji, A. K., & Gajbhiye, K. S. (2004). Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India - A remote sensing and GIS approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(1). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.06.003>

- Ordoñez, J. (2011). *Cartilla Técnica: Ciclo hidrológico, Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico*". SENAMHI.
- Ortiz Contreras, L., Ortega, B., Méndez, P., & Tierra, P. (2021). Evolution and Identification of Aquatic Macroinvertebrates Like Bioindicators of Water Quality. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.* <https://doi.org/10.18502/epoch.v1i2.9527>
- Oviedo-Anchundia, R., Moína-Quimí, E., Naranjo-Morán, J., & Barcos-Arias, M. (2017). RESEARCHS / INVESTIGACIÓN. *Bionatura*, 2(4).
- Park, S. S., & Lee, Y. S. (2002). A water quality modeling study of the Nakdong River, Korea. *Ecological Modelling*, 152(1). [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00489-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00489-6)
- Paucar Peñaranda, C. D., González Carrasco, V. H., Álvarez Pucha, H. D., Madrid Celi, B. A., De Gracia Pérez, C. A., & Flores Acosta, A. R. (2023). Aplicación del índice de calidad del agua (ICA) caso de estudio: río jubones, Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.6953
- Pelletier, G. J., Chapra, S. C., & Tao, H. (2006). QUAL2Kw - A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling and Software*, 21(3). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.002>
- Pradillo, B. (2022). Parámetros de control del agua potable. *IAgua*.
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS: IMPLICACIONES EN SALUD, AMBIENTE Y SEGURIDAD ALIMENTARIA. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2). <https://doi.org/10.19053/1900771x.v16.n2.2016.5447>
- Saravia Solares, P. C. A. (2017). DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA ICA-NSF PARA CONSUMO HUMANO DE LOS RÍOS TEOCINTE Y ACATÁN, QUE ABASTECEN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA SANTA LUISA ZONA 16, GUATEMALA. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 12(1). <https://doi.org/10.36829/08asa.v12i1.1424>
- SENAGUA. (2016). Estrategia Nacional de Calidad del Agua. *Ministerio de Ambiente, Ecuador*.
- SNET. (2016). Índice De Calidad Del Agua General "ICA." *Servicio Nacional de Estudios Territoriales*, 1(503).

- Swistock, B., Clemens, S., & Sharpe, W. (2020). Bacterias Coliformes. *PennStateExtension*.
- Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. In *Ecological Indicators* (Vol. 122). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>
- Valsami-Jones, E. (2015). Phosphorus in Environmental Technology: Principles and Applications. *Water Intelligence Online*, 4(0). <https://doi.org/10.2166/9781780402758>
- Vargas-Velázquez, S. (2010). Aspectos socioeconómicos de la agricultura de riego en la Cuenca Lerma-Chapala. *Economía Sociedad y Territorio*. <https://doi.org/10.22136/est002010158>
- Vásquez, G. S., Castro, G. M., Gonzáles, I. M., Pérez, R. R., & Castro, T. B. (2006). Bioindicadores como herramientas para determinar la calidad del agua. *ContactoS*, 60.
- WHO. (2008). Guidelines for Drinking-water Quality. *World Health Organization*, 1.

9 ANEXOS

Anexo: 1Tabla de datos físico-químicos

Fecha	Codigo_monitoreo	Muestra	pH	DESUIT	Temperatura	DESUIT	Nitratos	DESUIT	Fosfatos	DESUIT	Turbidez	DESUIT	Solidos Totales	DESUIT	OD	DESUIT	Coliformes Totales	DESUIT
26/11/2024	Sal_1	M1_1	5.67	0.12	8.00	0.12	14.33	3.06	0.47	0.12	22.77	6.43	900.00	212.13	3.2	0.07	12200	29557
26/11/2024	Sal_1	M1_2	5.50		8.17		10.00		0.30		13.67		1200.00		3.1		54000	
26/11/2024	Sal_1	M2_1	6.33	0.12	7.17	0.94	25.33	7.31	0.70	0.42	41.60	11.33	500.00	424.26	1.02	0.03	14500	1767
26/11/2024	Sal_1	M2_2	6.50		8.50		35.67		1.30		57.63		1100.00		0.98		12000	
26/11/2024	Sal_1	M3_1	7.17	0.11	7.33	0.24	6.67	10.13	0.33	1.04	22.80	0.90	1100.00	282.84	2.23	0.58	42000	2121
26/11/2024	Sal_1	M3_2	7.33		7.67		21.00		1.80		24.07		700.00		3.05		39000	
4/12/2024	Sal_2	M1_1	4.83	0.07	10.00	0.47	33.00	5.19	0.90	0.07	45.93	3.75	1400.00	494.97	4.20	0.47	18500	30052
4/12/2024	Sal_2	M1_2	4.74		10.67		25.67		1.00		40.63		700.00		3.53		61000	
4/12/2024	Sal_2	M2_1	4.66	0.76	14.67	1.89	38.33	21.21	3.07	0.28	73.65	8.97	800.00	70.71	1.33	0.19	13500	3889
4/12/2024	Sal_2	M2_2	5.74		17.33		68.33		2.67		86.33		700.00		1.07		19000	
4/12/2024	Sal_2	M3_1	5.85	0.03	17.67	0.12	4.67	1.65	0.10	0.68	17.10	1.13	1000.00	353.55	4.63	0.33	38000	4242
4/12/2024	Sal_2	M3_2	5.89		17.83		7.00		1.07		15.50		500.00		4.16		44000	
16/12/2024	Sal_3	M1_1	5.24	0.69	12.00	0.24	3.33	0.94	0.10	0.07	24.36	8.77	1400.00	353.55	0.77	0.01	52000	19798
16/12/2024	Sal_3	M1_2	6.21		12.33		2.00		0.20		36.76		900.00		0.76		24000	
16/12/2024	Sal_3	M2_1	6.47	0.12	12.67	0.35	2.67	0.71	0.13	0.04	15.24	46.98	700.00	212.13	0.20	0.01	12500	5656
16/12/2024	Sal_3	M2_2	6.64		13.17		1.67		0.20		81.68		1000.00		0.22		20500	
16/12/2024	Sal_3	M3_1	6.51	0.19	13.67	0.35	19.00	3.06	0.80	0.31	15.78	14.70	800.00	70.71	0.47	0.01	120000	63639
16/12/2024	Sal_3	M3_2	6.25		14.17		23.33		1.23		36.57		900.00		0.48		30000	
19/12/2024	Sal_4	M1_1	7.96	0.41	17.00	0.03	16.33	2.59	0.57	0.21	12.65	4.79	600.00	212.13	0.77	0.01	33500	8131
19/12/2024	Sal_4	M1_2	7.39		17.04		20.00		0.87		19.43		300.00		0.75		45000	
19/12/2024	Sal_4	M2_1	7.06	0.06	17.72	0.17	14.33	3.77	0.27	0.21	16.80	3.58	300.00	141.42	1.17	0.02	47000	23688
19/12/2024	Sal_4	M2_2	7.15		17.97		19.67		0.57		21.87		500.00		1.20		80500	
19/12/2024	Sal_4	M3_1	6.46	0.30	18.93	0.04	13.67	2.36	0.57	0.02	62.03	36.32	700.00	212.13	2.07	0.52	37500	7778
19/12/2024	Sal_4	M3_2	6.89		18.99		10.33		0.53		10.66		400.00		2.80		48500	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23: Parámetros Físicoquímicos y microbiológicos

Fecha	Codigo_monitoreo	Muestra	pH	Temperatura	Nitratos	Fosfatos	Turbidez	Solidos Totales	OD	Coliformes Totales
26/11/2024	Sal_1	M1_1	5.67	8.00	14.33	0.47	22.77	900.00	3.2	12200
26/11/2024	Sal_1	M1_2	5.50	8.17	10.00	0.30	13.67	1200.00	3.1	54000
26/11/2024	Sal_1	M2_1	6.33	7.17	25.33	0.70	41.60	500.00	1.02	14500
26/11/2024	Sal_1	M2_2	6.50	8.50	35.67	1.30	57.63	1100.00	0.98	12000
26/11/2024	Sal_1	M3_1	7.17	7.33	6.67	0.33	22.80	1100.00	2.23	42000
26/11/2024	Sal_1	M3_2	7.33	7.67	21.00	1.80	24.07	700.00	3.05	39000
4/12/2024	Sal_2	M1_1	4.83	10.00	33.00	0.90	45.93	1400.00	4.20	18500
4/12/2024	Sal_2	M1_2	4.74	10.67	25.67	1.00	40.63	700.00	3.53	61000
4/12/2024	Sal_2	M2_1	4.66	14.67	38.33	3.07	73.65	800.00	1.33	13500
4/12/2024	Sal_2	M2_2	5.74	17.33	68.33	2.67	86.33	700.00	1.07	19000
4/12/2024	Sal_2	M3_1	5.85	17.67	4.67	0.10	17.10	1000.00	4.63	38000
4/12/2024	Sal_2	M3_2	5.89	17.83	7.00	1.07	15.50	500.00	4.16	44000
16/12/2024	Sal_3	M1_1	5.24	12.00	3.33	0.10	24.36	1400.00	0.77	52000
16/12/2024	Sal_3	M1_2	6.21	12.33	2.00	0.20	36.76	900.00	0.76	24000
16/12/2024	Sal_3	M2_1	6.47	12.67	2.67	0.13	15.24	700.00	0.20	12500
16/12/2024	Sal_3	M2_2	6.64	13.17	1.67	0.20	81.68	1000.00	0.22	20500
16/12/2024	Sal_3	M3_1	6.51	13.67	19.00	0.80	15.78	800.00	0.47	120000
16/12/2024	Sal_3	M3_2	6.25	14.17	23.33	1.23	36.57	900.00	0.48	30000
19/12/2024	Sal_4	M1_1	7.96	17.00	16.33	0.57	12.65	600.00	0.77	33500
19/12/2024	Sal_4	M1_2	7.39	17.04	20.00	0.87	19.43	300.00	0.75	45000
19/12/2024	Sal_4	M2_1	7.06	17.72	14.33	0.27	16.80	300.00	1.17	47000
19/12/2024	Sal_4	M2_2	7.15	17.97	19.67	0.57	21.87	500.00	1.20	80500
19/12/2024	Sal_4	M3_1	6.46	18.93	13.67	0.57	62.03	700.00	2.07	37500
19/12/2024	Sal_4	M3_2	6.89	18.99	10.33	0.53	10.66	400.00	2.80	48500

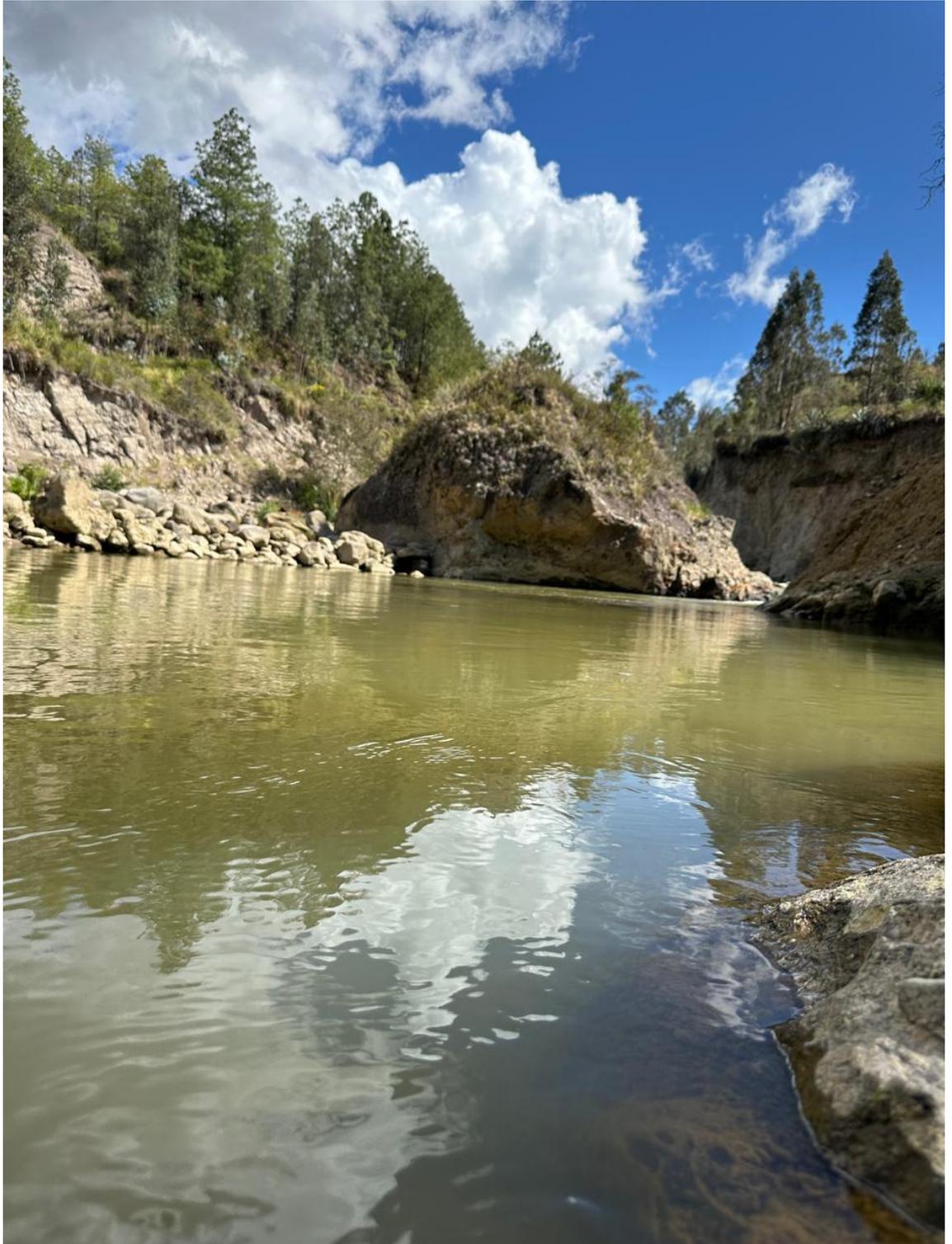
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Zona Minera

Anexo: 5 Tablas de cálculo del índice de calidad ICA-NSF_ campaña 1

M1		Subi	wi	F.Sumatoria	F.multiplicat
Cambio de temperatura	8.09	25	0.1	2.5	1.38
Turbiedad (NTU)	18.22	65	0.08	5.2	1.40
pH	5.59	40	0.12	4.8	1.56
Fosfatos (PO4	0.39	80	0.1	8	1.55
Nitratos (NO3	12.17	45	0.1	4.5	1.46
Solidos	1050	32	0.07	2.24	1.50
oxigeno	3.87	10	0.17	1.7	1.48
DBO5 mg/L	2.32	78	0.1	7.8	1.55
coliformes	3560	17	0.15	2.55	1.53
ICA				39.29	35.69
				MALA	MALA

Fuente: Elaboración propia

Zona Urbana

M2		Subi	wi	F.sumatoria	F.multiplicat
Cambio de temperatura	7.84	28	0.10	2.8	1.40
Turbiedad (NTU)	49.62	38	0.08	3.04	1.34
pH	6.42	70	0.12	8.4	1.66
Fosfatos (PO4	1	40	0.1	4	1.45
Nitratos (NO3	30.5	26	0.1	2.6	1.39
Solidos	800	32	0.07	2.24	1.27
oxigeno	1.28	10	0.17	1.7	1.48
DBO5 mg/L	0.77	90	0.1	9	1.57
coliformes	17200	0.9	0.15	0.14	0.98
ICA				33.92	18.12
				MALA	PESIMA

Fuente: Elaboración propia

Zona Rural

M3		Subi	wi	F.sumatoria	F.multiplicat
Cambio de temperatura	7.50	39	0.1	3.9	1.44
Turbiedad (NTU)	23.44	58	0.08	4.64	1.38
pH	7.25	91	0.12	10.92	1.72
Fosfatos (PO4	1.07	35	0.1	3.5	1.43
Nitratos (NO3	13.84	48	0.1	4.8	1.47
Solidos	900	32	0.07	2.24	1.27
oxigeno	0.54	0.6	0.17	0.102	0.92
DBO5 mg/L	0.32	82	0.1	8.2	1.55
coliformes	37100	0.5	0.15	0.075	0.90
ICA				38.38	11.79
				MALA	MALO

Fuente: Elaboración propia

Anexo: 6 Tablas de cálculo del índice de calidad ICA-NSF_ campaña 2

M1		Subi	wi	F.Sumatoria	F.multiplicat	
Temperatura	10.33	20	0.1	2	1.35	
Turbidez	43.28	42	0.08	3.36	1.35	
PH	4.78	12	0.12	1.44	1.35	
Fosfatos	0.95	60	0.1	6	1.51	
Nitratos	29.33	30	0.1	3	1.41	
Solidos DisueltosTotales	1050	32	0.08	2.56	1.57	
OD	3.87	0.6	0.17	0.102	0.92	
DBO	2.32	73	0.1	7.3	1.54	
Coliformes Totales	39750	0.8	0.15	0.12	0.97	
				ICA	25.88	11.09
				MALA		PESIMA

Fuente: Elaboración propia

M2		Subi	wi	F.sumatoria	F.multiplicat	
Cambio de temperatura	16.00	9	0.10	0.9	1.25	
Turbiedad (NTU)	149.83	5	0.08	0.4	1.14	
pH	5.20	32	0.12	3.84	1.52	
Fosfatos (PO4)	2.87	25	0.1	2.5	1.38	
Nitratos (NO3)	53.33	0.9	0.1	0.09	0.99	
Solidos	750	32	0.08	2.56	1.32	
oxigeno	1.20	0.7	0.17	0.119	0.94	
DBO5 mg/L	0.72	92	0.1	9.2	1.57	
coliformes	16250	0.9	0.15	0.14	0.98	
				ICA	19.74	5.63
				MALA		PESIMA

Fuente: Elaboración propia

M3		Subi	wi	F.sumatoria	F.multiplicat	
Cambio de temperatura	17.75	9	0.1	0.90	1.25	
Turbiedad (NTU)	16.3	68	0.08	5.44	1.40	
pH	5.85	40	0.12	4.80	1.56	
Fosfatos (PO4)	0.58	80	0.1	8.00	1.55	
Nitratos (NO3)	5.83	80	0.1	8.00	1.55	
Solidos	750	32	0.08	2.56	1.32	
oxigeno	4.40	0.9	0.17	0.15	0.98	
DBO5 mg/L	2.64	75	0.1	7.50	1.54	
coliformes	41000	0.4	0.15	0.06	0.87	
				ICA	37.41	11.36
				MALA		MALO

Fuente: Elaboración propia

Anexo: 7 Tablas de cálculo del índice de calidad ICA-NSF_ campaña 3

M1		Subi	wi	F.Sumatoria	F.multiplicat	
Temperatura	12.17	25	0.1	2.5	1.38	
Turbidez	30.56	50	0.08	4	1.37	
PH	5.73	40	0.12	4.8	1.56	
Fosfatos	0.15	90	0.1	9	1.57	
Nitratos	2.67	80	0.1	8	1.55	
Solidos DisueltosTotales	1150	32	0.08	2.56	1.55	
OD	0.76	0.5	0.17	0.085	0.89	
DBO	0.46	88	0.1	8.8	1.56	
Coliformes Totales	38000	0.4	0.15	0.06	0.87	
				ICA	39.81	13.42
					MALA	MALA

Fuente: Elaboración propia

M2		Subi	wi	F.sumatoria	F.multiplicat	
Cambio de temperatura	12.92	29	0.10	2.9	1.40	
Turbiedad (NTU)	48.46	39	0.08	3.12	1.34	
pH	6.56	60	0.12	7.2	1.63	
Fosfatos (PO4	0.13	80	0.1	8	1.55	
Nitratos (NO3	2.17	78	0.1	7.8	1.55	
Solidos	750	32	0.08	2.56	1.32	
oxigeno	0.21	0.3	0.17	0.051	0.81	
DBO5 mg/L	0.13	92	0.1	9.2	1.57	
coliformes	16500	10	0.15	1.50	1.41	
				ICA	42.33	17.55
					MALA	PESIMA

Fuente: Elaboración propia

M3		Subi	wi	F.sumatoria	F.multiplicat	
Cambio de temperatura	13.92	15	0.1	1.5	1.31	
Turbiedad (NTU)	26.17	55	0.08	4.4	1.38	
pH	6.38	55	0.12	6.6	1.62	
Fosfatos (PO4	1.02	35	0.1	3.5	1.43	
Nitratos (NO3	21.17	35	0.1	3.5	1.43	
Solidos	850	32	0.08	2.56	1.32	
oxigeno	0.48	0.5	0.17	0.085	0.89	
DBO5 mg/L	0.29	94	0.1	9.4	1.58	
coliformes	75000	0.3	0.15	0.045	0.83	
				ICA	31.59	9.18
					MALA	MALO

Fuente: Elaboración propia

Anexo: 8 Tablas de cálculo del índice de calidad ICA-NSF_ campaña 4

M1		Subi	wi	F.Sumatoria	F.multiplicat	
Temperatura	17.02	9	0.1	0.9	1.25	
Turbidez	16.04	70	0.08	5.6	1.40	
PH	7.67	95	0.12	11.4	1.73	
Fosfatos	0.72	80	0.1	8	1.55	
Nitratos	18.17	40	0.1	4	1.45	
Solidos DisueltosTotales	450	40	0.08	3.2	1.50	
OD	0.76	0.1	0.17	0.017	0.68	
DBO	0.46	87	0.1	8.7	1.56	
Coliformes Totales	39250	0.6	0.15	0.09	0.93	
				ICA	41.91	9.95
				MALA	MALA	

Fuente: Elaboración propia

M2		Subi	wi	F.sumatoria	F.multiplicat	
Cambio de temperatura	17.84	9	0.10	0.9	1.25	
Turbiedad (NTU)	19.33	65	0.08	5.2	1.40	
pH	7.11	90	0.12	10.8	1.72	
Fosfatos (PO4)	0.42	85	0.1	8.5	1.56	
Nitratos (NO3)	17.00	45	0.1	4.5	1.46	
Solidos	400	48	0.08	3.84	1.36	
oxigeno	1.18	0.6	0.17	0.102	0.92	
DBO5 mg/L	0.71	90	0.1	9	1.57	
coliformes	63750	0.2	0.15	0.03	0.79	
				ICA	42.87	10.49
				MALA	PESIMA	

Fuente: Elaboración propia

M3		Subi	wi	F.sumatoria	F.multiplicat	
Cambio de temperatura	18.96	9	0.1	0.9	1.25	
Turbiedad (NTU)	36.35	50	0.08	4	1.37	
pH	6.67	70	0.12	8.4	1.66	
Fosfatos (PO4)	0.55	87	0.1	8.7	1.56	
Nitratos (NO3)	12.00	48	0.1	4.8	1.47	
Solidos	550	32	0.08	2.56	1.32	
oxigeno	2.43	0.8	0.17	0.136	0.96	
DBO5 mg/L	0.15	95	0.1	9.5	1.58	
coliformes	43000	0.7	0.15	0.105	0.95	
				ICA	39.10	12.40
				MALA	MALO	

Fuente: Elaboración propia

Anexo: 9 Resultados de metales pesados otorgados por ETAPA

R E S U L T A D O S

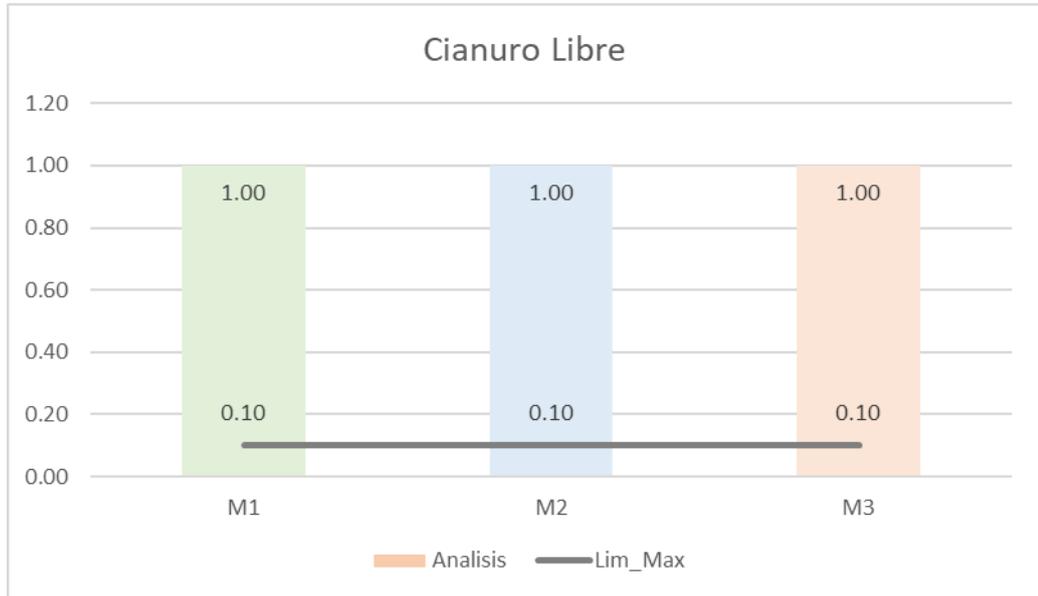
PARÁMETRO	MÉTODO	FECHA REALIZACIÓN	UNIDAD	MUESTRA 1 214/01/24
* CIANURO LIBRE	SM 4500CN D	2024/08/02	mg/l	<1,0
* SUSTANCIAS SOLUBLES AL HEXANO	SM 5520 D	2024/08/02	mg/l	0
* MERCURIO	SM 3120 ICP	2024/08/07	ug/l	<6
PLATA	PEE/LS/AI/04	2024/08/07	ug/l	5,57
PLOMO	PEE/LS/AI/04	2024/08/07	ug/l	<50

PARÁMETRO	MÉTODO	FECHA REALIZACIÓN	UNIDAD	MUESTRA 2 214/02/24
* CIANURO LIBRE	SM 4500CN D	2024/08/02	mg/l	<1,0
* SUSTANCIAS SOLUBLES AL HEXANO	SM 5520 D	2024/08/06	mg/l	0
* MERCURIO	SM 3120 ICP	2024/08/07	ug/l	<6
PLATA	PEE/LS/AI/04	2024/08/07	ug/l	12,91
PLOMO	PEE/LS/AI/04	2024/08/07	ug/l	<50

PARÁMETRO	MÉTODO	FECHA REALIZACIÓN	UNIDAD	MUESTRA 3 214/03/24
* CIANURO LIBRE	SM 4500CN D	2024/08/02	mg/l	<1,0
* SUSTANCIAS SOLUBLES AL HEXANO	SM 5520 D	2024/08/02	mg/l	0
* MERCURIO	SM 3120 ICP	2024/08/07	ug/l	<6
PLATA	PEE/LS/AI/04	2024/08/07	ug/l	<5
PLOMO	PEE/LS/AI/04	2024/08/07	ug/l	<50

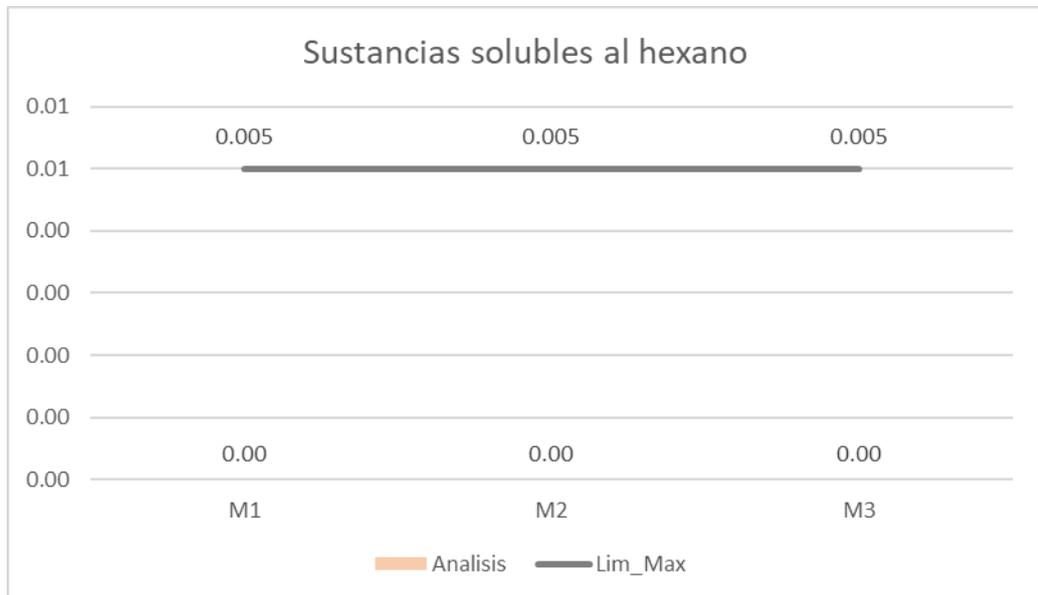
Parámetros PLATA PLOMO
 Incertidumbre 10,47% 95% k= 1,96 15,88% 95% k= 2

Anexo: 10 Análisis de metales pesados_ cianuro



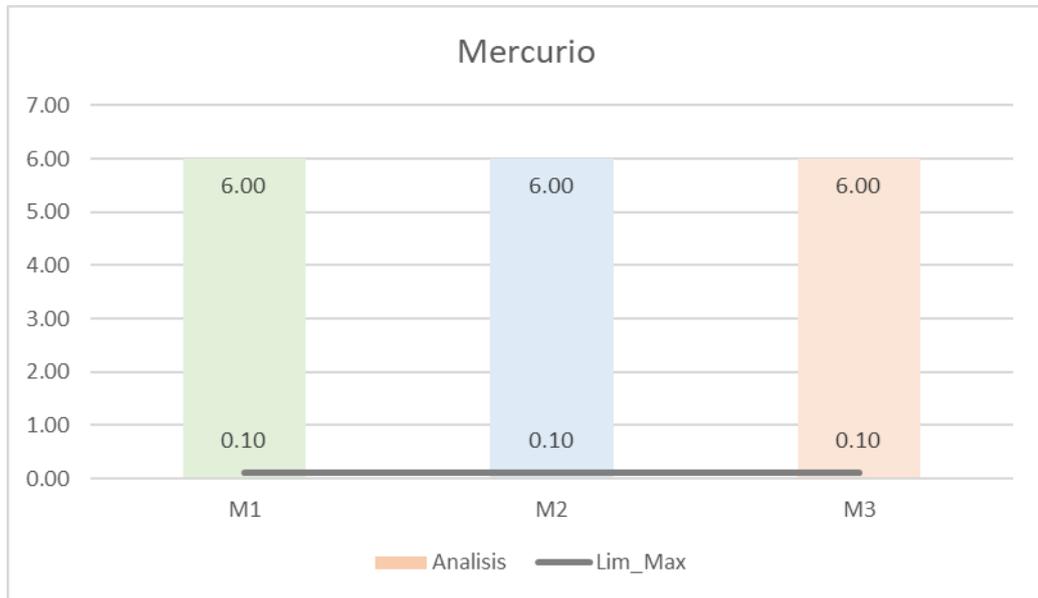
Fuente: Elaboración propia

Anexo: 11 Análisis de metales pesados_ sustancias solubles al hexano



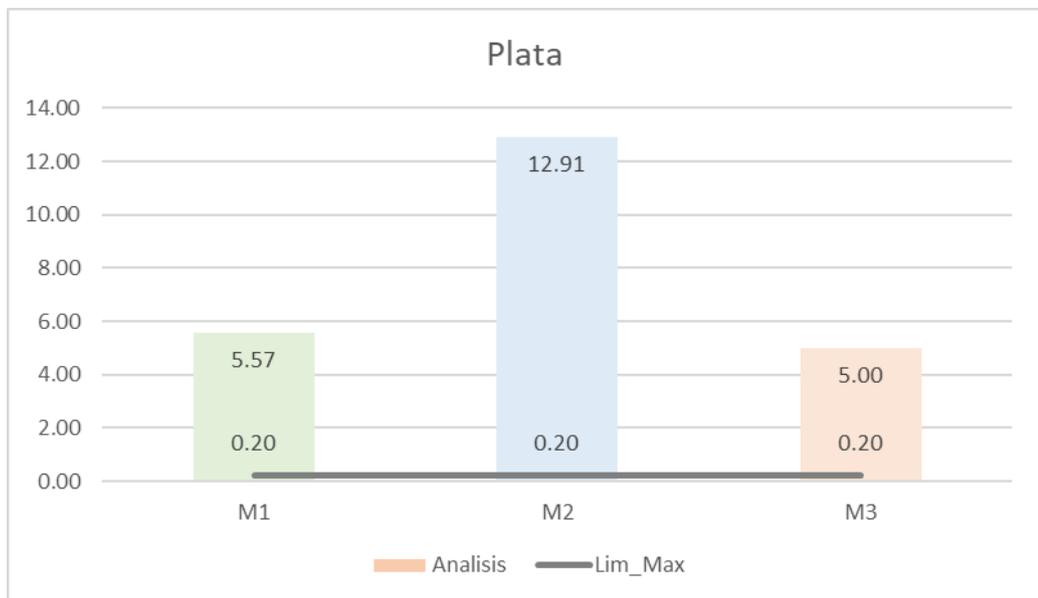
Fuente: Elaboración propia

Anexo: 12 Análisis de metales pesados_mercurio

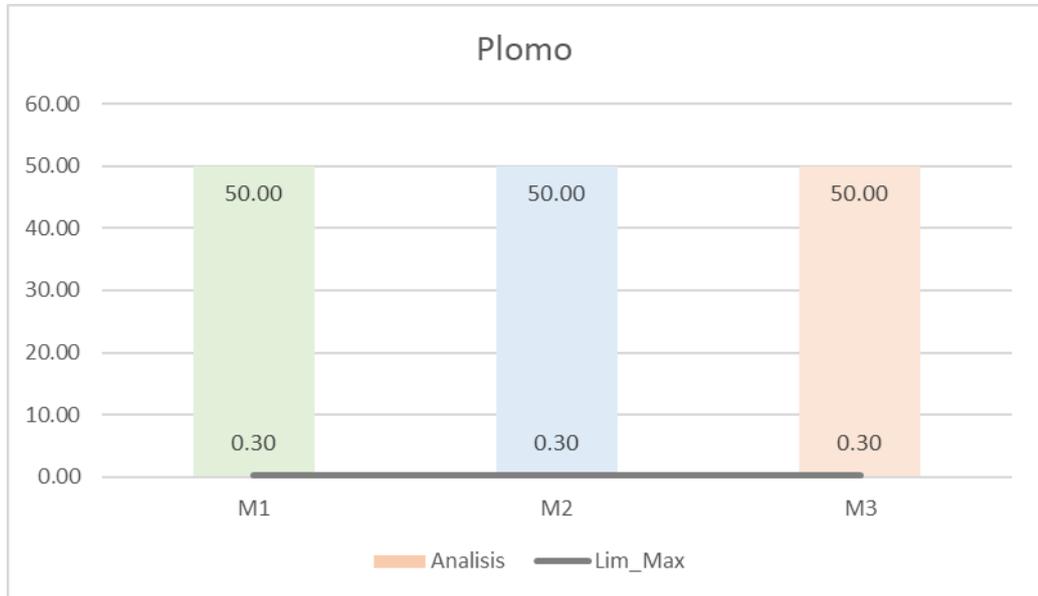


Fuente: Elaboración propia

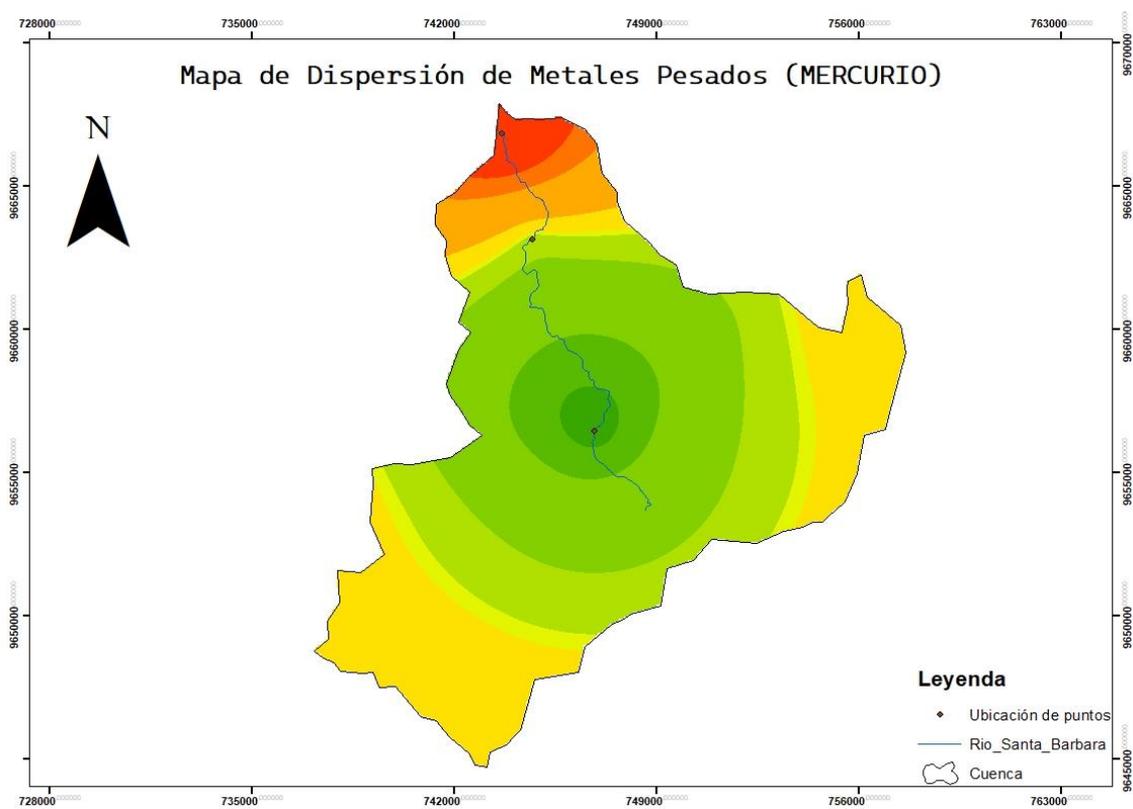
Anexo: 13 Análisis de metales pesados_plata



Anexo: 14 Análisis de metales pesados_ plomo

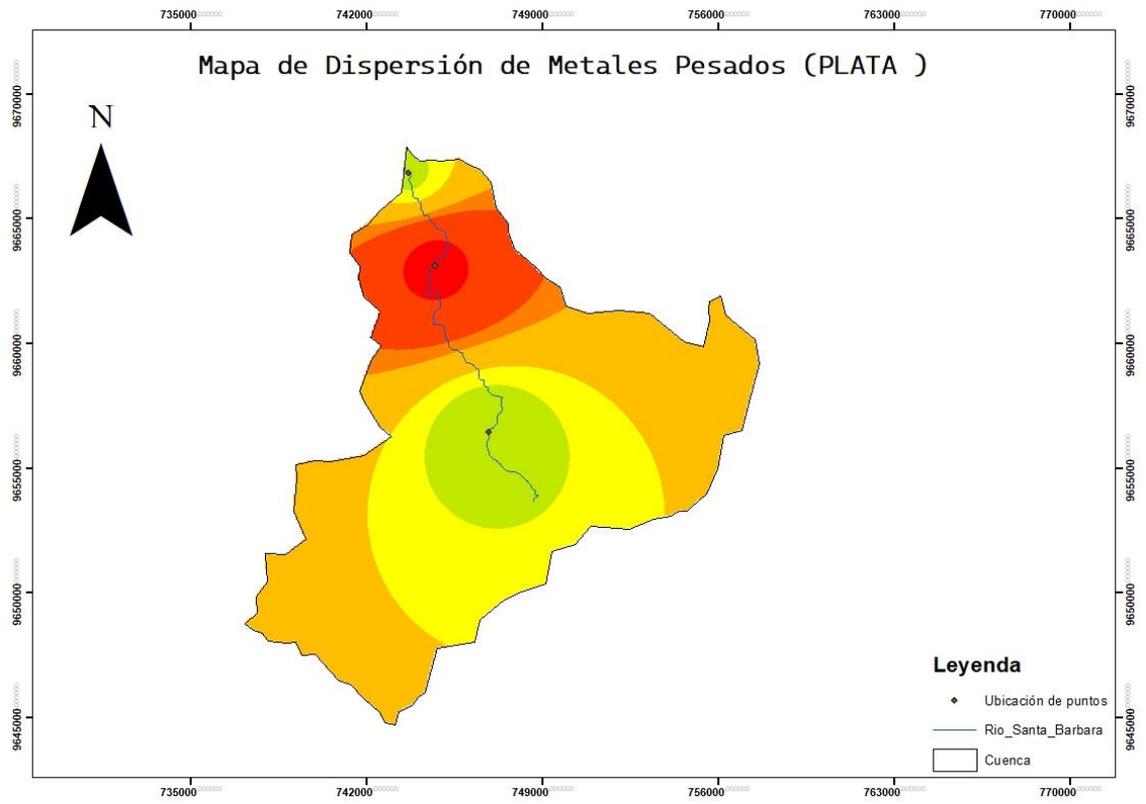


Fuente: Elaboración propia



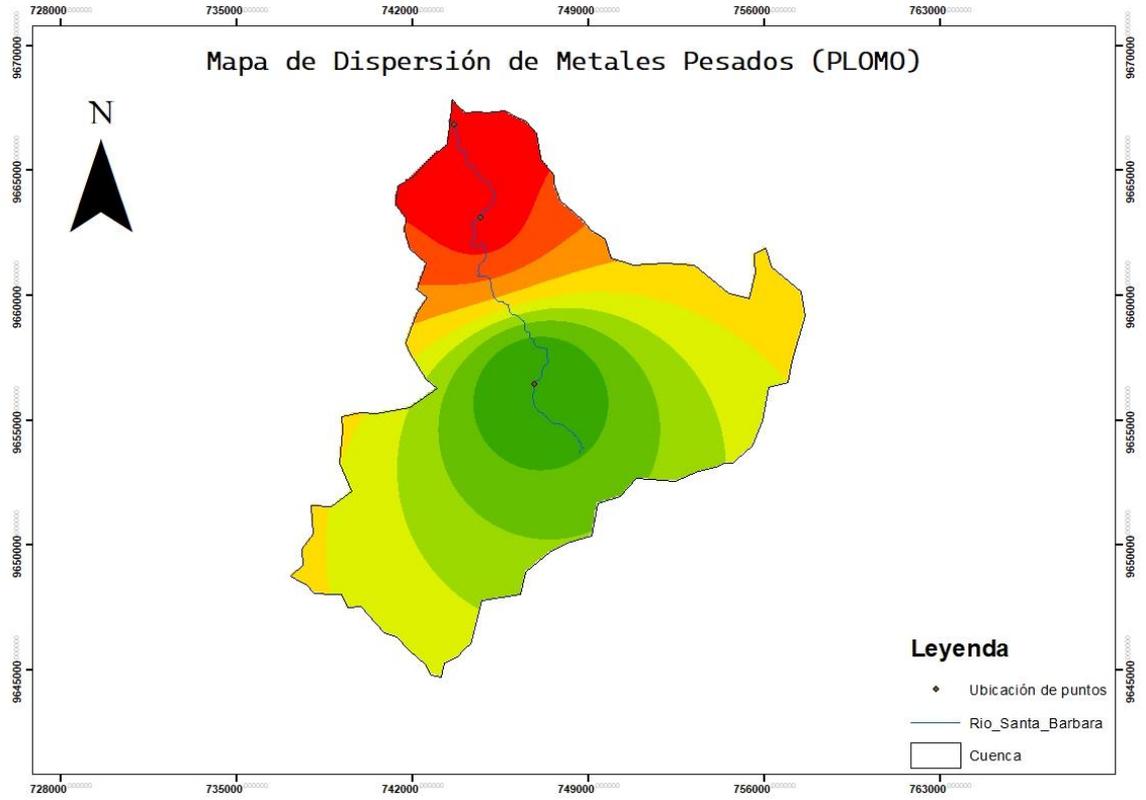
Fuente: Elaboración propia

Anexo: 16 modelo de dispersión plata



Fuente: Elaboración propia

Anexo: 17 modelo de dispersión plomo



Fuente: Elaboración propia