

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



Informe de Investigación

Determinación de la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba en un periodo de mediano plazo

Presentado por:

Mtro. Darío Dante Sánchez Castillo

Dr. Pablo Rubén Zuloaga Candia

Abancay – Perú

2025



ACTA DE REUNIÓN DE DICTAMEN DE REVISIÓN DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Siendo las 11:30 horas del día miércoles 04 de julio de 2025 reunidos en la sala de docentes de la Escuela Profesional de Ing. De Minas, previa citación mediante correo electrónico institucional a los miembros de la comisión evaluadora del informe final de investigación aprobado mediante Resolución N -2025-VRIN-UNAMBA de fecha 28/05/2025 para la revisión del informe final del proyecto de investigación "Determinación de la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba en un periodo de mediano plazo", cuyo responsable de dicho proyecto es: Mtro. Darío Dante Sanches Castillo. Siendo los miembros del jurado evaluador: Dr. Jose Luis Merma Aroni (Presidente), Dr. Walquer Huacani Calsin (Primer miembro) y Mtro. Agustín Pérez Quispe (Segundo miembro).

Primero.- En presencia del responsable del proyecto se procede a revisar el informe y habiendo encontrado algunas observaciones subsanables las cuales el responsable se compromete en levantarlos, hemos quedado que la siguiente revisión va ser una vez que el responsable del proyecto presente sus correcciones.

Segundo.- Que en fecha 25/08/2025, el Mtro. Darío Dante Sanches Castillo presenta sus anillados corregido, por lo cual se programa mediante correo electrónico a la revisión de dicho informe para el día 28/08/2025 a horas 11:00 am. En la sala de docentes de la Escuela Profesional de Ing. De Minas. El jurado evaluador procede a revisar el informe arribando a las siguientes conclusiones:

- El responsable del proyecto ha levantado las observaciones y sugerencias que se indico en una primera revisión.
- Se aprueba por unanimidad el proyecto presentado y se dictamina favorable el informe final de investigación presentado por el Mtro. Darío Dante Sanches Castillo para los trámites correspondientes.

Siendo las 12:00 horas del día 28/08/2025 se concluye la reunión y firman los presentes en señal de conformidad.


UNIVERSIDAD NACIONAL MICELA BASTIDAS
DE APURÍMAC
Dr. José Luis Merma Aroni
DOCENTE


UNIVERSIDAD NACIONAL MICELA BASTIDAS
DE APURÍMAC
Ing. Walquer Huacani Calsin
DOCENTE


UNIVERSIDAD NACIONAL MICELA BASTIDAS
DE APURÍMAC
Ing. Agustín Pérez Quispe
CIP 78851
DOCENTE

Proyecto rio antabamba concurso 2025 final 5, sin indices y bibliografia.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

23% INDICE DE SIMILITUD	20% FUENTES DE INTERNET	12% PUBLICACIONES	6% TRABAJOS DEL ESTUDIANTE
-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------	--------------------------------------

FUENTES PRIMARIAS

1	revistas.unamba.edu.pe Fuente de Internet	6%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unamba.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1%
6	apirepositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	Choquecota Riva, Alberto. "Variación espacial de la concentración de metales pesados en sedimentos en los afluentes de la cuenca del río Ramis - Puno", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru) Publicación	<1%
8	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1%
9	repositorio.unicordoba.edu.co Fuente de Internet	<1%

repositorio.ug.edu.ec



Determinación de la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba en un periodo de mediano plazo

Línea de investigación: Geología, geotecnia y medio ambiente.

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
CAPÍTULO I	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.1 Descripción del problema	6
1.2 Enunciado del problema	11
1.2.1 Problema general	11
1.2.2 Problemas específicos	11
1.2.3 Justificación de la Investigación	11
1.3 Ubicación y contextualización	12
CAPÍTULO II	16
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	16
2.1. Objetivos de la investigación	16
2.1.1 Objetivo general	16
2.1.2 Objetivos específicos	16
2.2 Hipótesis	16
2.2.1 Hipótesis general	16
2.2.2 Hipótesis específicas	16
2.3 Operacionalización de variables	17
CAPÍTULO III	18
MARCO TEÓRICO	18
3.1 Antecedentes	18
3.2 Marco teórico	27
3.2.1 Definición de contaminación	27
3.2.1.1 Tipos de contaminación e impacto ambiental.	28
3.2.1.2 Causas y Fuentes contaminantes	28
3.2.1.3. Consecuencias de la contaminación del ambiente	30
3.2.1.4 Medidas de solución de la contaminación del medio ambiente	30
3.2.1.5 Los Metales pesados	30
3.2.1.6 Características de los metales pesados	31



3.2.2 Sedimentos superficiales a mediano plazo en el río	32
3.2.2.1 Definición y rol de los sedimentos superficiales	32
3.2.2.2 Factores y condiciones de acumulación de sedimentos	33
3.2.2.3 Técnica de muestreo de laboratorio	33
3.2.2.4 Métodos predictivos a mediano plazo	34
3.3 Marco conceptual	36
CAPÍTULO IV	37
METODOLOGÍA	37
4.1. Ámbito de estudio	37
4.2 Tipo y nivel de investigación	37
4.3 Diseño de investigación	37
4.3 Ética de la investigación	38
4.4 Población y muestra	38
4.5 Procedimiento	42
4.6 Técnicas e instrumentos	44
4.7 Análisis estadístico e inferencial	45
CAPÍTULO V	46
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
5.1. La determinación de los metales pesados en los sedimentos superficiales influye significativamente en la contaminación en un periodo a mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba.	46
5.1.1. Origen de datos y fuentes de metales pesados	46
5.1.2. Cálculo del promedio de metales pesados	46
5.1.3. Normalidad de los metales pesados	49
5.1.4. Histograma y cuartiles de los metales pesados	49
5.1.5. Correlación de rango de Spearman	53
5.1.6. Matriz de correlación de metales pesados	55
5.1.7. Determinación de los límites máximos permisibles de concentraciones de metales pesados	57
5.1.7.1. Cromo (Cr)	57
5.1.7.2. Cadmio (Cd)	58
5.1.7.3. Arsénico (As)	58
5.1.7.4. Plomo (Pb)	59
5.1.7.5. Bario (Ba)	59
5.1.8. Análisis Comparativo de límites máximo permisibles de concentraciones de metales pesados.	61
5.1.9. Matriz de correlación de los metales pesados y la contaminación	63
5.1.10. Matriz de correlación de Metales Pesados y ECAs contaminación	64

5.2. La determinación de los factores fisicoquímicos en los sedimentos superficiales influye significativamente en la contaminación en un periodo de mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba.	67
5.2.1. Origen de datos y fuentes de parámetros fisicoquímicos	67
5.2.2. Normalidad de los parámetros fisicoquímicos	68
5.2.3. Histograma y cuartiles de parámetro fisicoquímicos	69
5.2.4. Matriz de correlación de los metales pesados	78
5.2.5. Correlación de Metales pesados con los parámetros fisicoquímicos	82
5.2.5.1. Influencia del pH	83
5.2.5.2. Influencia de la Conductividad:	84
5.2.5.3. Influencia de la Temperatura	85
5.2.5.4. Conclusiones Generales	85
5.3. La determinación de los límites máximos permisibles de contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales que influyen en calidad de contaminación ambiental a mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba.	85
5.3.1. Análisis de concentraciones de Metales Pesados	85
5.3.2. Significado Ambiental	86
5.3.3. Las proyecciones de la contaminación de los sedimentos superficiales por metales pesados	87
5.3.4. Resultados de las proyecciones	89
5.3.5. Las evaluaciones de la contaminación de los sedimentos superficiales por metales pesados	90
5.3.6. Proyecciones y evaluaciones de concentración de metales en el suelo	93
5.3.7. Proyección de Contaminación de los sedimentos superficiales	96
5.3.8. Análisis de variaciones en las concentraciones de metales pesados	97
5.3.9. Implicaciones y Recomendaciones	99
5.3.10. Excedencias de los ECA	99
5.3.11. Cálculo de excedencias	100
5.3.11. Análisis de excedencias	101
5.3.12. Modelo de predicción	102
5.3.13. Validación del modelo de Voting de los metales pesados para la contaminación	102
5.3.13.1. Validación Cruzada	108
5.3.13.2. Predicción futura a mediano plazo (36 meses) de Cromo	109
5.3.13.3. Resultados generales	114
5.3.14. Discusión de resultados	117
CAPÍTULO VI	119
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
6.1 Conclusiones	119
6.2 Recomendaciones	137
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122





ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 — Fiscalización Ambiental en Apurímac en actividades económicas directamente fiscalizables por la OEFA	8
Figura 2 — Imagen que relaciona la naciente de la subcuenca del río Antabamba entre las uniones de las microcuencas del río Jeñamarca y Mollebamba, los puntos marcados con triángulos son la zona de estudio.	13
Figura 3 — Zonas de alta mineralización	13
Figura 4 — Perfil del río Antabamba de la zona de estudio	15
Figura 5 — Muestras de Sedimentos Superficiales del río Antabamba	39
Figura 6 — Estaciones de muestreo en la subcuenca del río Antabamba	40
Figura 7 — Recolección de muestras de sedimentos superficiales	41
Figura 8 — Flujo de pasos del procedimiento	43
Figura 9 — DataSet de concentraciones de metales pesados	48
Figura 10 — Histograma y Cuartiles (Q-Q Plot) de Cromo	49
Figura 11 — Histograma y Cuartiles (Q - Q Plot) de Cadmio	50
Figura 12 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de Arsénico	51
Figura 13 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de Plomo	52
Figura 14 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de Bario	53
Figura 15 — Matriz de correlación de los metales pesados Cr, Pb, Cd, As, Cd.	56
Figura 16 — Comparación de promedios de metales pesados con ECAs	57
Figura 17 — Las concentraciones de As y LMP	61
Figura 18 — Las concentraciones de Ba y Limites de referencia	61
Figura 19 — Las concentraciones de Cd y Limites de referencia	62
Figura 20 — Las concentraciones de Cr y Limites de referencia	62
Figura 21 — Las concentraciones de Pb y Limites de referencia	62
Figura 22 — Matriz de Correlación de ECAs Agrícola, Residencia e Industrial	64
Figura 23 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de Mvph (Potencial de Hidrógeno Modificado)	70
Figura 24 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de pH (Potencial de Hidrógeno)	71
Figura 25 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de Mvorp (Potencial Redox en Sedimentos)	72
Figura 26 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de %DO (Oxígeno Disuelto)	73
Figura 27 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de PPMdo	74

Figura 28 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de S/cm (Conductividad eléctrica del agua)	75
Figura 29 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de $\mu\text{S}/\text{cm}^{\wedge}\text{A}$ (Variación en la conductividad eléctrica)	75
Figura 30 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ (Resistividad)	76
Figura 31 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de Psu (Salinidad)	77
Figura 32 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de T°C (Temperatura)	78
Figura 33 — Matriz de correlación por parámetro fisicoquímicos	79
Figura 34 — Matriz de correlación de factores fisicoquímicos y metales pesados	83
Figura 35 — Proyección Comparativa de la Concentración de Metales Pesados de 3 Meses a 1 Año	87
Figura 36 — Proyección Comparativa de la Concentración de Metales Pesados de 3 Meses a 2 Años	88
Figura 37 — Proyección Comparativa de la Concentración de Metales Pesados de 3 Meses a 3 Años	88
Figura 38 — Proyección de Concentraciones de Metales pesados en los sedimentos superficiales en meses y años.	89
Figura 39 — Evaluación de Contaminación de Sedimentos superficiales (Proyección a 1 año)	91
Figura 40 — Evaluación de Contaminación de los Sedimentos superficiales (Proyección a 2 años)	92
Figura 41 — Evaluación de Contaminación de los Sedimentos superficiales (Proyección a 3 años)	93
Figura 42 — Estándares de calidad establecidos para suelos	96
Figura 43 — Análisis de variaciones de concentraciones de metales pesados	97
Figura 44 — Análisis de variaciones de concentraciones de metales pesados priorizado	97
Figura 45 — Primer y segundo análisis de excedencias de concentraciones de metales pesados priorizados	101
Figura 46 — Matriz de Confusión para el metal Cromo (Cr)	103
Figura 47 — Matriz de Confusión para el metal Arsénico (As)	103
Figura 48 — Matriz de Confusión para el metal Cadmio (Cd)	104
Figura 49 — Matriz de Confusión para el metal Plomo (Pb)	104
Figura 50 — Matriz de Confusión para el metal Bario (Ba)	105
Figura 51 — Precisión de todos los metales pesados	107
Figura 52 — Comparación de precisión de los modelos	108
Figura 53 — Predicción de contaminación por 36 meses con el algoritmo machine learning XGBoost.	110
Figura 54 — Predicción de contaminación por 36 meses con el algoritmo machine Learning Bagging.	111
Figura 55 — Predicción de contaminación por 36 meses con el algoritmo Voting	113



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 — Zona de muestreo inicial, final y coordenadas UTM	14
Tabla 2 — Coordenadas UTM de los puntos y muestra en el río Antabamba	14
Tabla 3 — Operacionalización de variables	17
Tabla 4 — Coordenadas UTM de estaciones de muestreo	40
Tabla 5 — Materiales y métodos por actividades	42
Tabla 6 — Métodos analíticos de concentración de metales y parámetros fisicoquímicos en muestras de sedimentos.	44
Tabla 7 — Resultados de Concentraciones de los metales en general en (ppm)	46
Tabla 8 — Tipos de ECAs con los Límites Máximos Permisibles	48
Tabla 9 — Estadísticas de normalidad de metales pesados	49
Tabla 10 — Correlación de rango de Spearman y Valor de P	54
Tabla 11 — Normalidad de los límites máximos permisibles	63
Tabla 12 — Métodos de análisis por parámetro	67
Tabla 13 — Límites Máximos Permisibles de parámetros fisicoquímicos	68
Tabla 14 — Normalidad de los parámetros fisicoquímicos	69
Tabla 15 — Promedios y Proyecciones de Concentración de Metales Pesados	87
Tabla 16 — Evaluación de Contaminación del Suelo (Proyección a 1, 2 y 3 años)	90
Tabla 17 — Proyección de ECA por periodos trimestrales y anuales	95
Tabla 18 — Promedios de análisis y límites máximos permisibles	100
Tabla 19 — Análisis de excedencias de los límites máximos permisible	100
Tabla 20 — Resultados de la validación del modelo	105
Tabla 21 — Tendencia de predicción a mediano plazos de los metales pesados	116



INTRODUCCIÓN

La presente investigación, titulada “determinación de la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba en un periodo de mediano plazo”, está ubicada en la zona 18 S de la provincia de Antabamba.

La contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba es un problema grave vinculado a las actividades mineras, tanto formales como informales. Las concentraciones de metales pesados en los sedimentos, como plomo (Pb), mercurio (Hg) y cadmio (Cd), afectan la calidad del agua y el suelo, generando impactos negativos en la salud pública y en los ecosistemas acuáticos. SEGÚN (ZHANG et al., 2024), los sedimentos contaminados son una amenaza persistente para la biota acuática, lo que resalta la urgencia de investigar estos contaminantes.

Según datos del (INGEMMET., 2022), la región cuenta con yacimientos de cobre y zonas de mineralización de oro en localidades como Tiaparo, Ayahuay y Pachaconas, lo que ha impulsa tanto la minería formal como la informal. Esta última, en particular, representa una amenaza crítica al operar sin controles adecuados, generando vertidos de residuos sólidos y efluentes que contribuyen al deterioro del suelo y la pérdida de cobertura vegetal, como lo señala el (MINAM., 2013), en su análisis de impactos ambientales, destaca una reducción del 15 % en la cobertura vegetal de la subcuenca en la última década, como consecuencia directa de vertimientos mineros no regulados. El cual, podría generar una contaminación con ciertos metales superficiales.

La presencia de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Antabamba constituye una amenaza crítica para la salud humana y ambiental debido a su capacidad para bioacumularse. Las actividades mineras en la región, especialmente las no reguladas, incrementan estos riesgos. Además, la falta de metodologías eficaces para la evaluación de la calidad de los sedimentos complica la identificación de los contaminantes (CORREA et al., 2020). Esta investigación es fundamental para aportar



datos precisos que puedan guiar políticas de mitigación y restauración ambiental en la zona.

Esta problemática es particularmente grave en los Sedimentos Superficiales, que están contaminadas por actividades antropogénicas o por relaves mineros con altas concentraciones de metales pesados (HUARANGA et al., 2012). Este fenómeno compromete la salud ambiental y humana debido a la acumulación gradual de metales como el plomo (Pb) y el mercurio (Hg), que tienen efectos tóxicos sobre los ecosistemas acuáticos y los seres humanos (OEFA., 2021; ZHANG et al., 2024). Además, la falta de información precisa sobre la concentración de estos metales limita las medidas correctivas efectivas.

El proyecto tiene la finalidad de determinar la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba que puede influir en la contaminación en un periodo de mediano plazo.

La hipótesis principal de esta investigación es establecer la determinación de la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba influye en la contaminación en un periodo de mediano plazo, que sostiene que la actividad minera en la subcuenca del río Antabamba, especialmente la minería informal, está contribuyendo significativamente a la contaminación de los sedimentos superficiales con metales pesados, superando los límites máximos permisibles establecidos para la protección de los ecosistemas acuáticos y la salud humana (ZHANG et al., 2024; NEGRETE Y CÁRDENAS 2019).

Los alcances del estudio se centrarán en los sedimentos superficiales del río Antabamba, tomando muestras en dos etapas del año para observar la variabilidad en los niveles de contaminación. Se analizarán metales pesados específicos como el plomo, el mercurio y el cadmio, entre otros.

La investigación enfrentará limitaciones debido a la escasez de datos históricos sobre la calidad de los sedimentos en la región y la dificultad de acceder a ciertas áreas, que contengan información predictiva significativa de concentraciones de metales pesados (BREIMAN, 2001).

La investigación adoptará un enfoque deductivo-analítico. Se realizarán muestreos en dos períodos del año para analizar las concentraciones de metales pesados en los sedimentos y aseverar la variabilidad en los niveles de contaminación. Además, se



emplearán métodos de análisis químicos y modelos predictivos basados en aprendizaje automático para mejorar la precisión del análisis (NEGRETE Y CÁRDENAS, 2019; VU, 2019)

La investigación está desarrollada en seis capítulos: Capítulo I, se presenta el planteamiento del problema según el argumento. Capítulo II, se tiene los objetivos de la investigación. Capítulo III, presenta los antecedentes respectivos para luego dilucidar el marco teórico y el conceptual. Capítulo IV, se define la metodología teniendo en cuenta el tipo, nivel, diseño de la investigación, la población y muestra, técnicas, instrumentos y la validación estadística. Capítulo V, se tiene los resultados a que se han llegado, contrastando la hipótesis y su discusión correspondiente y Capítulo VI, las conclusiones arribadas y las recomendaciones posibles.

Se investiga la problemática de la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales del río Antabamba, con el fin de determinar la contaminación a mediano plazo, basadas en datos precisos y metodologías de predicción. Este enfoque es crucial para mejorar la gestión de los recursos hídricos en la región y prevenir futuros daños a la salud y al medio ambiente, como lo han señalado diversos estudios previos (ZHANG et al., 2024; CORREA CUBA et al., 2020).



RESUMEN

La investigación aborda el grave problema ambiental de la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba, causado por actividades mineras, antropogénicas o procesos naturales afectando la biota acuática. El objetivo principal es determinar la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales que influyen en un periodo de mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba, aplicando técnicas y algoritmos supervisados homogéneos y heterogéneos de aprendizaje automático como el Bagging, BXGBoost y el Voting Regressor, analizando concentraciones de metales como del cromo, y considerando los estándares de calidad vigentes. Con un enfoque aplicativo y diseño experimental correlacional, se recolectaron y analizaron 28 muestras de sedimentos en 14 estaciones. El uso de algoritmos de aprendizaje automático que permitió predecir los límites máximos permisibles de contaminación con el 75% de precisión, estimando que en el 58% de los meses evaluados (21 de 36) excederán los límites máximos permisibles establecidos por las ECAs agrícolas, con un incremento significativo en Cr (hasta 20,98 ppm) y Pb (hasta 42,54 ppm), mientras que As continua por el umbral permitido, en conclusión se evidencia la contaminación de sedimentos por metales pesados como cromo, arsénico y cadmio, cuyas concentraciones están correlacionadas entre sí.

Palabras clave: contaminación, metales pesados, predicción, río, sedimentos superficiales



ABSTRACT

This research addresses the serious environmental problem of heavy metal contamination in the surface sediments of the Antabamba River sub-basin, caused by mining, anthropogenic activities, or natural processes affecting aquatic biota. The main objective is to determine heavy metal contamination in surface sediments that influence the Antabamba River sub-basin over the medium term, applying supervised homogeneous and heterogeneous machine learning techniques and algorithms such as Bagging, BXGBoost, and Voting Regressor, analyzing concentrations of metals such as chromium, and considering current quality standards. Using an applicative approach and correlational experimental design, 28 sediment samples were collected and analyzed at 14 stations. The use of machine learning algorithms that allowed to predict the maximum permissible limits of contamination with 75% accuracy, estimating that in 58% of the months evaluated (21 out of 36) they will exceed the maximum permissible limits established by the agricultural ECAs, with a significant increase in Cr (up to 20.98 ppm) and Pb (up to 42.54 ppm), while As continues above the permitted threshold, in conclusion, contamination of sediments by heavy metals such as chromium, arsenic and cadmium is evident, whose concentrations are correlated with each other.

Keywords: *heavy metals, prediction, pollution, river, surface sediments.*



CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

Los sedimentos contaminados son una preocupación del ambiente ya sea en las aguas y/o suelos superficiales del mundo, por lo cual se necesitan contramedidas viables para abordar los problemas de contaminación del agua, debido al impacto en la salud humana y las actividades socioeconómicas (Zhang, 2019), en vista que estos muestran presencia de metales pesados tóxicos causada por una variedad de contaminaciones que dificultan la determinación de la concentración de metales (Li et al., 2020), la evaluación de contaminantes del agua o suelo no es posible sin el índice de geo acumulación y las pautas de calidad de sedimentos (Huaranga et al., 2012). Las elevadas concentraciones de mercurio (Hg), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobalto (Co) y hierro (Fe) detectadas en estos sedimentos pueden ejercer un impacto adverso sobre la biota y representar un riesgo significativo para la salud de las poblaciones humanas que habitan en la sección inferior de la cuenca (Flores y Carolina, 2015).

Posteriormente estas malas prácticas han sido denunciadas a las autoridades pertinentes. Cabe destacar que actualmente podría existir procesamiento de concentrados de oro cuyos residuos sólidos y efluentes están siendo vertidos indiscriminadamente a los tributarios que conforma el río Antabamba con contenidos posiblemente altos en Cadmio, Plomo, Mercurio, Arsénico, y otros elementos metálicos influenciando al ecosistema existente, que con el tiempo estos van siendo mezclados con la materia orgánica y los sedimentos preexistentes en estos ríos, que de acuerdo a su toxicidad estos elementos, son tóxicos para la salud y una muerte lenta a los microorganismos de la biota acuática y aguas abajo contaminación severa a los cultivos de primera necesidad existentes en la zona. “Dentro del comportamiento del agua es particularmente importante considerar la fase de sedimentos debido a muchos contaminantes y su naturaleza en gran

medida es hidrofóbica; se sabe que está fuertemente asociada con sedimentos naturales y materia orgánica disuelta (McCarthy, Lizama Allende y Fletcher 2014; Zhang, 2019). La mayoría de las elevadas concentraciones de metales pesados observadas se registraron al inicio y durante los períodos de la temporada de lluvias (octubre a marzo), que es considerada de peligro muy alto a la ocurrencia de derrumbes (INGEMMET, 2022).

“La acumulación de metales pesados (Cr, Ni, Cu, As, Hg, Cd y Pb) sedimentos constituye una crisis ambiental significativa reconocida a escala mundial, con mayor impacto en países en desarrollo, entre ellos Bangladesh” (Mohamad, Al-Ansari y Knutsson, 2016). “Los metales pesados son indicadores de un grave problema ambiental por la alta toxicidad y las repercusiones fisiológicas tanto en los seres humanos como en animales, como es el caso de los peces” (Pabón et al., 2020). Los sistemas acuáticos actúan como sumideros finales muchas de las sustancias que se desechan por el hombre, y asimismo esta actividad biológica promueve la biodegradación de compuestos orgánicos en dióxido de carbono y el agua como producto final, mientras que las especies inorgánicas particularmente los metales pesados tienden a bioacumularse en los sedimentos o en los organismos acuáticos (Ávila et al., 2014). “La contaminación no se debe tanto a su presencia en la fracción sedimentable, sino en los procesos como la sorción_desorción y precipitación_disolución, los cuales, están determinados por condiciones fisicoquímicas del río, que provocan la redetención en la columna de agua dejándolos biodisponibles para la vegetación acuática” (Herrera-Núñez et al., 2013). Es por ello que se estudia los sedimentos superficiales en la subcuenca del río Antabamba donde la presencia de contaminantes puede resultar peligrosa, sobre todo en áreas o zonas de elevada densidad de población o actividad industrial, los metales pesados son alojados en el sedimento de los ríos a cierta profundidad en ausencia de oxígeno en algunas ocasiones en forma de sulfuros insolubles y al ser removidos pueden entrar en contacto con minerales oxidados y al mezclarse con la materia orgánica son susceptibles de contaminarse y podrían afectar a los ecosistemas. Por lo que es importante para los investigadores poner en manifiesto cuáles son las zonas más susceptibles de ser contaminadas por metales pesados, ello conlleva a informar y optimizar los posibles controles ambientales con acciones de seguimiento y control de contaminación de los sedimentos superficiales conservando el recurso natural tan



rico y a su vez maltratado, el río Antabamba, ubicado en el departamento de Apurímac y provincia del mismo nombre (SIAR, 2021).

El agua de la subcuenca del río Antabamba, es fuente de un aproximado de 200 canales, lo cuales permiten el riego de 584,943 Hs, por lo que requiere de un cuidado y control adecuado y constante por ser eminentemente latente su contaminación al estar expuesta a diferentes agentes contaminantes, que ocasionan deterioro de la salud es decir diferentes males epidemiológicos o irritaciones hasta el cáncer de pulmón, estómago y entre otros, por el hecho de ser una zona eminentemente minera donde existe mineralización diversa como cobre, molibdeno, oro y/o plata entre otros principalmente que son apreciados tanto por la gran minería, mediana, pequeña minería, minería artesanal y la minería informal, los cuales se encuentran en operaciones (HUARANGA et al., 2012).

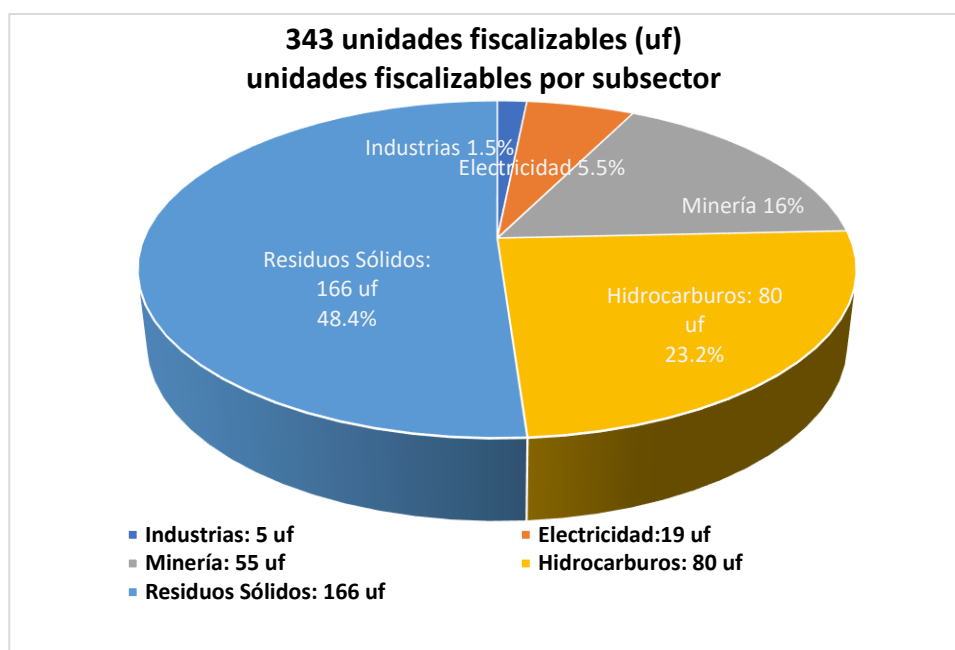


Figura 1 — Fiscalización Ambiental en Apurímac en actividades económicas directamente fiscalizables por la OEFA

FUENTE: (OEFA 2021).

De la Figura 1, la contaminación se traduce en casos fiscalizados por la “Fiscalización Ambiental en Apurímac en actividades económicas” tenemos que los residuos sólidos con un 48,4% de casos reportados, seguido del hidrocarburo en un 23,3% de casos reportados, y como tercer lugar la minería con 16% de casos reportados, entre otros la

agricultura, la electricidad y la industria haciendo un total de 100% con 343 casos reportados (OEFA 2022), sin embargo no se considera los casos no reportados, puesto que no existe un control adecuado de las fuentes hídricas y menos de sedimentos por lo que existen casos que se pudieron prevenir y reducir las denuncias de este tipo de incidencias.

La subcuenca Antabamba, es uno de los principales afluentes del río Pachachaca cuenca donde se asentó la ciudad de Abancay, por lo que es importante realizar un análisis ambiental de la cuenca. Sin embargo, el principal problema es que no existe información ambiental que permita realizar dicho análisis. Por lo que se tiene que recurrir a metodologías indirectas haciendo uso de los sedimentos y modelos de transformación de sedimentos superficiales.

La contaminación por metales representa un problema complejo, la mayor parte debido a la dificultad de cuantificar las concentraciones exactas y reales, debido al comportamiento hidrofóbico (Negrete y Cárdenas 2019), y debido al hecho, de que bajo ciertas condiciones ambientales, estos contaminantes se vuelvan biodisponibles (OEFA 2021; BACH et al., 2014 and ZHANG et al., 2024). Durante los eventos de lluvia la escorrentía superficial incrementa la carga de los metales pesados en los sedimentos, lo que intensifica la presencia en entornos acuáticos (MOHAMAD, AL-ANSARI y KNUTSSON, 2016). Esta situación es similar con la crisis de la contaminación de los sedimentos superficiales por metales pesados en diversas regiones de países en desarrollo. Elementos como mercurio (Hg), plomo (Pb) y cadmio (Cd), representan amenazas significativas tanto para la biota acuática y la salud humana, especialmente en zonas con intensa actividad minería (XIE et al., 2023).

Los metales pesados presentes en los sedimentos de los ríos se producen cuando los contaminantes son vertidos indiscriminadamente en los lechos de los ríos sin tratamiento alguno y/o adecuado para eliminar estos compuestos nocivos. Como también se llevó a cabo teniendo en cuenta variables antrópicas y no antrópica, y muestreo se realizó en dos etapas una en época de estío y otra de medianas avenidas (ÁVILA et al., 2014).

La presencia de los siguientes elementos químicos o metales pesados (P, B, Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Cd, Sn, Sb, Ba, Pb, Bi), tienen concentraciones que deben cumplir límites máximos permisibles de contaminación presentes en los sedimentos cuando exceden estos elementos pueden contaminar en forma gradual llegando a una toxicidad tanto de la vida acuática como también en la salud humana y poner en constante riesgo la calidad de las aguas. En estos sedimentos superficiales, los metales pesados tienden a acumularse progresivamente, representando una amenaza persistente para los sistemas acuáticos (ÁVILA et al., 2014).

No se aplican metodologías eficaces para evaluar la calidad, esto tiende a ser obstáculo en la caracterización de contaminantes en ríos como el de Antabamba, en esta zona, los niveles de contaminación han mostrado una tendencia creciente, evidenciando la carencia de métodos efectivos que permitan evaluar de forma precisa la calidad de sus aguas y sedimentos (CORREA et al., 2020). Frente a esta limitación, se vuelve crucial el uso de modelos predictivos impulsados por técnicas de aprendizaje automático, los cuales pueden incrementar significativamente la exactitud en la detección de áreas contaminadas (CORREA et al., 2020). Las herramientas de estos modelos, permite o hace posible identificar zonas con mayor vulnerabilidad y establecer estrategias más eficientes de monitoreo y control (NEGRETE y CÁRDENAS, 2019).

En el caso de Apurímac, la supervisión ambiental reveló un total de 343 incidencias durante el año 2022., siendo el residuo sólido el principal factor de contaminación, seguido por el derrame de hidrocarburos y la minería (OEFA, 2021). Esta situación, evidencia que una mejor gestión de la información y una mayor disponibilidad, de los datos podrían prevenir múltiples episodios de contaminación.

Asimismo, la escasez de datos detallados viene siendo un obstáculo para evaluar con precisión el estado de la calidad de agua (BREIMAN, 2001). Los datos, se destacan en la aplicación de los algoritmos de aprendizaje automático cuentan con una eficacia que depende en gran medida de la calidad y cantidad de los datos disponibles. Por su parte, (VU, 2019) enfatiza que la falta de datos específicos también limita la capacidad de predecir con precisión y resalta la importancia de emplear enfoques de aprendizaje automático adaptados a escenarios con datos escasos, señalando que la personalización y el refinamiento de los modelos son esenciales para superar estas deficiencias.

Por lo tanto, es importante adoptar nuevas estrategias de gestión que sean sostenibles para los recursos naturales y la mitigación de los efectos negativos de la contaminación. En la región de Apurímac, la actividad minera ha comprometido la calidad del suelo, incrementando el nivel de concentración de los metales y pone en peligro la biodiversidad (CORREA et al., 2020). La problemática del riego y la producción agrícola al cual se realiza con el agua de los ríos de la región requieren de un monitoreo que permita anticipar para mitigar mecanismos de contaminación (HUARANGA MORENO et al., 2012).

El método de trabajo adoptado para esta investigación fue deductivo-analítico, lo que permitió un enfoque sistemático para identificar, analizar y evaluar las principales fuentes de contaminación en la subcuenca. La motivación para este estudio radica en la presencia de yacimientos de cobre y mineralización de oro en ambos márgenes de la subcuenca Antabamba, particularmente en zonas como Tiaparo, Ayahuay y Pachaconas, donde la explotación minera incrementa los riesgos de contaminación y deterioro ambiental

1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo se determina la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales que influyen en un periodo de mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo los metales pesados en los sedimentos superficiales influyen en la contaminación en un periodo actual de la subcuenca del río Antabamba?
- ¿Cómo los factores fisicoquímicos en los sedimentos superficiales influyen en la contaminación en un periodo actual de la subcuenca del río Antabamba?
- ¿Cómo serán los límites máximos permisibles de contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales que influyen la calidad de contaminación ambiental a mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba?

1.2.3 Justificación de la Investigación

La investigación sobre la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba, es crucial, dado que este río se encuentra altamente expuesto a diversas fuentes de contaminación, especialmente vinculadas a la explotación minera, ya sea formal, informal o ilegal. Estas actividades se desarrollan en las proximidades de la subcuenca y pueden liberar metales pesados en el ecosistema fluvial.

El río Antabamba desemboca en el río Chalhuanca, que a su vez es un afluente de la cuenca del río Pachachaca. La especulación sobre su grado de contaminación es preocupante, ya que el afluente está cargado de contaminantes que pueden tener graves consecuencias para la salud pública, especialmente por los límites no permisibles de metales pesados. Existe un desconocimiento significativo sobre la cantidad y el tipo de metales pesados presentes en los sedimentos superficiales de esta subcuenca, lo que subraya la necesidad de estudiar y cuantificar estos contaminantes.

Esta investigación tiene como objetivo evaluar estos metales pesados, proporcionar un marco de información a mediano plazo para gestionar la contaminación ambiental y optimizar el uso del recurso hídrico en la subcuenca. Además, los resultados de este estudio podrían servir como modelo para investigaciones similares en cuencas vecinas.

Al abordar la falta de controles ambientales y al investigar la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales, esta investigación no solo permitirá la recolección de datos primarios, sino que también proporcionará información valiosa en la toma de decisiones, que deberán prever las autoridades correspondientes. La presencia de metales pesados en los sedimentos del río Antabamba representa una amenaza significativa tanto para la salud humana como para el medio ambiente debido a su capacidad de bioacumulación. Las actividades mineras, especialmente las no reguladas, agravan estos riesgos, mientras que la falta de metodologías adecuadas para evaluar la calidad de los sedimentos complica la identificación de los contaminantes (CORREA CUBA et al., 2020).

En resumen, esta investigación es esencial para generar datos precisos que guíen políticas de mitigación y restauración ambiental en la región, promoviendo la salud pública y la conservación del medio ambiente.

1.3 Ubicación y contextualización

El río JEuñamarca y Mollebamba son fuentes principales para la formación del río Antabamba que surca la subcuenca del río del mismo nombre, (ver Figura 2, ubicada en el departamento de Apurímac, distrito y provincia de Antabamba, atravesando parte de los distritos de Pachaconas, Ayahuay, Tiaparo, Tapayrihua Socco, en la margen derecha y en la margen izquierda los distritos de Poccohuanca y Yanaca, aguas abajo, llegando hasta el pueblo de Santa Rosa, donde confluye con otra subcuenca del río Chalhuanca formando así e iniciándose la cuenca del río Pachachaca, las aguas de este río posiblemente sea el abastecimiento de agua para la ciudad de Abancay mediante el proyecto del plan maestro de agua potable. Ver Figura 2 y Anexo VIII.





Figura 2 — Imagen que relaciona la naciente de la subcuenca del río Antabamba entre las uniones de las microcuencas del río Jeñamarca y Mollebamba, los puntos marcados con triángulos son la zona de estudio.

FUENTE: (Google Earth), accedido junio del 2024.

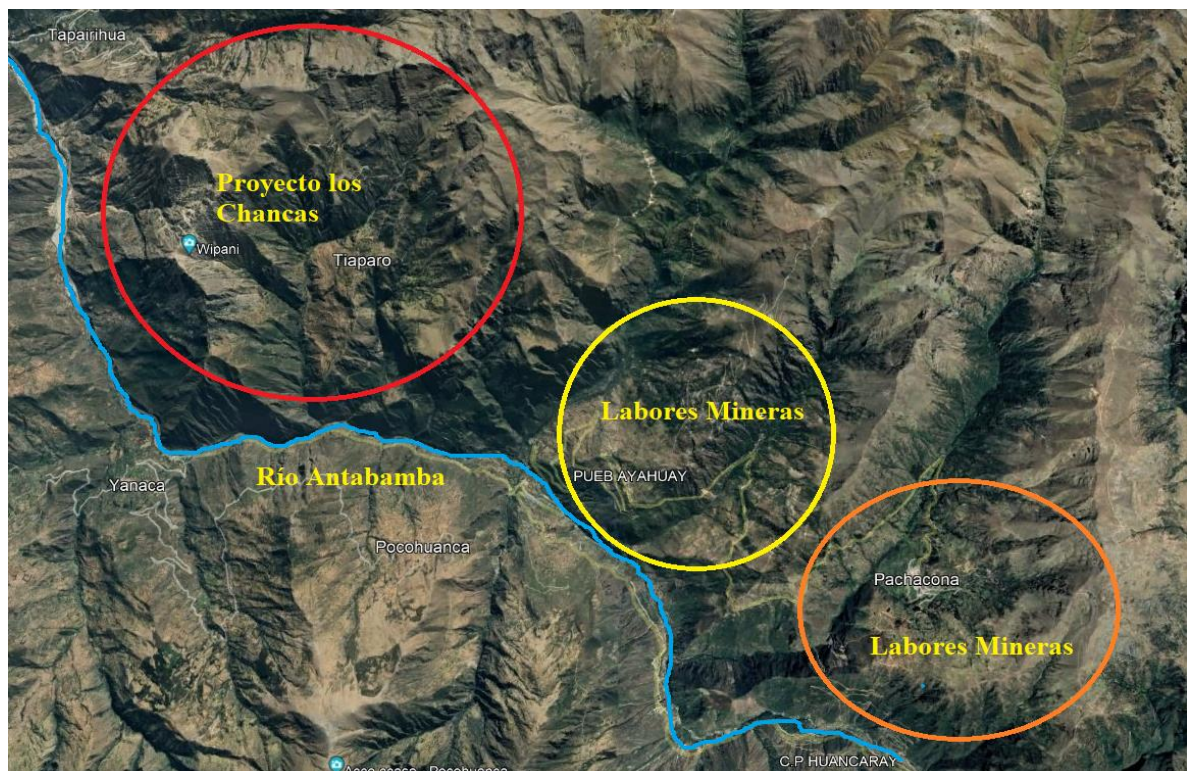


Figura 3 — Zonas de alta mineralización

FUENTE: (Google Earth), accedido julio del 2021.

En la Figura 2 y la Figura 3, Observamos la existencia de un gran yacimiento enmarcada con círculo rojo el Proyecto los Chancas que es exclusivo de una mineralización de sulfuros de cobre, seguida de diferentes labores de extracción de minerales auríferos y mixtos en la zona de Ayahuay círculo amarillo la tercera zona enmarcada con círculo anaranjado oscuro que es la zona mineralizada de Pachaconas también dedicada a la extracción de minerales de oro, cobre y visualizándose en el otro margen de las diferentes labores en explotación de estos minerales desconociéndose el número de estas, luego de extraer el mineral es cargado para su transporte a plantas de beneficio de acuerdo a su capacidad financiera, los cuales son transportados y/o vendidos a comercializadores de minerales y otros al procesamiento de estos minerales tanto locales como interdepartamentales. Asimismo, donde muchas de estas labores mineras están a lo largo de la cuenca del río Antabamba, la mayoría de estas labores son explotadas por minería artesanal con un porcentaje de mineros formalizados, en proceso y otros son informales.

La zona de estudio está entre el punto inicial (Pi) puente Huancaray localizada en la zona de Pachaconas y el puente Pichihua ubicada en la zona Socco que es el punto final (Pf) de la presente investigación (ver Tabla 1).

Tabla 1 — Zona de muestreo inicial, final y coordenadas UTM

Punto de Muestreo		Zona	Coordenadas de Muestreo en UTM DATUM WG 84		Altitud en msnm
Referencia	Punto		Este	Norte	
Puente Huancaray	Inicio	18 S	0713693	8423521	2797
Puente Pichihua	Final	18 S	0698026	8437463	2482

Tabla 2 — Coordenadas UTM de los puntos y muestra en el río Antabamba

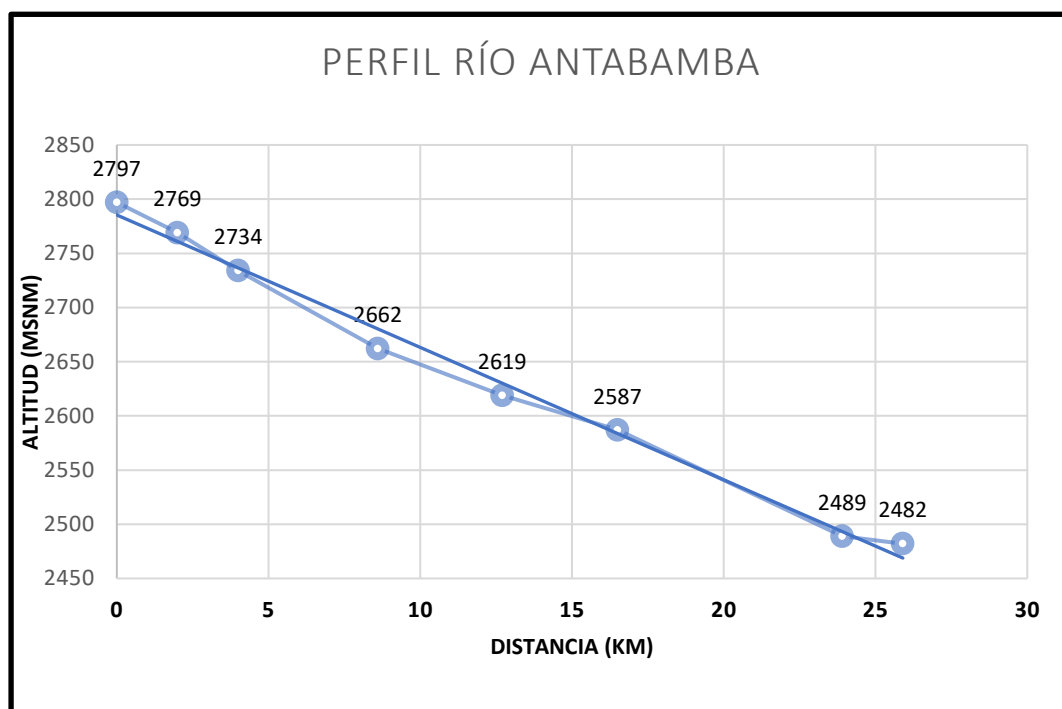
	Zona	Muestreo coordenadas UTM DATUM WG 84		Cant. Muestras	
		Este	Norte	Secas	Avenida
P1	18 S	716946,1	8420137,7	1	1
P2	18 S	714533,3	8422281,3	1	1



P3	18 S	710451,7	8423760,1	1	1
P4	18 S	708773,6	8426855,7	1	1
P5	18 S	706486,3	8428067,0	1	1
P6	18 S	704837,6	8429058,2	1	1
P7	18 S	701827,1	8429161,8	1	1
P8	18 S	700186,5	8432969,8	1	1
P9	18 S	699431,0	8435405,5	1	1
P10	18 S	698075,4	8437567,8	1	1
P11	18 S	697370,1	8439826,6	1	1
P12	18 S	695831,8	8443539,8	1	1
P13	18 S	695700,6	8447082,0	1	1
P14	18 S	695739,0	8449576,8	1	1
Sub Total				14	14
Total				28	

El perfil del río Antabamba podemos visualizar las altitudes que varían desde 2 797 msnm que es el punto inicial de muestreo y descendiendo hasta una altitud de 2 482, en el cual se aprecia una pendiente de regular a alta en la Figura 4.

Figura 4 — Perfil del río Antabamba de la zona de estudio



CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Determinar la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales que influyen en un periodo de mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba.

2.1.2 Objetivos específicos

- Identificar los metales pesados en los sedimentos superficiales que influyen en la contaminación en un periodo de mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba.
- Evaluar los factores fisicoquímicos en los sedimentos superficiales que influyen en la contaminación en un periodo de mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba.
- Predecir los límites máximos permisibles de contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales que influyen en la calidad de contaminación ambiental a mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba.

2.2 Hipótesis

2.2.1 Hipótesis general

La determinación de la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales que influyen en un periodo de mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba.

2.2.2 Hipótesis específicas

- La identificación de los metales pesados en los sedimentos superficiales que influyen significativamente en la contaminación en un periodo actual de la subcuenca del río Antabamba.

- La evaluación de los factores fisicoquímicos en los sedimentos superficiales influye en la contaminación en un periodo actual de la subcuenca del río Antabamba.
- La predicción de límites máximos permisibles de concentraciones de metales pesados en los sedimentos superficiales influye en un periodo de mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba.

2.3 Operacionalización de variables

Tabla 3 — Operacionalización de variables

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES
Variable Independiente (X) Concentración de metales pesados en sedimentos superficiales.	Dimensión 1 Concentración de metales pesados	Cobre Plomo Cadmio Arsénico Cromo	mg/kg y/o (ppm) mg/kg y/o (ppm) mg/kg y/o (ppm) mg/kg y/o (ppm) mg/kg y/o (ppm)
	Dimensión 2 Parámetros Fisicoquímicos	Resistividad Temperatura Oxígeno disuelto Conductividad Salinidad Presión	(MΩ.cm) °C %DO S/cm Psu Psi
Variable Dependiente (Y) Determinación de la contaminación por metales pesados	Dimensión 1 Nivel de contaminación a mediano plazo	Límites Máximos Permisibles de ECAs	$f(y) = \{f, q \text{ E } N/O < f1 + C1 > O \text{ ppm}\}.$ $f(y1) = \text{Permisible a largo plazo } x \text{ meses}$ $f(y2) = \text{Contaminado a largo plazo } x \text{ meses}$



CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes

a) Internacionales

CHEN et al., (2018), indica que la “contaminación por metales pesados es a largo plazo y de alta concentración influye fuertemente con microbios y los genes funcionales en los sedimentos del río Amarillo”, con el objetivo de determinar la contaminación en los sedimentos obteniendo resultados de los mismo como son: Los sedimentos en Dongdagou contenían altas concentraciones de cadmio, arsénico, plomo y mercurio, así mismo se concluye que el microbioma ha adquirido resistencia a la contaminación por metales pesados a largo plazo, las proteobacterias, o Bacteroidetes y Firmicutes fueron los filos funcionales centrales, donde el sedimento contiene genes relacionados con la reparación del ADN y la resistencia a los metales pesados como que la abundancia viral en Dongdagou fue mayor que en Maqui.

BADARIAH et al., (2023), en la investigación “Contaminación por metales pesados del río Batanghari, Jambi, Indonesia: determinación basada en el valor del factor de enriquecimiento de sedimentos”, el objetivo fue analizar la contaminación en los sedimentos del río Batanghari e identificar la presencia de metales pesados como Cu, Cr, Co, Cd y Hg en los sedimentos, concluyéndose que las aguas del río en estudio, está contaminado con metales como el Hg, Cd, and Cu, causados por la actividad antropogénica a lo largo del río. El río Batanghari es la fuente primordial de agua para la gente de Jambi, su coloración esta con tendencia perder su claridad”. La presente investigación se centró en determinar el contenido de metales pesados en el agua y los sedimentos del río Batanghari, el equipo utilizado para los análisis es el ICP-MS para determinar el nivel de metales pesados (Cu, Cr, Co, Cd, Hg), como resultado, el valor de enriquecimiento de la muestra de sedimento del río Batanghari disminuyó con la siguiente

secuencia $Cd > Hg > Cu > Cr > Co$, en 10 ubicaciones puntuales, en conclusión, se muestra concentración de metales demasiado altas como Cd, Cu, y Hg los cuales sobrepasan los estándares de calidad establecidos mientras que las concentraciones de metales de Cr y Co todavía se encuentran dentro de los estándares establecidos, indicándose también un alto grado de actividad antropogénica a lo largo del río en mención.

FIEDLER, (2 023). En la investigación intitulada “Cambios a largo plazo en la contaminación de los sedimentos del fondo del río Warta con metales pesados, Polonia: estudio de caso”, el objetivo señalado fue determinar la contaminación a largo plazo las concentraciones por metales pesados en los sedimentos del río caso de estudio como As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb y Zn, las concentraciones, encontrándose concentraciones medianas más altas de Cd, Cr, Cu, Hg y Pb en muestras recolectadas de sitios rodeados por áreas de uso antropogénico de la tierra, en su conclusión indica alta variabilidad espacial y temporal en las concentraciones de metales pesados en los sedimentos del río Warta, asimismo en la zona de estudio encontró que no existe correlación significativa entre las concentraciones de metales y el uso de la tierra adyacente.

SOJKA & JASKUŁA, (2 022), en la investigación “Metales pesados en sedimentos fluviales: contaminación, toxicidad e identificación de fuentes: un estudio de caso de Polonia”. El objetivo de la presente investigación se tradujo ver la distribución espacial, grado de contaminación, riesgos ecológicos y las fuentes de contaminación de seis metales pesados en sedimentos de 47 ríos. Utilizando técnicas estadísticas y distribución de los ríos en las cuencas de estudio, para analizar los metales pesados de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en sedimentos de ríos y para identificar las fuentes se utilizó la matriz positiva. Los resultados indican que la tercera parte de los ríos indican contaminación por sedimentos, en ríos individuales pueden tener efectos tóxicos sobre la biota acuática. El análisis de autocorrelación de matriz positiva identificó dos fuentes de entrega de metales pesados al medio acuático. Cr, Cu, Ni, Pb y Zn y se originan a partir de fuentes puntuales y difusas, mientras que las concentraciones de Cd tienen un origen natural. Por consiguiente, identificándose también tres fuentes de contaminación, la urbana son responsables del suministro de Cu, la contaminación agrícola del Zn y la contaminación industrial del Ni y Cr.

ISLAM et al., (2 023), en los estudios desarrollados de la investigación “Evaluación de la contaminación y del riesgo ecológico de Cr, As, Cd y Pb en agua y sedimentos de un río para un país en vías de desarrollo”, Precisándose el objetivo analizar en los sedimentos



del río Kirtankhola en Bangladesh la contaminación de metales pesados en los sedimentos, en la cuenca del río Kirtankhola, no se han establecido universalmente niveles seguros de metales pesados en las aguas superficiales y los sedimentos, los resultados indican para la muestra de agua lo siguiente la concentración media de Cr, As, Cd y Pb en muestra de agua fue de 33.25, 8.14, 0.48 y 21.14 $\mu\text{g/L}$, respectivamente y en sedimento fue de 30.47, 4.48, 0.20 y 43.19.98 mg/kg, respectivamente, su conclusión muestra que las concentraciones de metales pesados en agua supera los límites máximos de calidad de su normativa y un enriquecimiento menor de metales pesados en los sedimentos de la cuenca afectando el ecosistema del río.

YONGO et al., (2023), en su proyecto de investigación “Evaluación de la contaminación por metales pesados de sedimentos en los ríos Changwang y Wuyuan en la isla de Hainan, China”, la contaminación por metales pesados puede representar una amenaza importante para los ecosistemas acuáticos, se evaluó recolectando muestras de sedimentos de los ríos Changwang y Wuyuan, utilizando, espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente para analizar las concentraciones de As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, y Zn, concluyendo, los resultados obtenidos indican que el río Changwang tiene altas concentraciones de Cr, Co, Ni, Cu y en el río Wuyuan elevadas concentraciones de As.

BHUYAN et al., (2023), en la investigación realizada “Contaminación por metales pesados en sedimentos del río Bharalu, Guwahati, Assam, India: un afluente del río Brahmaputra”, objetivo del estudio es evaluar los metales pesados en los sedimentos superficiales del río Bharalu, India. los índices de contaminación revelaron una contaminación de los sedimentos comparativamente mayor en los sitios aguas abajo que en los sitios aguas arriba, el análisis de matriz de correlación indicó orígenes tanto antropogénicos como naturales de los metales. Entre las fuentes antropogénicas, las descargas urbanas y el vertido de residuos podrían atribuirse principalmente a la contaminación por metales en los sedimentos de los ríos, aseverando que el Pb excedió las pautas de calidad de sedimentos en todos los sitios, lo que indica una amenaza potencial al ecosistema fluvial.

OKONKWO et al., (2023), en la investigación realizada “Fuente, evaluación de la contaminación y evaluación de riesgos de metales pesados en los sedimentos de los ríos alrededor del área de Olode SW, Nigeria” Para investigar la fuente, la contaminación y el riesgo de metales pesados como Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn y Cr, se tomaron doce muestras de sedimentos de corrientes y diez se recolectaron muestras de rocas de sitios mineros en Olode, el objetivo del presente estudio es determinar la fuente, el riesgo, su



distribución de metales pesados y el nivel de contaminación en los sedimentos de los arroyos. Los resultados a que llega los investigadores indican que estos elementos metálicos están liberándose al ambiente debido a la actividad minera. Asimismo, se observó un incremento de concentración de metales pesados en los sedimentos de los arroyos, Las rocas Pegmatitas encontradas muestran concentraciones significativas de Mn, Cr, Zn, Cu, Co y Pb, los cuales pueden ser fuentes de contaminación en el área de estudio. En conclusión, se determina que los principales responsables de los niveles elevados de contaminación son el Cu y el Ni, en el río Olode.

LIU et al., (2 023), en la investigación realizada “Distribución, evaluación de riesgos de metales pesados en sedimentos y su riesgo potencial para la seguridad del suministro de agua de un depósito de agua potable, China central”, se examinaron los niveles de metales pesados en los sedimentos de diferentes embalses con el objetivo de determinar el grado de contaminación y evaluar el posible riesgo para el suministro de agua, del río Jan Gian, los resultados revelan un incremento en las concentraciones de metales como el plomo (Pb), níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn), molibdeno (Mo) y cromo (Cr), los cuales representan una posibilidad de liberación hacia aguas circundantes lo que representa una amenaza para la seguridad de estas aguas.

YANG et al., (2 022), en la presente investigación “Fuentes potenciales de metales pesados en sedimentos de una cuenca urbana-agrícola y relación con el uso de la tierra mediante un enfoque estadístico”, el objetivo fue verificar los niveles de contaminación y concentración de metales pesados relacionando la calidad de sedimentos, carga contaminante, riesgo ecológico, mediante el análisis estadístico, con resultados de Pb, Zn, Cu, Cd y Hg en la parte media aguas arriba las concentraciones fueron sumamente altas en cuanto al As, Cr, y Ni en su mayoría de las zonas eran similares, en concreto en áreas urbanas la contaminación por metales pesados en los sedimentos sea de carácter antropogénica como efluentes residuales domesticas e industriales.

ÁVILA et al., (2 014) en su trabajo “Determinación de metales pesados en sedimentos superficiales costeros del Sistema Lago de Maracaibo, Venezuela”, respecto a Los sistemas acuáticos son el destino final de la mayoría de los desechos humanos, lo que genera una acumulación de metales pesados en los sedimentos. La concentración de estos metales suele ser de tres a cinco veces mayor que en el agua, ya que los sedimentos actúan como sumideros naturales. Estos metales pueden volver a la columna de agua debido a procesos naturales (corrientes, oleaje). Cuyo propósito va a identificar áreas costeras con concentraciones críticas de plomo, cromo, cadmio, níquel y vanadio en sedimentos



superficiales del sistema Lago de Maracaibo. También se evaluó la influencia de variables ambientales como pH, temperatura, oxígeno disuelto y salinidad sobre la distribución de lo. Se realizaron cuatro muestras en 28 estaciones del Lago de Maracaibo y la Bahía El Tablazo, a cubriendo épocas secas (agosto-septiembre, enero-febrero) y lluviosas (noviembre-diciembre, abril-mayo). Se midieron parámetros del agua con un multiparámetro y la transparencia con un disco de Secchi. Los sedimentos fueron recolectados con una draga tipo Ekman y analizados mediante espectrofotometría de absorción atómica. Los resultados muestran un análisis de componentes principales mostró que el 84,33% de la variabilidad de los datos se explica en dos factores: el primer grupo los metales (Cr, V, Ni y Pb) y el segundo los parámetros fisicoquímicos (pH, oxígeno, salinidad). Por último, los metales pesados representan una amenaza ecológica debido a su bioacumulación en la cadena trófica y su impacto.

MOHAMAD et al., (2016) investigó “un nuevo enfoque para la predicción de la contaminación por metales pesados basado en un sistema de inferencia neuro-difusa adaptativa y GIS en un ecosistema árido”. La contaminación del suelo por metales pesados en ecosistemas áridos representa un grave problema ambiental, debido a la lenta degradación de los contaminantes y su bioacumulación en la cadena trófica. Las principales fuentes de contaminación incluyen actividades industriales, agrícolas y urbanas, lo que requiere métodos avanzados para evaluar y predecir la distribución de metales pesados. El objetivo de estudio tiene como finalidad desarrollar un modelo de predicción de contaminación de metales pesados en suelos áridos, combinando un sistema de Inferencia Neuro-Difusa Adaptativa (ANFIS) y Sistemas de Información Geográfica (GIS). Se busca proporcionar un enfoque preciso y eficiente para la evaluación de riesgos ambientales. Se recopiló datos sobre metales pesados en suelos de un ecosistema árido. Se aplicó el modelo ANFIS, que combina inteligencia artificial y lógica difusa para modelar patrones complejos de contaminación integrando datos espaciales mediante GIS y visualizar la distribución geográfica de los contaminantes. También comparó la precisión del modelo con otros enfoques de aprendizaje automático. Los resultados, El modelo ANFIS-GIS logró la predicción de la contaminación por metales pesados en suelos áridos, identificando zonas de alta contaminación, principalmente cerca de áreas industriales y agrícolas. El modelo mostró rendimientos superiores en comparación con métodos tradicionales de predicción.

NEGRETE & CÁRDENAS, (2019), indican que la “estabilización de metales pesados (Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, As) por proceso de encalado en sedimentos procedentes del dragado de Caño Mosquito de la región de La Mojana-Colombia”, las actividades mineras,



agrícolas y la no adecuada disposición de residuos han generado contaminación por metales pesados en la región de La Mojana, Colombia. El dragado de cuerpos de agua es una estrategia común para recuperar ecosistemas acuáticos, pero puede movilizar contaminantes atrapados en los sedimentos, afectando suelos y fuentes de agua. Que tiene la finalidad de valorar la estabilización de metales pesados (Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, As) en sedimentos arrastrados mediante el proceso de encalado con dos tipos de cal (agrícola_dolomita e hidratada) para reducir su movilidad. Se recolectaron muestras de sedimentos en Caño Mosquito, Sucre, Colombia. Se analizaron sus características fisicoquímicas y concentraciones de metales pesados. Se realizaron ensayos de estabilización con diferentes dosis de cal y tiempos de tratamiento (30, 60 y 90 días). Finalmente, se evaluó la movilidad de los metales con pruebas de lixiviación TCLP antes y después del tratamiento. Los sedimentos presentaron un pH ácido (5,21) y altas concentraciones de Cr (92,3 mg/kg), Ni (34,9 mg/kg), Pb (7917,9 µg/kg), As (4922,5 µg/kg), Cd (669,4 µg/ kg) y Hg (117,0 µg/kg). El encalado elevó el pH y redujo la movilidad de Cd, Pb, Hg, Cr y Ni con una dosis de 100%-150% CRN. Sin embargo, no se logró inmovilizar el As de encalado es una estrategia eficiente para reducir la movilidad de Cd, Pb, Hg, Cr y Ni en sedimentos contaminados, pero no es adecuado para As. Se recomienda su implementación en la gestión de sedimentos arrastrados para minimizar riesgos ambientales y mejorar.

AGBASI y EGBUERI, (2 023), en su trabajo “Modelos computacionales inteligentes integrados para la predicción de elementos potencialmente tóxicos e indicadores de calidad de aguas subterráneas: un estudio de caso”. Donde el agua subterránea es una fuente esencial de agua potable, pero su calidad está amenazada por contaminantes tóxicos, incluyendo metales pesados”. En el sureste de Nigeria, donde pocos estudios han aplicado modelos de aprendizaje automático para predecir la contaminación del agua. Con el fin de aplicar y comparar modelos de regresión lineal múltiple (MLR) y redes neuronales artificiales (ANN) para predecir la presencia de elementos tóxicos (Cr, Fe, Ni, NO₃⁻, Pb, Zn) y evaluar la calidad del agua subterránea mediante índices de contaminación. Se recolectaron muestras de agua subterránea en Nigeria y se analizaron sus parámetros fisicoquímicos. Se calcularon el índice de contaminación del agua subterránea (PIG) y el índice de contaminación del agua (WPI). Estos parámetros fueron usados como insumos para los modelos ANN y MLR, cuya precisión predictiva fue comparada. El 30-35% de las muestras de agua no eran aptas para el consumo humano debido a niveles elevados de plomo (Pb). ANN mostró un desempeño superior al de MLR, con coeficientes de determinación entre $R^2 = 0,856$ y $1,000$, y menores errores de predicción. El plomo fue el contaminante más influyente en la degradación del agua



subterránea. Los modelos ANN y MLR demostraron ser herramientas efectivas para predecir contaminantes y mejorar la gestión del agua proporcionando información clave para la formulación de estrategias de mitigación.

AHN et al., (2020), en su trabajo de “especificación de metales pesados con modelo de predicción para la movilidad de metales pesados y evaluación de riesgos en suelos afectados por minas. actividades mineras generan contaminación severa en suelos y aguas subterráneas, afectando la salud humana y los ecosistemas. En Corea del Sur, existen más de 6000 minas abandonadas que presentan altos niveles de contaminación por metales pesados como arsénico (As) y zinc (Zn). Evaluar la movilidad de metales pesados en suelos contaminados en el proceso de la actividad minera y predecir su impacto en la salud humana mediante métodos de extracción secuencial y modelos de evaluación de riesgo. Se recolectaron muestras de suelo en minas de carbón y oro en Corea del Sur. Se aplicaron los métodos de extracción secuencial de Tessier y Wenzel para fraccionar los metales pesados y estimar su movilidad. Además, se realizaron pruebas de lixiviación y se calculó los índices de riesgo no cancerígeno (HI) y el cancerígeno (CR) para evaluar los efectos en la salud humana. El arsénico fue el metal con mayor movilidad y el principal responsable del riesgo cancerígeno en los suelos analizados. Los valores de CR para As oscilaron entre $1,38 \times 10^{-4}$ y $3,35 \times 10^{-3}$, mientras que la correlación entre la movilidad de As y Zn y los métodos de extracción mostró valores elevados ($R^2 = 0,920$ y $0,815$). Los suelos contaminados por actividades mineras representan una alta amenaza para la salud humana. Los modelos predictivos empleados en este estudio permiten evaluar con mayor precisión la movilidad de los metales pesados y facilitan la toma de decisiones para la remediación de suelos contaminados.

BHAGAT et al., (2021), en su trabajo de “Predicción de sedimentos de metales pesados en las bahías australianas utilizando modelos híbridos de inteligencia artificial recientemente desarrollados”. Indica que la contaminación por metales pesados en sedimentos marinos es una preocupación ambiental debido a sus efectos tóxicos en los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Predecir las concentraciones de estos metales es crucial para la gestión y mitigación de la contaminación. Con el fin de desarrollar modelos híbridos de inteligencia artificial para predecir la concentración de plomo (Pb) en sedimentos de las bahías de Bramble (BB) y Deception (DB) en Australia. En la metodología, se empleó el algoritmo de selección de características XGBoost para identificar los parámetros de entrada relevantes para la predicción de Pb, comparándolo con otros métodos como el análisis de componentes principales (PCA), la eliminación recursiva de características (RFE) y el algoritmo genético (GA). Posteriormente, se



desarrolló un modelo XGBoost optimizado mediante una estrategia de búsqueda en cuadrícula (Grid-XGBoost) y se validó frente a modelos de inteligencia artificial comunes, como la red neuronal artificial (ANN) y la máquina de vectores de soporte (SVM). En la estación BB, los valores de error porcentual absoluto medio (MAPE) fueron 0,06 para XGBoost–SVM, 0,32 para XGBoost–ANN, 0,34 para XGBoost–Grid-XGBoost y 0,33 para Grid-XGBoost. En la estación DB, los valores de MAPE más bajos fueron 0,25 para XGBoost–Grid-XGBoost y 0,24 para Grid-XGBoost. Concluyendo los modelos híbridos de inteligencia artificial propuestos demostraron ser herramientas confiables y robustas para la predicción de plomo en sedimentos, contribuyendo significativamente al monitoreo y evaluación de la contaminación ambiental. Se destacan la eficacia de los algoritmos de inteligencia artificial en la predicción de contaminantes ambientales, ofreciendo herramientas valiosas para la gestión y mitigación de la contaminación por metales pesados.

XIA et al., (2 021) Predicción de la contaminación por metales pesados utilizando un modelo de conjuntos: estudio de caso de la sedimentación de la bahía, centrada en la contaminación por metales en sedimentos de un sistema fluvial urbano, tomando en cuenta la importancia de la evaluación de riesgos. Evaluar las fuentes de contaminación y su riesgo ecológico asociado. Se recogieron muestras de sedimento y se aplicó el modelo de Positive Matrix Factorización para la atribución de fuentes y evaluación de riesgos. Se identificaron tres fuentes de metales, destacando que el cadmio y el cobre presentaban los mayores riesgos ecológicos. La incertidumbre en la evaluación de riesgos fue significativa, resaltando la necesidad de un monitoreo continuo.

EDWARD et al., (2 021) realizaron un estudio sobre la predicción del transporte de sedimentos en ríos utilizando modelos de inteligencia artificial. El objetivo fue evaluar y comparar diferentes enfoques de modelado para mejorar la precisión de las predicciones en sistemas fluviales. La metodología incluyó una revisión de modelos como redes neuronales artificiales (ANN), máquinas de soporte vectorial (SVM) y sistemas neurodifusos adaptativos (ANFIS). Los resultados mostraron que los modelos híbridos superaron a los tradicionales en términos de precisión y robustez. Se concluyó que la inteligencia artificial es una herramienta eficaz para modelar procesos de sedimentación en ríos, proporcionando una base para futuras investigaciones en hidrología computacional.

TAO et al., (2 021), realizaron un estudio sobre la “predicción del transporte de sedimentos en ríos utilizando modelos de inteligencia artificial”. El objetivo fue evaluar



y comparar diferentes enfoques de modelado para mejorar la precisión de las predicciones en sistemas fluviales. La metodología incluyó una revisión de modelos como redes neuronales artificiales (ANN), máquinas de soporte vectorial (SVM) y sistemas neurodifusos adaptativos (ANFIS). Los resultados indican que los modelos híbridos superaron a los tradicionales en términos de precisión y robustez. Se concluyó que la inteligencia artificial es la técnica eficaz que modela procesos de sedimentación en ríos, proporcionando una base para futuras investigaciones en hidrología computacional.

ZHONG et al., (2015), realizaron “un estudio sobre la contaminación por metales pesados en aguas subterráneas y sedimentos de un área agrícola del noreste de China”. El objetivo fue evaluar los riesgos ecológicos y predecir la migración del arsénico (As) utilizando el modelo Groundwater Modeling System (GMS). Se tomaron 33 muestras de agua subterránea y 12 de sedimentos, analizando la presencia de Cr (VI), Cd, As y Pb. Los resultados indicaron altos niveles de Cd en los sedimentos y contaminación por Pb en algunos sitios de agua subterránea. El índice de contaminación de Nemerow mostró que solo una estación alcanzó niveles de contaminación significativa. La modelación, permitió predecir si el Arsénico migrará río abajo en la siguiente década. Concluyendo, los metales pesados en sedimentos son una fuente importante de contaminación secundaria del agua subterránea, afectando la seguridad ambiental y la salud pública.

b) Nacional

MACO-GARCÍA y SANDOVAL, (2015), muestran en su trabajo de investigación “presencia de mercurio en el agua y sedimento de fondo en el río Nanay, Perú”, que tiene el objetivo determinar los contaminantes existentes en el río Nanay. Lo cual, concluye que el afluente izquierdo del río Amazonas muestra un aumento notable en las concentraciones, que pasan de menos de 20 mg/l en el año 2000 a 120 mg/l en la actualidad. Estos valores indican puntos con concentraciones elevadas que alcanzan los límites máximos permisibles para aguas destinadas a zonas de pesca de mariscos bivalvos (Tipo V) y áreas de conservación de fauna acuática y pesca variada o comercial (Tipo VI), según la normativa peruana. Por otro lado, los sedimentos de las capas más profundas presentan concentraciones de mercurio que oscilan entre 0,005 y 0,0815 mg/g, valores que se mantienen por debajo de los límites máximos permitidos establecidos por la normativa vigente. Las fuentes de mercurio en el agua provienen en parte de estos sedimentos del fondo del río, especialmente debido a la remoción generada por la extracción de oro aluvial.



QUISPE YANA et al., (2019), en su investigación “concentración de metales pesados: Cromo, Cadmio y Plomo en los sedimentos superficiales en el río Coata, Perú“, tiene como objetivo determinar los metales pesados: Cr, Cd, y Pb, en los sedimentos superficiales de la cuenca baja del río Coata, evaluando la contaminación de los cuerpos de agua, sedimentos y otros componentes el 2017, en las avenidas y en estiaje, con cinco puntos estratégicos con resultados de concentraciones mínimo y máximo hallado fue de 4,10 mg/kg Cr, 0,10 mg/kg Cd, y 3,75 mg/kg Pb, y 28,42 mg/kg Cr, 0,70 mg/kg Cd, y 16,50 mg/kg Pb, respectivamente y hallar más valores mínimos que superan los estándares mínimos aceptables establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental para Suelo del Ministerio del Ambiente del Perú. En la región Apurímac, de las posibles causas de la contaminación identificada se atribuye principalmente a la actividad humana, la cual afecta significativamente las aguas residuales en la ciudad de Juliaca, Perú.

c) Regional

CORREA CUBA et al., (2020), propone la "Determinación de metales pesados por fluorescencia de rayos X en sedimentos acuáticos en la microcuenca del río Huancaray, Apurímac - Perú, para periodos de estiaje y lluvias", con el objetivo principal de este estudio es determinar los niveles de concentración de metales pesados en los sedimentos del agua en la microcuenca del río Huancaray y sus fuentes, utilizando la técnica de análisis por Fluorescencia de Rayos X. Para las variaciones de metales pesados en los sedimentos se llevará a cabo en épocas de baja y alta fluencia de lluvias. Las elevadas concentraciones de metales pesados en las cuencas hídricas se han convertido en alto riesgo para la salud humana, se recogieron muestras de sedimentos de 05 puntos con una profundidad promedio de 15 cm el resultado es el siguiente K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb y Ba, las concentraciones superan los límites máximos permitidos en la zona media atribuidas a fuentes antropogénicas y en las zonas altas es significativa debido a efectos naturales.

3.2 Marco teórico

3.2.1 Definición de contaminación

La contaminación se define como la introducción de sustancias o agentes contaminantes en el medio ambiente, que causan efectos adversos en la salud humana, los ecosistemas o la calidad de los recursos naturales (UNEP, 2019). La contaminación, es una acción con consecuencias contaminantes; es decir, afectan nocivamente las condiciones normales de la materia o el medio, por



agentes físicos o químicos. Una sustancia que aparece en el ambiente es contaminante como resultado de la actividad humana y con efecto nocivo sobre el entorno (RAE y ASALE 2016).

3.2.1.1 Tipos de contaminación e impacto ambiental.

La contaminación surge de ciertas características, fuentes naturales o de diferentes procesos productivos antropogénicos que forman parte de las actividades de la vida diaria, a través de agentes biológicos generadores de: aguas servidas, residuos sólidos, contaminantes físicos (radioactividad calor), ruido, polvos, sedimentos de relaves, contaminantes químicos, compuestos de minerales entre otros, de los cuales, tenemos cuatro tipos de contaminación ambiental (UNEP, 2019):

- a) Aire: Emisiones de gases y partículas que afectan la salud humana y el clima.
- b) Agua: Contaminantes que afectan ríos, lagos y océanos, perjudicando ecosistemas acuáticos.
- c) Suelo: Sustancias tóxicas que afectan la calidad del suelo y la agricultura.
- d) Sonido: Ruido excesivo que puede causar problemas de salud y bienestar.

3.2.1.2 Causas y Fuentes contaminantes

Es un hecho indiscutible que a nivel mundial la contaminación ambiental es inminente y las principales fuentes de contaminación provienen de actividades industriales como el procesamiento de minerales, la galvanoplastia, la manufactura metálica y la combustión de combustibles fósiles. En particular, la minería, a través del tratamiento de minerales con contenido de zinc y plomo, representa un aporte significativo a la carga de metales pesados en el ambiente fluvial, lo que evidencia el impacto directo de esta actividad y de sus derivados industriales en la calidad ambiental (Cui et al. 2019).



La creciente demanda de recursos primarios, principalmente energéticos y minerales, basada en combustibles fósiles y energía nuclear, intensifica los problemas ambientales al aumentar las emisiones contaminantes y de efecto invernadero. Así mismo, el procesamiento de minerales con insumos como colectores, reguladores de pH, espumantes y cianuro, sin control ni monitoreo adecuado, genera contaminación irreversible en los ecosistemas, son (Sojka y Jaskuła 2022):

- a) Agrícolas: Uso de pesticidas y fertilizantes que contienen metales pesados.
- b) Urbanas: Desechos de vehículos, emisiones industriales y desechos electrónicos.
- c) Industriales: Procesos manufactura y reciclaje como también de la minería y relaves.

La minería y relaves, presentan características y riesgos ambientales particulares, según sus tipos son (Osore Plenge, Rojas Jaimes y Manrique Lara Estrada 2012):

- **La minería formal**, es aquella que se ejerce dentro del marco legal peruano, contando con autorización para exploración y explotación (concesiones vigentes), cumplimiento de requisitos ambientales, administrativos, técnicos y sociales, y que contribuye al Estado mediante el pago de impuestos, uso regulado del agua y certificación adecuada del proceso productivo. Se considera parte de la actividad minera regulada y vigente.

- **La minería informal** (artesanal o de pequeña escala en proceso de formalización), destacada por operar en zonas permitidas y haber iniciado el proceso de formalización (registro en REINFO conforme al Decreto Legislativo N° 1105), pero aún no cumple totalmente con la normativa reglamentaria (títulos, permisos ambientales, uso de maquinaria autorizada, etc.). Esta actividad no es criminal, puede regularizarse y no se considera minería ilegal.

- **Minería ilegal (complemento)**, se observa, mientras que la minería informal puede formalizarse, la minería ilegal opera fuera de la ley: en zonas prohibidas (áreas de cuencas, ANP, riberas), sin concesiones ni permisos, y utilizando maquinarias prohibidas o insumos nocivos como mercurio o dragas. Esa actividad es sancionable penalmente.

3.2.1.3. Consecuencias de la contaminación del ambiente

De acuerdo a las investigaciones realizadas en la Salud Geo ambiental, se determinan datos importantes respecto a los diversos factores de riesgo existentes en nuestro entorno. Factores de origen físico, geofísico, biológico y químico que terminan generando detrimento del medio ambiente, (BESSER et al., 2009).

3.2.1.4 Medidas de solución de la contaminación del medio ambiente

ALFAYETE BLANCO et al., (2004), la proporción o cantidad de contaminantes que se distribuyen entre las distintas fases de la biosfera como el aire, el agua y el suelo, depende en gran medida del tipo de contaminante y de las interacciones entre estos medios (aire-agua, suelo-agua, suelo-aire). Es importante destacar que los problemas de contaminación no siempre permanecen localizados; en muchos casos, pueden propagarse más allá del lugar donde se originaron. Este mismo fenómeno, conocido como contaminación transfronteriza, es muy relevante en el caso de los contaminantes atmosféricos. De hecho, se han registrado situaciones en las que un evento contaminante ocurrido en un punto específico fue detectado a gran distancia y a poco tiempo después de producirse. Un ejemplo claro es el accidente nuclear de Chernóbil, donde la radiactividad se identificó en la península escandinava antes de que las autoridades soviéticas hicieran público el incidente, por los niveles inusualmente altos de radiación presentes en la atmósfera de esa región.

3.2.1.5 Los Metales pesados

El agua está formada por mares y océanos, los cuales circulan por las cuencas y arrastran múltiples contaminantes, que se acumulan por generaciones en los sedimentos siendo la contaminación por metales



pesados (Pb, Zn, Cu y Cr) los más altos en toxicidad, en los recursos de sedimentos fluviales se puede catalogar una como gran amenaza para el ecosistema y la salud humana por medio de la red trófica. Los índices con concentraciones de Cd, As, Cu, Cr, Pb, Sb, Zn y Ni etc. en aguas superficiales en grandes cantidades de sólidos son alarmantes. (SAIFUL ISLAM et al., 2018; ÁVILA et al., 2014). Asimismo, se tiene algunos metales según la normativa peruana consideradas por sus efectos como sigue (INGEMMET, 2022):

1. El Plomo (Pb), que afecta el desarrollo neurológico.
2. Mercurio (Hg), que tiene efectos neurológicos graves.
3. Cadmio (Cd), con efectos de toxicidad renal y ósea.
4. Arsénico (As), con efectos cancerígenos y problemas en la piel.
5. Cromo (Cr), con efectos de irritaciones y cancerígenos.
6. Bario (Ba), que genera problemas gastrointestinales (náuseas, vómitos) y efectos en el sistema nervioso (debilidad muscular, temblores), como alteraciones en la presión arterial.

3.2.1.6 Características de los metales pesados

Toxicidad: El derrame de mercurio en Choropampa (2000) evidenció la alta toxicidad de este metal, ya que su exposición provocó problemas neurológicos, renales y digestivos en la población, además de contaminar suelos y viviendas. A pesar de la recuperación parcial del material, la persistencia del mercurio mostró los riesgos de su bioacumulación y la necesidad de un control más estricto en su transporte y manejo. (Rodríguez Morante et al. 2023).

Mineralización: En el ámbito de la geología minera, y bajo las investigaciones del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), órgano técnico adscrito al Ministerio de Energía y Minas (MINEM), se entiende por mineralización al depósito natural de minerales económicamente valiosos —usualmente metales o elementos industriales— concentrados en formaciones geológicas específicas (como vetas, mantos o filones), generando cuerpos de mena explotables (RODRÍGUEZ Morante et al. 2023; MINEM 2018).



3.2.1.7 Normativas ambientales y estándares de calidad

Es fundamental que las industrias y actividades mineras cumplan normativas para proteger la salud de la población y el medio ambiente. La supervisión y el monitoreo son esenciales para asegurar el cumplimiento de las regulaciones establecidas, así tenemos:

- **Ley General del Ambiente (Ley N° 28611):** Establece principios para la gestión de sustancias químicas y metales pesados (MINAM 2013).
- **Límites máximos permisibles (LMP).** La ley General del Ambiente Ley N° 28661, del 15 octubre 2005, Artículo 32, índice 32.1. Del Límite Máximo Permissible - LMP, lo conceptualiza como la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente (MINAM 2013).

Según la Normas Técnicas Peruanas (NTP): Establecen límites permisibles para la concentración de metales pesados en agua, suelo y alimentos (MINAM 2024).

- **Estándares de Calidad Ambiental (ECA),** son medidas ambientales expresadas como la concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el aire, agua, suelo o sedimentos, que no representan riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente (MINEM 2018).

3.2.2 Sedimentos superficiales a mediano plazo en el río

3.2.2.1 Definición y rol de los sedimentos superficiales

Los sistemas acuáticos son el depósito final de la mayoría de las sustancias desechadas por el hombre, donde con el tiempo la actividad biológica favorece la descomposición de los compuestos orgánicos a dióxido de carbono y agua como producto final, mientras que las especies inorgánicas, especialmente los metales, son acumulados en los sedimentos superficiales o en los organismos (ÁVILA et al., 2014).



3.2.2.2 Factores y condiciones de acumulación de sedimentos

Acumulación de sedimentos, son focos de contaminación al acumular depósitos polimetálicos de hierro, plomo, zinc y cobre, originados por reemplazo en rocas sedimentarias e intrusiones ígneas. Estos procesos generan minerales de sulfuro con alta toxicidad, que se concentran en zonas cercanas a intrusiones (cobre u oro) o más distales (plomo, zinc o plata), favoreciendo la acumulación de contaminantes en el ambiente por la variación espacial entre estaciones y generando tendencias de acumulación según su dinámica temporal (RODRÍGUEZ MORANTE et al. 2023).

Condiciones fisicoquímicas del sedimento, las condiciones físico-químicas en los sedimentos incluyen variables como pH, temperatura, salinidad, potencial de reducción de óxido, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, textura (tamaño y clasificación de partículas) y densidad aparente. Estas condiciones determinan la movilidad, retención y disponibilidad de contaminantes en los sedimentos, así como su capacidad de adsorción y riesgos ambientales (JIMÉNEZ LOPEZ et al. 2012).

3.2.2.3 Técnica de muestreo de laboratorio

Las técnicas permiten la cuantificación precisa de las concentraciones de metales pesados y su distribución espacial (HERRERA-NÚÑEZ et al., 2013), así tenemos lo siguiente:

1. **Técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)**. De acuerdo con la norma ASTM D8110-17, la ICP-MS es un método analítico estándar para la determinación de elementos en productos destilados mediante. Se nebuliza la muestra líquida para generar un aerosol que se ioniza en un plasma de argón (~8 000 – 10 000 K), separando posteriormente los iones según su relación masa-carga (m/z) en un espectrómetro de masas, y cuantificándolos con alta sensibilidad y precisión (< ppm). En general, el método ICP-MS en norma ASTM se emplea para el análisis multielemental trazable desde concentraciones en el rango de



trazas ($\mu\text{g/L}$, ppm) hasta niveles mayores, con aplicación en control de calidad, medio ambiente, forense, agroalimentario, industria petrolera, entre otros. (YONGO et al., 2023).

2. **Espectrometría de absorción atómica (AAS)**, la espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) (CORREA CUBA et al., 2020).

3.2.2.4 Métodos predictivos a mediano plazo

3.2.2.4.1 Lenguaje de programación

El un sistema **formal** que permite expresar algoritmos para que una computadora los ejecute, funcionando como puente entre humano y máquina, con distintos niveles (bajo y alto) y paradigmas de programación (SEBESTA 2019), como es:

El Python, es un lenguaje de programación de alto nivel, interpretado, multiparadigma y de sintaxis clara, diseñado para ser productivo y mantenible. Gracias a su amplia comunidad y bibliotecas, se utiliza en desarrollo web, automatización, análisis de datos, inteligencia artificial y ciencia (PYTHON 2025).

La inteligencia artificial (IA), es una rama de la informática que estudia y desarrolla sistemas capaces de realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana, como el razonamiento, aprendizaje, percepción, comprensión del lenguaje natural y toma de decisiones. Los sistemas de IA utilizan algoritmos y modelos matemáticos para simular capacidades cognitivas humanas en distintos niveles, desde simples reglas automatizadas hasta redes neuronales profundas (RUSSELL Y NORVIG 2020).

3.2.2.4.2 Algoritmos de aprendizaje

Los algoritmos de aprendizaje son métodos computacionales que permiten a un sistema aprender patrones, relaciones o comportamientos a partir de datos.



Estos algoritmos ajustan sus parámetros internos en función de ejemplos o experiencias previas, con el objetivo de realizar predicciones, clasificaciones o decisiones automáticas sin ser programados explícitamente para cada tarea específica.

Se clasifican comúnmente en tres categorías (RUSSELL Y NORVIG 2020):

- a. Aprendizaje supervisado (ej.: regresión, redes neuronales, SVM)
- b. Aprendizaje no supervisado (ej.: clustering, reducción de dimensionalidad)
- c. Aprendizaje por refuerzo (ej.: agentes que aprenden por prueba y error)

3.2.2.4.3 Algoritmos de predicción aplicados para la gestión ambiental

Bagging o "Bootstrap Aggregating, es un método que incrementa la precisión de los modelos al generar varios modelos entrenados sobre subconjuntos aleatorios del conjunto de datos y combinar sus predicciones mediante promedios. Esta técnica ayuda a disminuir la varianza y a evitar el sobreajuste. Además, ajusta los pesos en la capa de salida, lo que permite una mejor generalización en tareas de predicción. Su procesamiento es rápido en tiempo real y puede implementarse utilizando herramientas como Weka o lenguajes como Python. (BASKIN et al., 2017).

Extreme Gradient Boosting (XGBoost), es un algoritmo que construye múltiples árboles de decisión de forma secuencial utilizando la técnica de boosting. Asimismo, cada árbol nuevo se enfoca en corregir los errores cometidos por los anteriores. Este enfoque permite mejorar progresivamente el rendimiento del modelo, es especialmente eficaz al trabajar con grandes volúmenes de

datos y puede manejar variables de distintos tipos de manera eficiente. (HASROD, NUAPIA y TUTU, 2024).

Voting Regreso, es un modelo que combina múltiples regresores individuales para generar una única predicción más precisa. Al integrar los resultados de diferentes modelos, mejora la capacidad de generalización y reduce los errores asociados a un solo algoritmo, optimizando así la precisión en las tareas de regresión. (EN-NAGRE et al., 2024).

3.2.2.4.4 La predicción

El uso de aprendizaje automático permite clasificar, detectar o predecir mediante métodos y modelos de algoritmos, a largo, mediano y/o corto plazo, respecto a la contaminación ambiental que puede generar los metales pesados alojados en los sedimentos superficiales (RUSSELL Y NORVIG 2020).

3.3 Marco conceptual

- 3.3.1. **Metales Pesados:** Son elementos químicos situados en la naturaleza, tienen una estructura atómica y composición específica alta, conformados por procesos que tienen características que los clasifican por su estructura, composición química y sus propiedades físicas (IJC, 1999).
- 3.3.2. **Calidad de impacto ambiental:** Cuantificación de la contaminación como resultado del efecto de la acción de contaminar o la alterar nocivamente de la pureza de condiciones normales de un medio, por elementos químicos o físicos (IJC, 1999).
- 3.3.3. **Los sedimentos superficiales:** Son un cúmulo de partículas sólidas alojadas en las zonas cercanas a los ríos, mares entre otros (IJC, 1999).
- 3.3.4. **Sub cuenca:** Una cuenca hidrográfica es el espacio geográfico delimitado por divisoria de agua, donde las precipitaciones escurren hacia un único punto de salida, como un río principal, siendo la unidad básica para la gestión integrada del agua en el país (ACUAFONDO et al., 2023).



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1. **Ámbito de estudio**

El río Antabamba, ubicado en la región de Apurímac, Perú, recorre una subcuenca con una geografía diversa que abarca múltiples zonas con características ambientales diferenciadas. Estas condiciones son influenciadas tanto por procesos naturales como por actividades de origen antrópico que ocurren a lo largo de ambas márgenes del río. (OEFA, 2 021; SIAR, 2 021).

4.2 **Tipo y nivel de investigación**

Según, HERNÁNDEZ-SAMPIERI y MENDOZA (2 018), esta investigación es de tipo aplicada, por tener el propósito de generar conocimientos que aporten a resolver problemas específicos, de la contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba.

El nivel de la investigación es correlacional, ya que busca identificar y analizar las relaciones entre la concentración de metales pesados, factores fisicoquímicos, y su alineación con los estándares de calidad ambiental. Según Reyes & Sánchez (2002), este nivel permite establecer la magnitud y dirección de las relaciones entre variables, sin implicar causalidad directa. Por lo que, se realiza la manipulación directa o indirecta de los metales pesados sobresalientes, de los hechos en la realidad llegando a ser retrospectivo y longitudinal.

4.3 **Diseño de investigación**

El diseño de investigación según (HERNÁNDEZ et al., 2 015), y (REYES & SÁNCHEZ, 2002), es cuasiexperimental con una orientación transversal y longitudinal. Por lo cual, se desarrolla la fase transversal que involucra la recolección de datos en dos periodos estacionales en época de lluvias y época de secas, mediante 28 muestras. Utilizando 14 estaciones de muestreo estratégicamente seleccionadas

en diferentes puntos de la subcuenca del río Antabamba. La fase longitudinal en Python.

Así mismo, la fase longitudinal aplica modelos de pronóstico se realiza aplicando las herramientas de Python para proyectar la evolución de la contaminación por metales pesados a mediano plazo (hasta 3 años). Este enfoque permitirá prever tendencias futuras en la concentración de metales pesados y otros factores fisicoquímicos influyentes para describir variables y analizar incidencias e interpretación en un momento dado. Es decir, captar una fotografía o suceso en un momento dado.

4.3 Ética de la investigación

Esta investigación se llevará a cabo respetando estrictamente las normas éticas, garantizando la integridad de los datos y el respeto al medio ambiente. Se minimizará cualquier impacto negativo en las áreas de muestreo, y se promoverá la transparencia y la responsabilidad en la divulgación de los resultados para el beneficio de la comunidad y el ecosistema. Por lo tanto, se garantiza la calidad de la información, para tener mayor precisión, con el uso de instrumentos idóneos.

4.4 Población y muestra

4.4.1 Población

La población son todos los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba desde su nacimiento hasta la unión con la subcuenca Chalhuanca y formación del río Pachachaca.

4.4.2 Muestra

La muestra representativa de los sedimentos superficiales en la subcuenca del río Antabamba para el presente estudio, se definieron 14 estaciones de muestreo seleccionados estratégicamente, desde el puente Huancaray como inicio de toma de muestras y secuencialmente hasta el puente Pichihua que es la zona



final de toma de muestras las cuales han sido encapsuladas en depósitos debidamente desinfectados y posterior secado como se observa en la Figura 5.

Las estaciones de muestreo se seleccionaron considerando la diversidad



Figura 5 — Muestras de Sedimentos Superficiales del río Antabamba

geográfica y geológica (Zonas cercanas a proyectos mineros y la diversidad de labores existentes en ambas márgenes), factores estacionales y accesibilidad para recolectar las muestras, tomados en la subcuenca del río Antabamba, con el fin de capturar la variabilidad espacial y temporal en las concentraciones de sedimentos. Desde la estación :1 del Puente Huancaray, se tomó como punto de referencia para iniciar la recopilación y cuarteo de muestras de sedimentos tomando en cuenta que es la zona principal e importante de inicio de explotación del recurso mineral tanto como minerales sulfurados de cobre y minerales oxidados de oro los cuales son visualizados en ambas márgenes a lo largo de la zona de estudio situados en las zonas de Pachaconas, Ayahuay y Tapayrihua principalmente y finalizando como estación final de muestreo el Puente Pichirhua, estación :14, en la zona de estudio que tiene una longitud del río de 25 kilómetros. Ver la Figura 6. El muestreo de sedimentos superficiales para el análisis de concentraciones de metales pesados se tomó, en la subcuenca del río Antabamba. Se dividió en estratos basados en la proximidad a fuentes de contaminación, características del flujo del río y variabilidad estacional. Seleccionando, al menos una estación de muestra en cada estrato o estación, representa una zona relevante del río asegurando que todas las zonas relevantes estén representadas en la muestra con fuentes de contaminación.



Así mismo, se consideró los factores estacionales de época de lluvias y secas, y la accesibilidad para el recojo de muestras, que permita la captura variable espacial y temporal en la concentración de metales pesados.

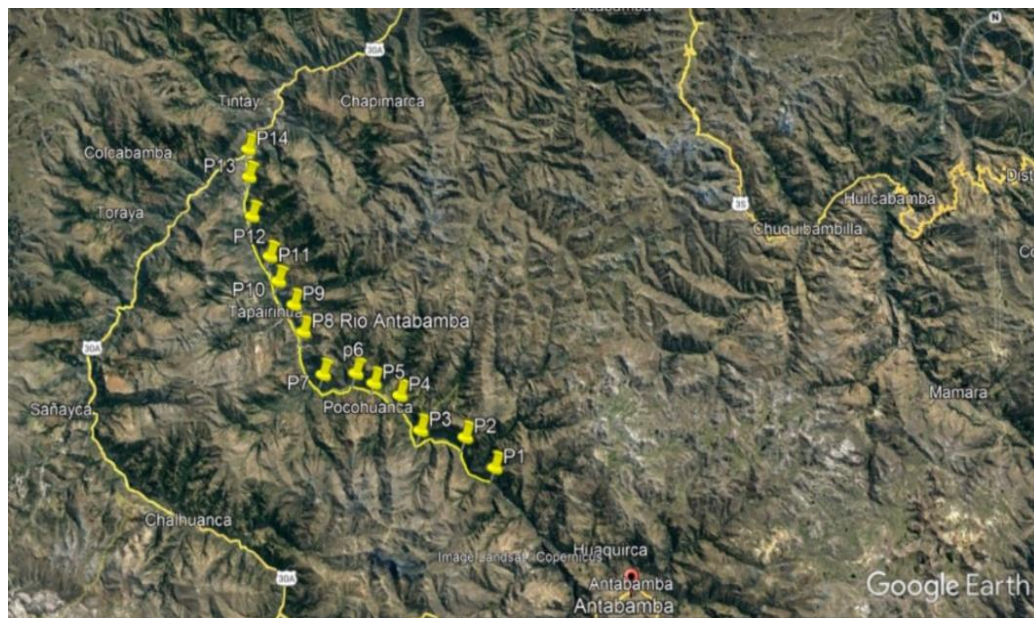


Figura 6 — Estaciones de muestreo en la subcuenca del río Antabamba

La Figura 6, muestra los 14 puntos de extracción de muestras, que se visualiza en la Tabla 4. Las estación de muestreo son los puntos donde se tomaron las muestras en Coordenadas UTM, con GPS de doble frecuencia, V90 GNSS RTK. Así mismo, Se recolecto muestras en épocas de secas y época de estío. Ver la Tabla 4, Figura 7 y Anexo VII.

Tabla 4 — Coordenadas UTM de estaciones de muestreo

Estación	Zona	Muestreo coordenadas UTM		Muestra por Épocas	
		Este	Norte	Secas	Estío
P1	18 L	716946.1	8420137.7	1	1
P2	18 L	710403.9	8433104.0	1	1
P3	18 L	710451.7	8423760.1	1	1
P4	18 L	708773.6	8426855.7	1	1
P5	18 L	706486.3	8428067.0	1	1
P6	18 L	704837.6	8429058.2	1	1

P7	18 L	701827.1	8429161.8	1	1
P8	18 L	700186.5	8432969.8	1	1
P9	18 L	699431.0	8435405.5	1	1
P10	18 L	698075.4	8437567.8	1	1
P11	18 L	697370.1	8439826.6	1	1
P12	18 L	695831.8	8443539.8	1	1
P13	18 L	695700.6	8447082.0	1	1
P14	18 L	695739.0	8449576.8	1	1



Figura 7 — Recolección de muestras de sedimentos superficiales

4.4.3. Materiales e instrumentos

Tabla 5 — Materiales y métodos por actividades

Actividades	Materiales y Equipos	Métodos
Recolección de muestras de Sedimentos	Baldes, Frascos de polietileno y Pyrex, Probetas y otros. GPS, Balanza digital, y Malla N°20.	Muestreo estratificado en 14 estaciones
Análisis de Sedimentos Superficiales	Espectrofotómetro de masas con plasma acoplado por inductividad (ICP-MS). Normas Method 3051 y 6020A. -Multiparámetro.	Concentraciones de MP en laboratorio. Análisis - Normativa: ECAs
Predicción	-Laptop: Bases de datos con parámetros de ECAs, Software especializado (Python), algoritmos de aprendizaje automático, Herramientas de visualización y Técnicas de validación	Procesamiento y limpieza de datos Entrenamiento y validación de modelos. Predicción de ECAs durante un mediano plazo. Evaluación del rendimiento.

4.5 Procedimiento

Para determinar la contaminación de sedimentos superficiales por metales pesados del río Antabamba en un período de mediano plazo, se realizó lo siguiente:

Paso 1: se realizó una revisión bibliográfica en revistas indexadas con artículos que destacan los temas de investigación, entre otras fuentes que sirvieron para determinar el enfoque y contextualización del tema en estudio.

Así mismo, se realizó la zonificación para obtener las muestras de sedimentos superficiales, análisis de muestras, selección de los factores fisicoquímicos importantes, análisis de las concentraciones de los factores fisicoquímicos.

Paso 2: Se comparo las concentraciones metales pesados de los sedimentos superficiales con estándares de calidad ambiental según, ECA-SUELO – D.S 011-

2017 – MINAM, y con diferentes programas de control y aseguramiento de la calidad del laboratorio de investigación y servicios con equipos espectroscópicos para la determinación de estructuras químicas (EC-0005-2017-UNAS), que consiste en las recomendaciones de publicaciones internacionales, oficiales y estandarizadas tales como Standard Methods y Usepa, para determinar los Límites Máximos Permisibles (LMPs) de concentraciones de metales pesados.

El cumplimiento de estándares de calidad ambiental (ECA) de los metales pesados para el agro y otros usos, se hará la comparación según lo especificado en el Decreto Supremo 004-2017-MINAM, Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, E2 Ríos Costa y Sierra, D.S. 031-2010-SA, Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.

Paso 3. Con datos procesados de la contaminación ambiental real, se entrenan con algoritmos de aprendizaje automático para predecir resultados de contaminación a largo plazo. Para el cual se parte del cumplimiento de los estándares de calidad ambiental de suelo y de los Límites Máximos Permisibles reales, que contaminan el medio ambiente de la subcuenca del río Antabamba en un periodo de mediano plazo mediante la predicción del comportamiento por meses en 3 años. Ver la Figura 8 y Anexo V.

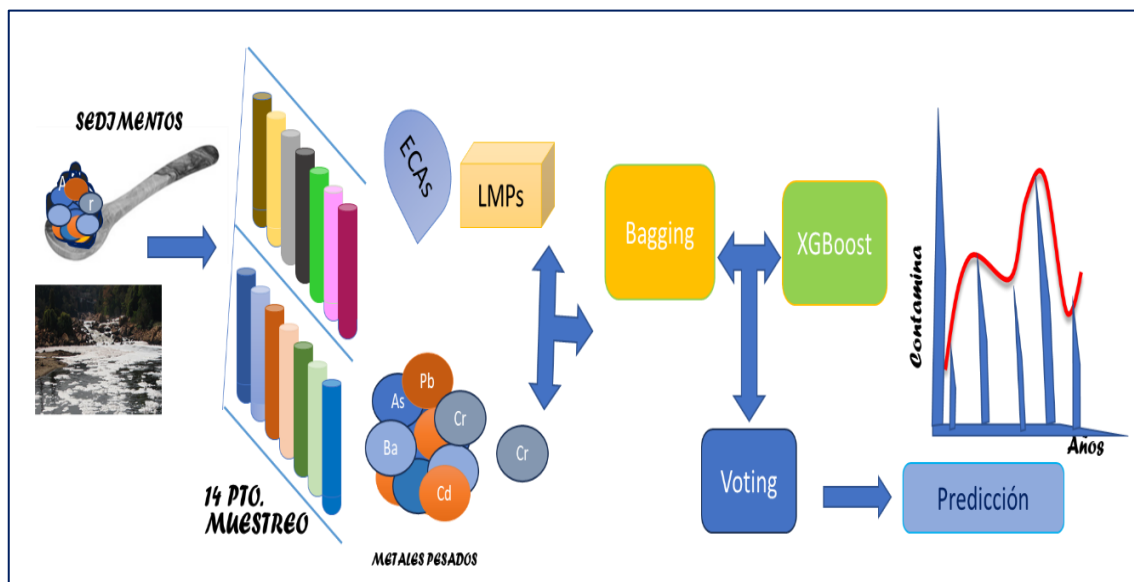


Figura 8 — Flujo de pasos del procedimiento

4.6 Técnicas e instrumentos

Se utilizaron herramientas de software: Windows 10, Office, Python, Visual data analítica, Google Earth, el muestreo de los sedimentos se realizó en dos etapas en época de estío y avenida cada una muestreada con 14 puntos y en cada punto se sacaron cuatro muestras aleatorias a una profundidad de 30 centímetros las cuales se tamizaron y su respectivo cuarteo a un kilo de muestra a malla 20 las zonas de muestreo han sido debidamente georreferenciadas.

Las muestras recolectadas de sedimentos se almacenaron en botellas herméticas posterior a ello estas muestras se secaron al aire y se protegieron de la luz por una semana, luego secas se tamizaron y se embolsaron con cierre hermético y se envió al laboratorio para los análisis respectivos de concentración de metales pesados, los métodos se observan en la Tabla 5. El equipo utilizado es el espectrómetro con plasma acoplado inductivamente.

Tabla 6 — Métodos analíticos de concentración de metales y parámetros fisicoquímicos en muestras de sedimentos.

Método	Elemento	Unid.	Descripción
Se recogieron varias muestras equidistantes, de un promedio 5 hoyos, hasta una profundidad de 30cm el punto principal georreferenciado con GPS.	Sedimento	Kg	La muestra principal es secada en ambiente seco luego cuarteado con el cuarteador Jones hasta 1 kg de muestra, y embolsado para su posterior análisis.
Recolección en envases plástico de un litro, el punto principal fue georreferenciado con GPS.	Agua	Litros	Se tomo varias muestras de diferentes sitios se llenó en un envase de 18 litros, para su posterior análisis fisicoquímico.
Medida directa con equipos calibrados: multiparámetro Hanna, turbidímetro y para la medición del caudal del río	Fisicoquímicos	mg/L	Caudal, Turbidez, pH, Salinidad, Sólidos totales en suspensión, %DO,

se utilizó un correntómetro.			Conductividad, Mvorp, Resistencia eléctrica, Presión.
Espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).	Metales	mg/kg	Preparación de la muestra, Digestión y medida directa con el ICP-MS. Las concentraciones están en mg/kg y/o ppm.

4.7 Análisis estadístico e inferencial

Se aplicaron pruebas de estadísticas y pruebas inferenciales para evaluar la normalidad de los datos y analizar las correlaciones, con el objetivo de validar las hipótesis y extraer conclusiones sobre la contaminación en la subcuenca del río Antabamba. Los resultados fueron validados mediante análisis de normalidad y procedimientos no paramétricos, como la correlación de Spearman. Además, se consideraron concentraciones de metales pesados y los factores fisicoquímicos que influyen en la contaminación ambiental.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. La determinación de los metales pesados en los sedimentos superficiales influye significativamente en la contaminación en un periodo a mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba.

5.1.1. Origen de datos y fuentes de metales pesados

Los sedimentos superficiales, fueron recolectados en 14 puntos de muestreo, analizados en el laboratorio de investigación y servicios con equipos espectroscópicos EC-0005-2017-UNAS-Arequipa. La técnica de análisis: ICP-MS, presento resultados de 24 elementos diversos como los siguientes: P, B, Na, Mg , Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Cd, Sn, Sb, Ba, Pb, Bi.

5.1.2. Cálculo del promedio de metales pesados

Para determinar la concentración promedio de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Antabamba, primero necesitamos calcular el promedio de cada metal pesado a partir de los datos de los análisis proporcionados. Una vez que tengamos estos promedios, podemos evaluar si la concentración de estos metales supera los niveles considerados seguros según los estándares ambientales establecidos en el ECA del suelo.

Tabla 7 — Resultados de Concentraciones de los metales en general en (ppm)

N°	Elementos	Promedio MP Análisis N°1	Promedio MP Análisis N°2	Promedio Análisis 1 y 2
1	P 31 (ppm)	432.91	517	474.95

2	B 11(ppm)	1.90	5.38	3.64
3	Na 23 (ppm)	246.24	310.93	278.58
4	Mg 24 (ppm)	2559.39	2943.26	2751.33
5	Al 27 (ppm)	6519.90	7952.45	7236.17
6	K 39 (ppm)	1914.95	2134.21	2024.58
7	Ca 43 (ppm)	13468.92	18560.94	16014.93
8	Ti 48 (ppm)	120.02	120.49	120.26
9	V 51 (ppm)	23.83	29.44	26.64
10	Cr 52 (ppm)	8.48	13.47	10.98
11	Mn 55 (ppm)	369.69	368.35	369.02
12	Fe 57 (ppm)	24331.58	23422.89	23877.23
13	Ni 60 (ppm)	14.68	18	16.34
14	Cu 63 (ppm)	292.59	32594.5	16443.55
15	Zn 66 (ppm)	164.84	117.58	141.21
16	As 75 (ppm)	210.90	122.07	166.49
17	Se 82 (ppm)	1.47	1.37	1.42
18	Sr 88 (ppm)	192.12	44.32	118.22
19	Cd 111 (ppm)	1.59	0.93	1.26
20	Sn 118 (ppm)	0.05	0.1	0.07
21	Sb 121 (ppm)	0.66	1.24	0.95
22	Ba 138 (ppm)	270.46	207.24	238.85
23	Pb 208 (ppm)	42.16	42.3	42.23
24	Bi 209 (ppm)	1.25	0.82	1.03

La selección, de muestra del sedimento debe ser adecuada para el agro y otros usos y se hará la comparación de los estándares de calidad ambiental (ECA), según lo especificado en el Decreto Supremo 004-2017-MINAM, Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, Ríos Costa y Sierra, D.S. 031-2010-SA, Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales, con límites máximos permisibles. Los resultados de concentraciones de metales pesados son como se observa en la Figura 8. Los metales pesados considerados para la investigación son: Cromo (Cr), Arsénico (As), Cadmio (Cd), Bario (Ba) y Plomo (Pb). Las concentraciones de metales pesados con los respectivos resultados de análisis se procesaron en el

“dataset” codificado en Python con en DataFrame denominado “data”, en la Figura 9.

```
import pandas as pd

# Datos de metales pesados
data = {
    'Cr': [9.11, 3.26, 3.30, 9.59, 23.57, 4.79, 17.08, 9.01, 6.18,
    'As': [36.20, 63.44, 28.25, 52.58, 1947.63, 42.40, 114.77, 66
    'Cd': [0.76, 0.31, 0.06, 0.82, 13.45, 0.50, 1.19, 1.30, 0.24,
    'Ba': [95.67, 258.11, 116.18, 253.61, 147.76, 61.17, 586.46,
    'Pb': [15.24, 56.11, 6.34, 23.43, 89.54, 25.93, 49.60, 34.29,
}
```

Figura 9 — DataSet de concentraciones de metales pesados

FUENTE: Ver Anexo I y II.

Tabla 8 — Tipos de ECAs con los Límites Máximos Permisibles

Metal	Suelo Agrícola (ppm)	Suelo Residencial/Parques (ppm)	Suelo Comercial/Industrial/ Extractivo (ppm)
As *	50	50	140
Ba	750	500	2000
Cd	1,4	10	22
Cr	400	400	1000
Pb	70	140	800

* Existe preocupación actual por contaminación en áreas agrícolas y residenciales/parques



5.1.3. Normalidad de los metales pesados

Tabla 9 — Estadísticas de normalidad de metales pesados

Metal	Estadístico	p-valor
Cr*	0,9139301489172779*	0,02461713904800697
Cd*	0,38237815611257286*	8,509654954748897e-10
As*	0,36119243910674537*	5,526677819904027e-10
Pb*	0,8917719398281442*	0,007380272108678287
Ba*	0,8042885429228808*	0,00012716228338385504

* Los datos NO siguen una distribución normal.

5.1.4. Histograma y cuartiles de los metales pesados

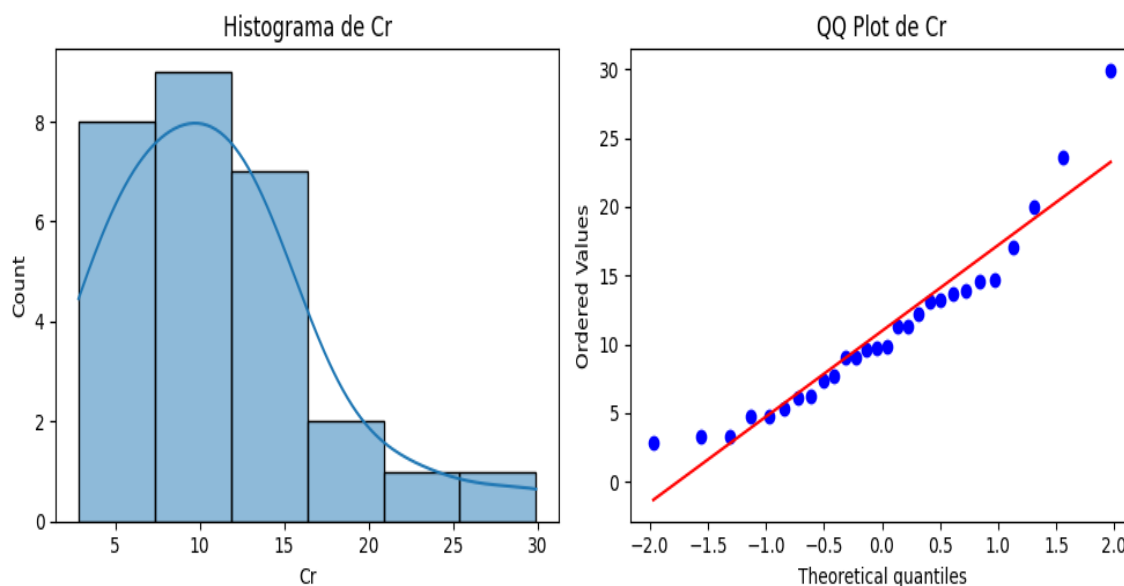


Figura 10 — Histograma y Cuartiles (Q-Q Plot) de Cromo

En el histograma y cuartiles (Q-Q Plot) de la figura 10, se aprecia que los valores de Cromo (Cr) se concentran principalmente entre 5 y 15, y que existen algunos

valores superiores a 25, aunque no extremadamente alejados del rango general. La curva suavizada sugiere una distribución asimétrica hacia la derecha, Esto sugiere la presencia de valores atípicos o una distribución sesgada. En cuanto a los cuantiles Q-Q Plot respalda esta observación, ya que la mayoría de los puntos se alinean de forma aceptable a lo largo de la línea de referencia de normalidad. Sin embargo, en los extremos se identifican ligeras desviaciones, especialmente hacia el extremo superior, esta característica puede impactar los resultados de los análisis estadísticos que suponen normalidad, lo que justifica la consideración de métodos mixtos de predicción para su tratamiento.

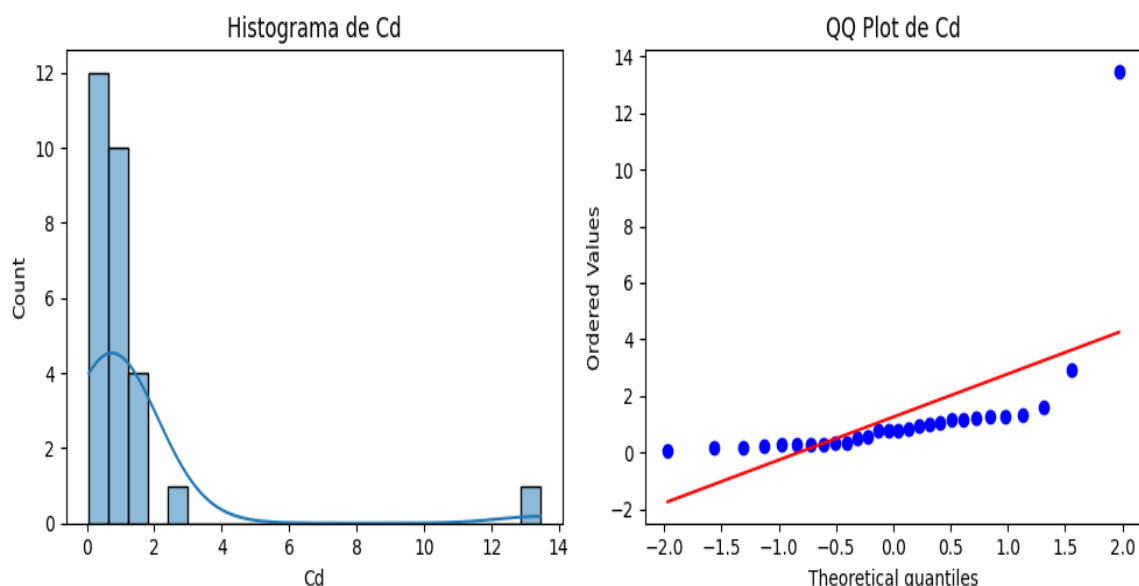


Figura 11 — Histograma y Cuantiles (Q - Q Plot) de Cadmio

En el Histograma de Cadmio, muestra una distribución asimétrica positiva con valores concentrados entre 0 a 2 y con la presencia de un valor atípico cercano a 13 con sesgo extremo a la derecha, La presencia de valores atípicos pueden representar distorsión de la simetría. En los cuantiles QQ-Plot del Cadmio, se confirma que los datos no siguen una distribución normal, muchos puntos se desvían evidenciando una alta asimetría y evidenciando uno o más puntos atípicos en los cuantiles superiores.



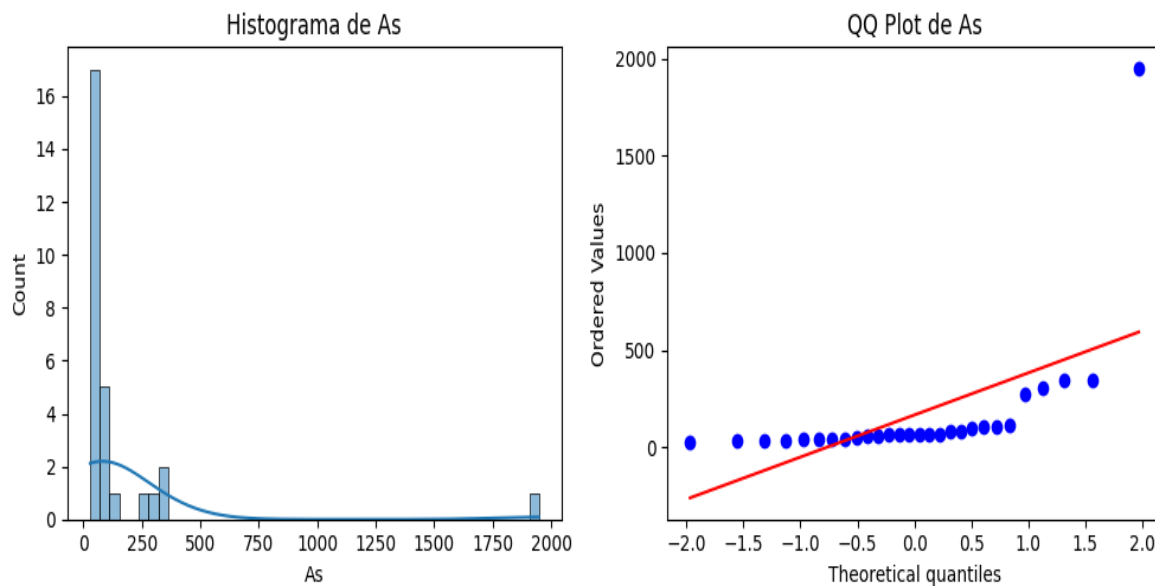


Figura 12 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de Arsénico

En el Histograma de Arsénico, la mayoría de los valores de As están concentrados entre 0 y 250, existiendo un valor atípico extremo cercano a 2000, que afecta la simetría de la campana de gauss, si observamos la curva azul indica que la distribución no es normal, sino asimétrica positiva (cola larga a la derecha) y la frecuencia más alta (modo) se da en los valores más bajos de Ar, con aproximadamente 17. La presencia de valores extremos sugiere que en algunos puntos de muestreo hay fuentes de contaminación más intensas.

En el gráfico de cuantiles (QQ-Plot) de arsénico, muestra presencia de valores extremos, que indica que algunos valores de arsénico son significativamente mayores que la media, los puntos en el gráfico QQ se desvían de la línea de referencia en los valores altos, lo que confirma que la distribución no es normal y se deben considerar métodos no paramétricos. Los niveles elevados de arsénico pueden deberse a casos naturales y/o descargas mineras.

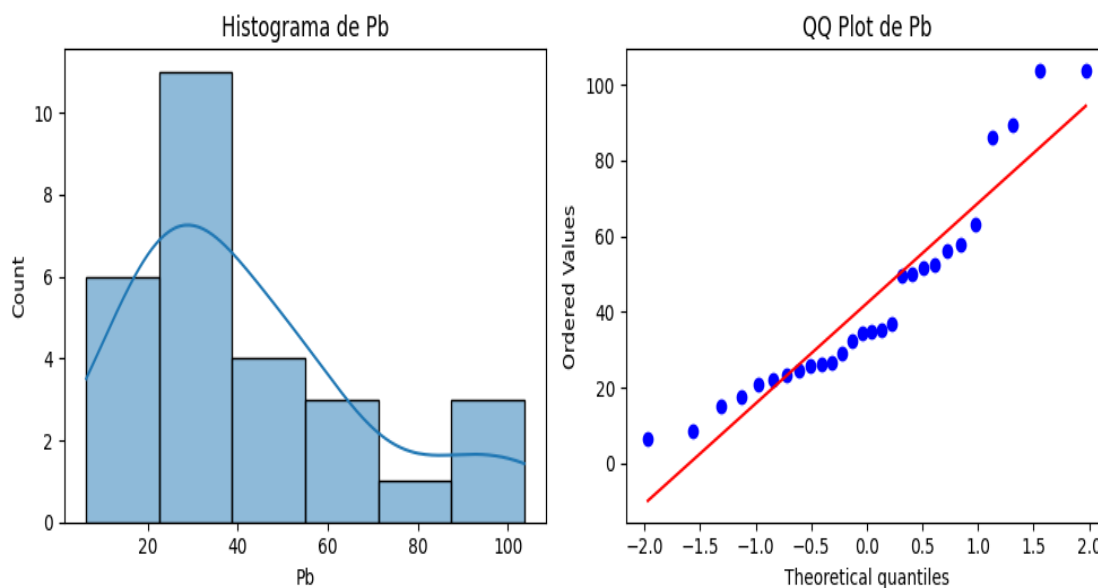


Figura 13 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de Plomo

En el Histograma del Plomo, tiene una distribución sesgada a la derecha, asimetría positiva las concentraciones varían de 5 a 100 ppm en el marco del histograma, la mayoría de las muestras presentan bajas concentraciones de plomo, los intervalos más densos se encuentran entre 20 - 40 ppm equivalente a 11 datos, asimismo existen valores elevados que indican focos de contaminación, con valores atípicos. Los cuartiles de QQ-Plot del Plomo, presentan la desviación en la parte superior que indican la presencia de valores muy elevados de plomo, lo que confirma la existencia de puntos con alta contaminación. Con valores atípicos significativos, los valores más altos no siguen la tendencia esperada en una distribución normal, lo que indica la influencia de factores externos como la actividad minera. Para modelos predictivos, se debe considerar el impacto de estos valores extremos y utilizar algoritmos robustos, para manejar bien datos no distribuidos normalmente.

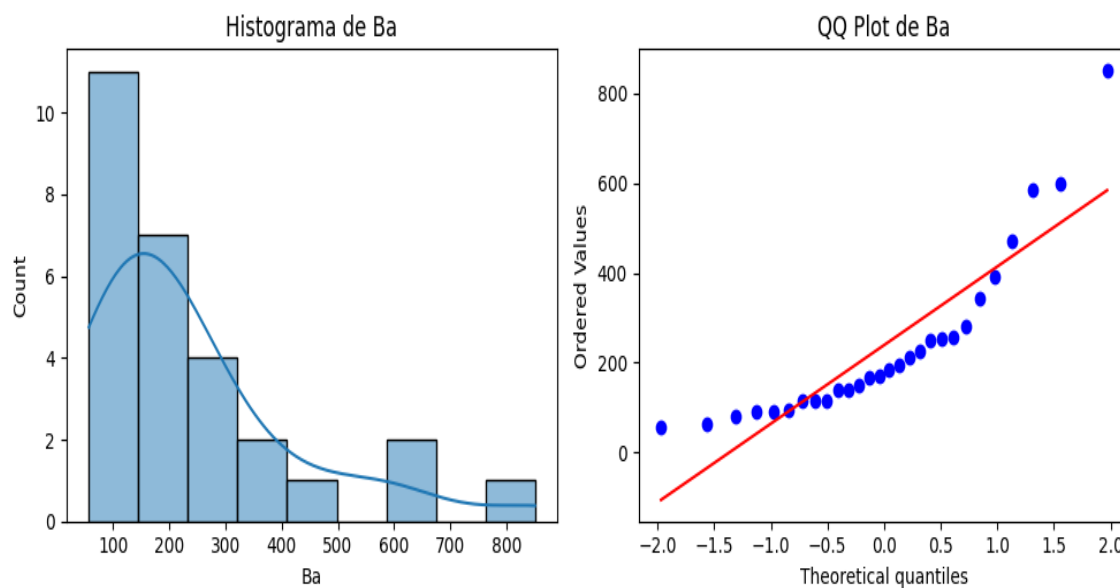


Figura 14 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de Bario

En el Histograma, la distribución de los datos de Bario está sesgada a la derecha, las concentraciones varían de 50 ppm hasta más de 800, con intervalos de frecuencia que varían de 50 a 150 ppm, equivalente a 11 observaciones presencia de valores extremos que podrían influir en los análisis. La asimetría de la distribución puede afectar métodos que asumen normalidad, como pruebas paramétricas o modelos estadísticos.

En el gráfico de cuantiles (QQ-Plot), los puntos no siguen la línea de referencia normal, confirma una distribución del Bario no es normal, con una transformación logarítmica, es decir existe un comportamiento similar al Cromo, con una distribución sesgada a la derecha y valores extremos. También se puede notar que se tiene una población más densa en la parte central de la recta sin alejarse demasiado de la normalidad, mientras que en la cola inferior hay menos valores negativos y muy bajas concentraciones de lo esperado y por encima de la línea de normalidad cola superior valores muy grandes y positivos.

5.1.5. Correlación de rango de Spearman

La correlación de **Spearman**, se aplica porque permite medir la relación entre variables **no paramétricas** o que no siguen una distribución normal. Como

se observa en la Tabla 8 y Tabla 9, de resultados inferenciales de normalidad de metales pesados

El presente trabajo muestra la correlación de rango de Spearman y los valores p entre diferentes pares de metales pesados de todas las muestras de suelo.

Por lo que, se tiene la siguiente Tabla 9.

Tabla 10— Correlación de rango de Spearman y Valor de P

	Cr		As		Cd		Ba		Pb	
	Correlación de rango de Spearman	Valor p	Correlación de rango de Spearman	Valor p	Correlación de rango de Spearman	Valor p	Correlación de rango de Spearman	Valor p	Correlación de rango de Spearman	Valor p
Cr	0	0	0,3906	0,0399	0,6365	0,0003	0,1777	0,3657	0,1163	0,5555
As	0,4328	0,0214	0	0	-	-	-0,043	0,8281	0,6972	0
Cd	0,6365	0,0003	0,4328	0,0214	0	0	0,3184	0,0987	-0,0413	0,8346
Ba	0,1777	0,3657	-0,043	0,8281	0,3184	0,0987	0	0	0,0342	0,8628
Pb	0,1163	0,5555	0,6972	0	-0,0413	0,8346	0,0342	0,8628	0	0

La correlación de rango de Spearman es una correlación monótonica (no necesariamente lineal) entre dos variables. Los valores pueden variar entre -1 y 1.

Así mismo, la Tabla 9 muestra un valor p con las siguientes significancias:

- El valor p: para la correlación entre el cromo (Cr) y el arsénico (As) es 0,0399 (lo que sugiere una correlación significativa).
- El valor p para la correlación entre el cromo (Cr) y el cadmio (Cd) es 0,0003 (muy significativo).
- El valor p para la correlación entre el cromo (Cr) y el bario (Ba) es 0,3657 (no significativo).
- El valor p para la correlación entre el cromo (Cr) y el plomo (Pb) es 0,5555 (no significativo).



Por lo tanto: Si el valor p es menor que un nivel de significancia (por ejemplo, 0,05), se considera que la correlación es significativa. En este caso, las correlaciones entre Cr-As y Cr-Cd son significativas, mientras que Cr-Ba y Cr-Pb no lo son. También se observa datos que proporciona información sobre la correlación entre los metales pesados en las muestras de suelo.

5.1.6. Matriz de correlación de metales pesados

La matriz de correlación, muestra los coeficientes de valoración de Pearson entre los metales pesados Cr (Cromo), Cd (Cadmio), As (Arsénico), Pb (Plomo) y Ba (Bario). Los valores varían entre -1, 0 y 1, donde:

- **Valores cercanos a 1**, revelan una correlación positiva fuerte. A medida que un metal aumenta su concentración, el otro también tiende a aumentar.
- **Valores cercanos a -1**, revelan una correlación negativa fuerte. A medida que un metal aumenta su concentración, el otro tiende a disminuir.
- **Valores cercanos a 0** indican que no hay una correlación lineal significativa entre los metales pesados analizados.

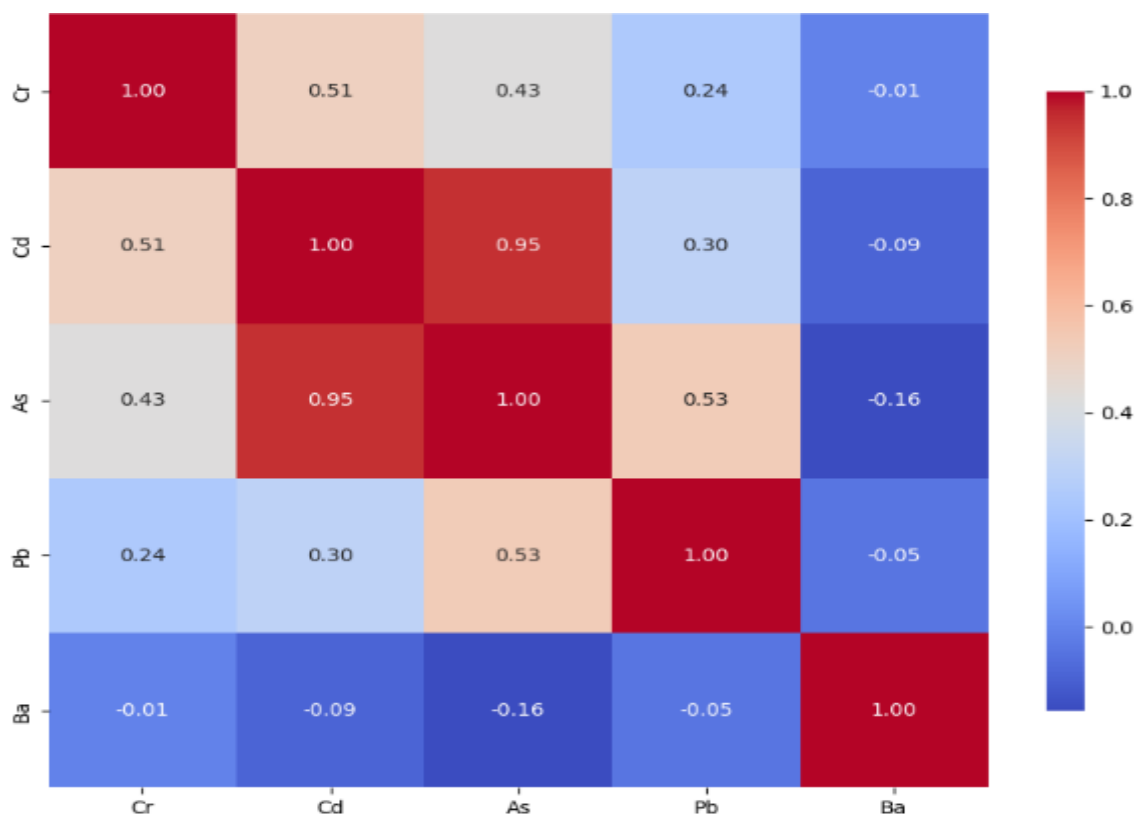


Figura 15 — Matriz de correlación de los metales pesados Cr, Pb, Cd, As, Cd.

La Figura 15, muestra la correlación de Spearman de los metales pesados, donde existe lo siguiente:

- Alta y significativa entre Cr y Cd. Esto sugiere que a medida que aumenta la concentración de Cr, también tiende a aumentar la concentración de Cd, lo cual puede ser relevante en estudios de contaminación, gestión ambiental, predicción fiable y entender las relaciones clave entre MP y factores.
- Moderada y débil entre Cr y As y entre Pb y Ba, lo que indica que no es significativa. Indica que, aunque hay cierta relación, es menos confiable y podría ser influenciada por otros factores. Requiere un análisis cauteloso, por ser menos confiables.
- Sin correlación significativa entre Cr y Ba. No hay evidencia suficiente de una relación entre las concentraciones de MP y varían independientemente.
- Interdependencias complejas entre Cd y As, que pueden variar en diferentes condiciones ambientales. Necesitan métodos analíticos avanzados para entender cómo las variables interactúan en contextos más amplios.

Aspectos que destacan:

- As y Cd tienen la valoración más fuerte (0,95)
- Pb y As tienen una valoración moderada (0,53)
- Ba no tiene una valoración significativa con los demás metales
- El Cr requiere análisis complementarios además de modelos predictivos más robustos.

5.1.7. Determinación de los límites máximos permisibles de concentraciones de metales pesados

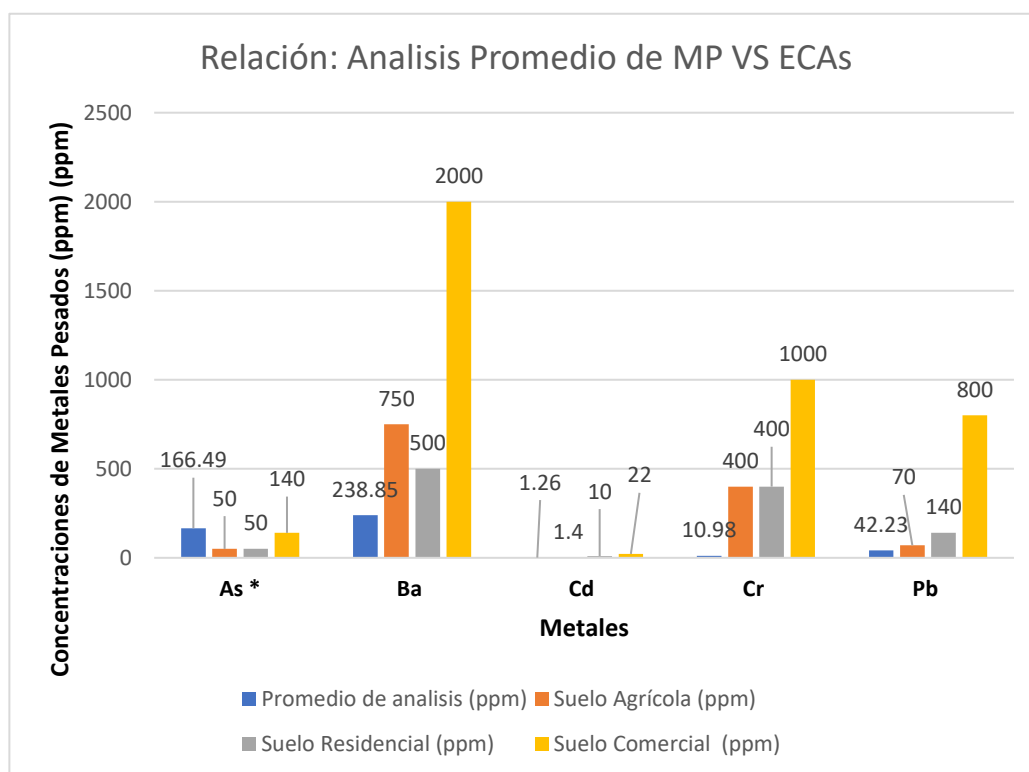


Figura 16 — Comparación de promedios de metales pesados con ECAs

La Figura 16, muestra la comparación de los promedios de metales pesados y los estándares de calidad de suelo, e indican lo siguiente:

5.1.7.1. Cromo (Cr)

- Concentración Promedio: 10,98 ppm
- Límites:
 - Suelo Agrícola: 400 ppm
 - Suelo Residencial/Parques: 400 ppm



- Suelo Comercial/Industrial/Extractivo: 1000 ppm

La concentración promedio de cromo es 10,98 **ppm**, que está por debajo de todos los límites de referencia. Esto indica que no hay una preocupación inmediata por contaminación de cromo en las áreas estudiadas.

La concentración promedio del Cr es muy baja en comparación con los valores de los límites máximos permisibles y parece no representar un riesgo de contaminación en este caso.

5.1.7.2. Cadmio (Cd)

- Concentración Promedio: 1,26 ppm
- Límites:
 - Suelo Agrícola: 1,4 ppm
 - Suelo Residencial/Parques: 10 ppm
 - Suelo Comercial/Industrial/Extractivo: 22 ppm

La concentración promedio de cadmio es **1,26 ppm**, que está por debajo de todos los límites de referencia. Esto sugiere que no hay una preocupación inmediata por contaminación de cadmio en las áreas estudiadas.

Presenta una concentración promedio mínima, similar a los valores de los límites máximos permisibles y se encuentra dentro de los límites máximos permisibles para todos los ECAs de suelo comerciales, agrícolas y residenciales

5.1.7.3. Arsénico (As)

- Concentración Promedio: 166,49 ppm
- Límites:
 - Suelo Agrícola: 50 ppm
 - Suelo Residencial/Parques: 50 ppm
 - Suelo Comercial/Industrial/Extractivo: 140 ppm

La concentración promedio de arsénico es **166,49 ppm**, que supera los límites para suelos agrícolas y residenciales/parques (ambos de 50 ppm). Sin embargo, está por debajo del límite para suelos

comerciales-industriales-extractivos (140 ppm). Esto sugiere una significativa contaminación de arsénico en áreas agrícolas y residenciales/parques, lo cual puede tener serias implicaciones para la salud pública y el medio ambiente en esas áreas.

La concentración promedio, es considerablemente mayor que los valores de los ECAs agrícolas y residenciales y excede los límites máximos permisibles agrícolas y residenciales, pero aún está por debajo de los límites máximos permisibles de ECAs comercial y podría representar un riesgo en suelos agrícolas y residenciales.

5.1.7.4. Plomo (Pb)

- Concentración Promedio: 42,23 ppm
- Límites:
 - Suelo Agrícola: 70 ppm
 - Suelo Residencial/Parques: 140 ppm
 - Suelo Comercial/Industrial/Extractivo: 800 ppm

La concentración promedio de plomo es 42,23 **ppm**, que está por debajo de todos los límites de referencia. Esto sugiere que no hay una preocupación inmediata por contaminación de plomo en las áreas estudiadas. La concentración promedio es menor que los límites máximos permisibles comercial, pero superior a los límites máximos permisibles agrícolas y residenciales.

Los límites máximos permisibles comerciales tienen un valor extremadamente alto, lo que sugiere que este metal es permitido en mayores concentraciones en suelos industriales y comerciales, pero puede representar un alto riesgo en suelos agrícolas y residenciales debido a su toxicidad.

5.1.7.5. Bario (Ba)

- Concentración Promedio: 238,85 ppm
- Límites:
 - Suelo Agrícola: 750 ppm
 - Suelo Residencial/Parques: 500 ppm



- Suelo Comercial/Industrial/Extractivo: 2000 ppm

La concentración promedio de bario es 238,85 ppm, que está por debajo de todos los límites de referencia para suelos agrícolas, residenciales/parques y comerciales/industriales/extractivos. Esto indica que no hay una preocupación inmediata por contaminación de bario en las áreas estudiadas.

La concentración promedio es similar a los valores de los ECAs agrícola y residencial y aunque está por debajo del límite máximo permisible comercial, podría ser un factor a monitorear.

Aspectos importantes a resaltar:

- Respecto al Arsénico (As) y el Plomo (Pb) son los metales más preocupantes, ya que superan los límites máximos permisibles en suelos agrícolas y residenciales.
- El Cromo (Cr) y el Cadmio (Cd) no presentan un riesgo evidente, pues sus concentraciones están por debajo de los valores de referencia.
- El Bario (Ba) se encuentra cerca de los límites permitidos, por lo que su monitoreo es recomendable.
- Los suelos industriales y comerciales permiten concentraciones mucho más altas de ciertos metales, lo que indica que los riesgos varían según el uso del suelo.
- El Arsénico (As), tiene una concentración promedio alarmantemente alta para suelos agrícolas y residenciales/parques, lo que sugiere una significativa contaminación en estas áreas.
- El Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), y Plomo (Pb), tienen concentraciones promedio y están por debajo de los límites de referencia, indicando que no hay una preocupación inmediata por contaminación de estos metales en las áreas estudiadas.

5.1.8. Análisis Comparativo de límites máximo permisibles de concentraciones de metales pesados.

Para cada metal, se compararon las concentraciones promedio con los Límites Máximos Permisibles (LMP), para evaluar si hay superación de estos valores, indicando contaminación. Ver Tabla 6 – 9 y la codificación para las Figuras 17, 18, 19, 20, 21 son: Concentración promedio (A), Suelo Agrícola (B), Suelo Residencial (C) y Suelo Comercial/Industrial (D).

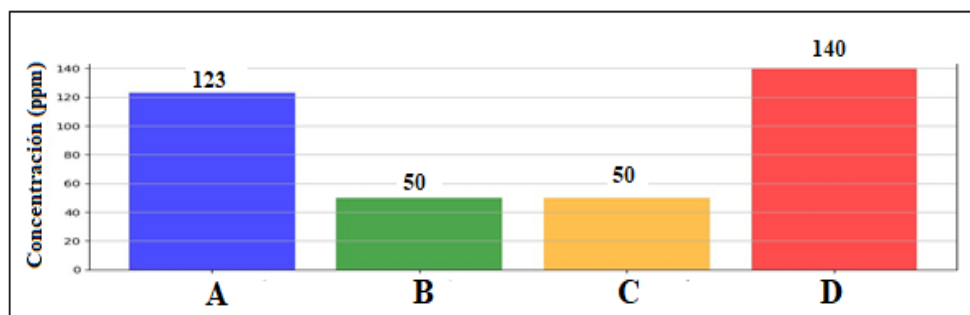


Figura 17 — Las concentraciones de As y LMP

Como se muestra en la Figura 17. Los límites de referencia indicativo de una alta contaminación, riesgo elevado para la salud ambiental y posible remediación necesaria.

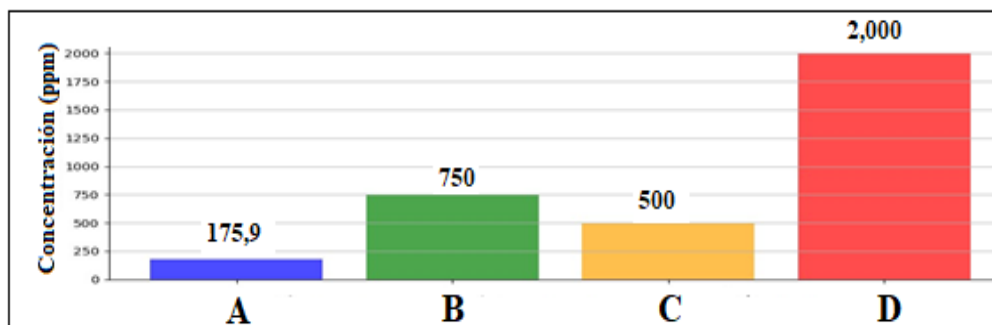


Figura 18 — Las concentraciones de Ba y Límites de referencia

Como se muestra en la Figura 18. Los límites de referencia indicativo de una contaminación media. Por lo cual, requiere monitoreo y evaluación.

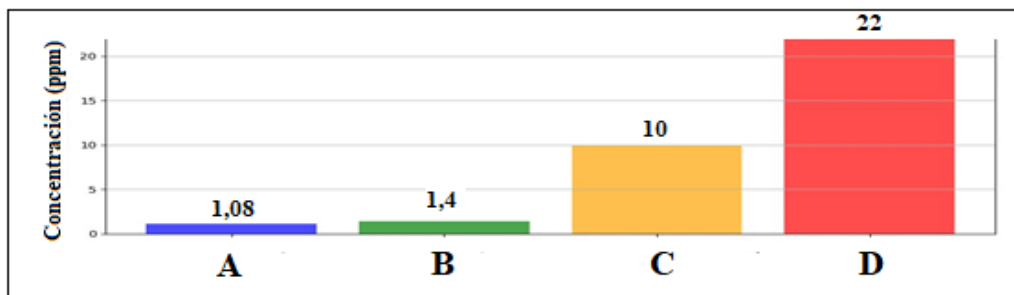


Figura 19 — Las concentraciones de Cd y Limites de referencia

Como se muestra en la Figura 19. Los límites de referencia indicativo de una contaminación baja. Por lo cual, no requiere de alertas inmediatas.

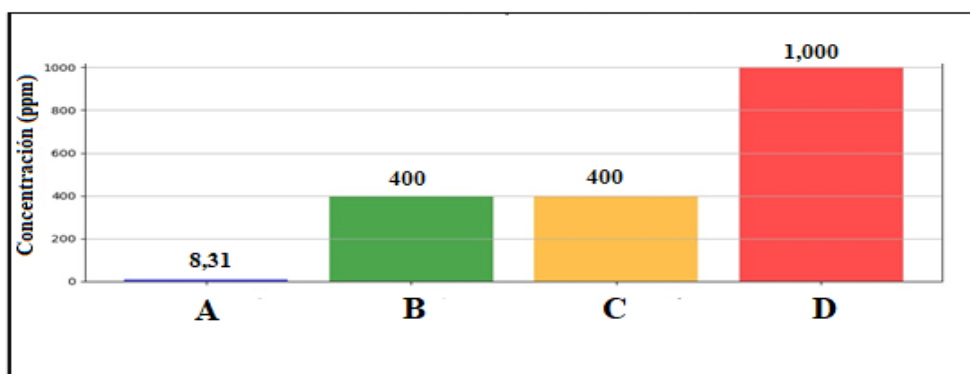


Figura 20 — Las concentraciones de Cr y Limites de referencia

Como se muestra en la Figura 20. Los límites de referencia indicativo de una contaminación baja. Por lo cual, no requiere de alertas inmediatas.

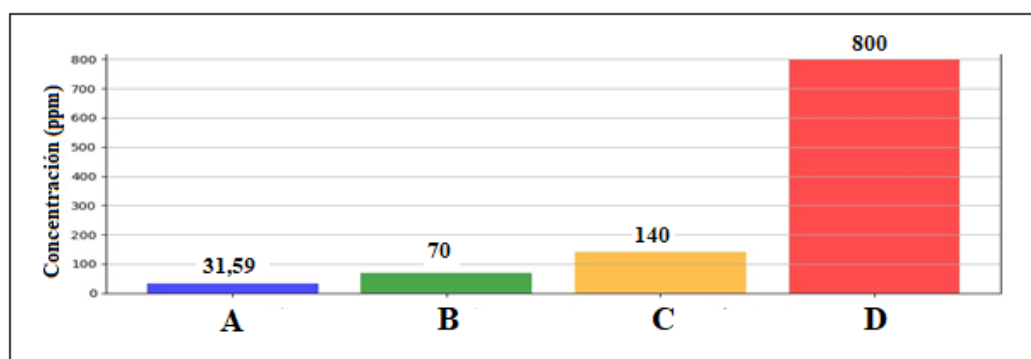


Figura 21 — Las concentraciones de Pb y Limites de referencia

Como se muestra en la Figura 21. Los límites de referencia indicativo de una contaminación baja. Concentración típica en sedimentos no contaminados Por lo cual, no requiere de medidas inmediatas.



5.1.9. Matriz de correlación de los metales pesados y la contaminación

Tabla 11 — Normalidad de los límites máximos permisibles

ECAs	Estadístico	p-valor
Concentracion_MP *	210,73	1,737e-46
Eca_Agricola *	915,77	1,39e-199
Eca_Residencial*	996,87	3,41e-217
Eca_Industrial*	32,432	9,069e-08
* Los ECAS no siguen una distribución normal		

Según la Tabla 11, se observa que la normalidad de ECA Agrícola y Residencial tienen un fuerte impacto en la predicción de contaminación. Esto puede deberse a que estos estándares tienen límites más permisivos que la ECA Industrial, haciendo que su relación con los valores de contaminación detectados sea más marcada.

- La ECA Industrial, aunque significativa, tiene menos peso, lo que podría indicar que las fuentes de contaminación predominantes no provienen del sector industrial, sino de fuentes agrícolas o residenciales.
- Concentración_MP también es un fuerte predictor, lo que sugiere que los metales pesados analizados tienen una correlación clara con los valores de ECA y pueden ser usados para prever niveles de contaminación.

5.1.10. Matriz de correlación de Metales Pesados y ECAs contaminación

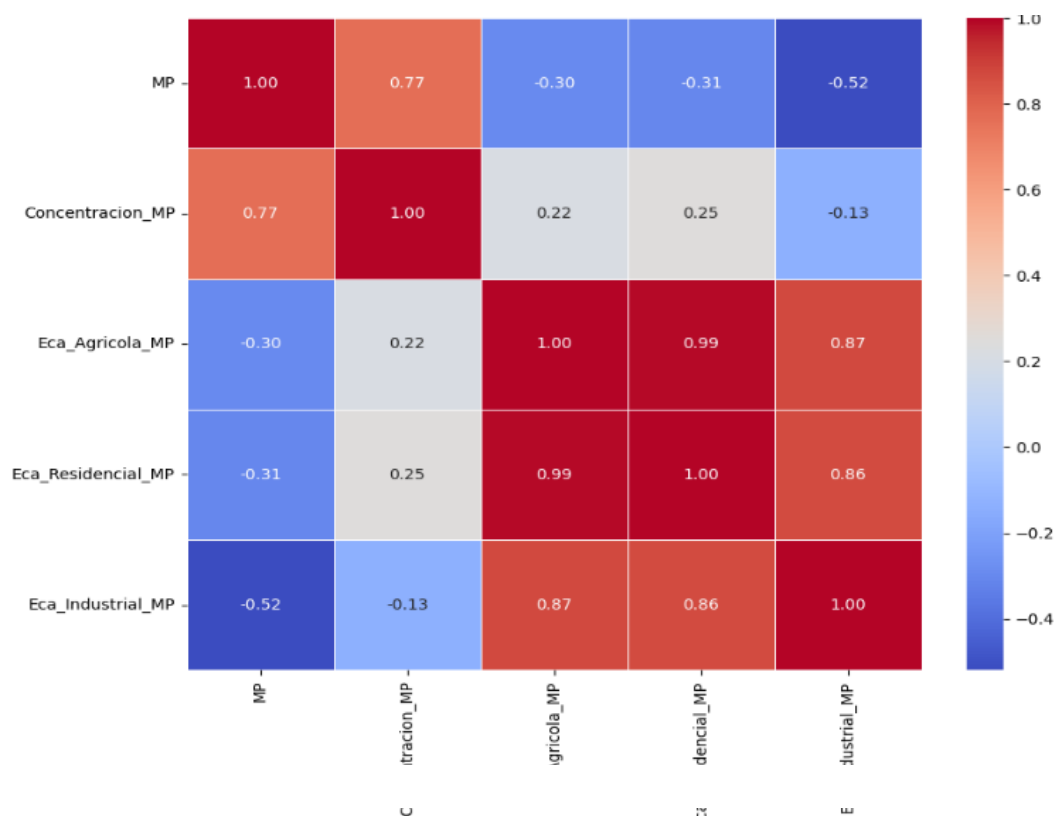


Figura 22 — Matriz de Correlación de ECAs Agrícola, Residencia e Industrial

La Figura 22, muestra la matriz de correlación de Spearman, de los metales pesados y la correlación entre las concentraciones de metales pesados y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrarios, comerciales y residenciales puede revelar información clave sobre la contaminación en diferentes usos del suelo, y muestran valores desde 1 a -1, como:

- **Valores cercanos a 1**, revelan una correlación positiva fuerte. A medida que un metal aumenta su concentración, el otro también tiende a aumentar.
- **Valores cercanos a -1**, revelan que a medida que la concentración de ciertos metales pesados aumenta, la probabilidad de superar los límites permisibles en los ECAs también aumenta, puede revelar qué metales tienen patrones similares de contaminación en distintos tipos de suelo.
- **Valores cercanos a 0** indican que no hay una correlación lineal significativa entre los metales pesados analizados.



Por lo tanto, la matriz de consistencia a partir de la Figura 22 se muestra:

- a) La correlación alta y positiva entre metales pesados (MP) y concentraciones metales pesados (Concentración_MP), lo que indica que a mayor concentración de MP, mayor presencia de contaminación general.

La correlación fuerte y positiva: de estándares de calidad de suelo (ECAs) Agrícola, Residencial e Industrial entre sí, indica que los niveles de contaminación en un sector están fuertemente relacionados con los demás sectores.

El metal pesado tiene una correlación positiva fuerte con la Concentración_MP (0,77), lo que indica que, a mayor cantidad de metales pesados, mayor concentración de estos en los suelos contaminados.

El estándar de calidad de suelo Agrícola y El estándar de calidad de suelo Residencial (0,99): Correlación casi perfecta, lo que indica que los límites de calidad para uso agrícola y residencial son muy similares en términos de metales pesados.

El estándar de calidad de suelo Industrial y El estándar de calidad de suelo Agrícola (0,87), El estándar de calidad de suelo Industrial y suelo Residencial (0,86): Correlaciones altas, pero ligeramente menores en comparación con los otros estándares de calidad de suelo, lo que sugiere que los estándares industriales permiten mayores concentraciones de metales pesados en comparación con los agrícolas y residenciales.

- b) La correlación débil y positiva de concentración de metales pesados con los estándares de calidad de suelo agrícola y residencial están en 0,22 y 0,25. Indica que, si aumenta la concentración de metales pesados, los estándares de calidad de suelo tienden a verse ligeramente afectados.

La correlación de concentraciones_MP y los metales pesados (0,77), Confirman que un aumento en los metales pesados está directamente relacionado con un incremento en su concentración en el suelo.

- c) La correlación débil y negativa de metales pesados con los estándares de calidad de suelo industrial indicando que, existe incremento en la concentración de metales pesados y no está necesariamente asociado con un empeoramiento en la adecuación ambiental, pudiendo ser debido a más



tolerancia a contaminantes en estas zonas. Así mismo, de metales pesados y estándares de calidad, donde a mayor presencia de metales pesados tiende a reducir la calidad ambiental en términos de diferentes usos (agrícola, residencial e industrial).

Los metales pesados (MP) tienen correlaciones negativas con los estándares ECAs_Agrícola (-0,30), ECAs_Residencial (-0,31) y ECAs_Industrial (-0,52). Esto sugiere que, a medida que aumentan las concentraciones de metales pesados, es menos probable que los suelos cumplan con los estándares de calidad ambiental de suelo (ECAs).

Las Concentración_MP tiene correlaciones bajas con los ECAs Agrícola (0,22), ECAs Residencial (0,25) y el ECAs Industrial (-0,13), lo que indica que, aunque la concentración de metales varía, los estándares de calidad se mantienen en niveles relativamente estables.

Se muestra una relación directa entre la presencia de metales pesados y la disminución de la calidad del ambiente según los distintos ECAs, es decir muestra el incremento de la contaminación, frente a los permisibles.

Aspectos relevantes:

- A. Los suelos agrícolas y residenciales tienen límites de calidad ambiental muy similares, por lo que su afectación por metales pesados también es parecida.
- B. A mayor concentración de metales pesados, hay una menor probabilidad de que los suelos cumplan con los estándares de calidad, especialmente en usos industriales.
- C. Se recomienda monitorear los suelos con altos niveles de metales pesados para prevenir que excedan los límites permisibles, especialmente en áreas agrícolas y residenciales donde la exposición humana es mayor.
- D. Para la toma de decisiones, se deben considerar modelos predictivos que evalúen la evolución de la contaminación en diferentes tipos de suelo (agrícola, residencial e industrial).



5.2. La determinación de los factores fisicoquímicos en los sedimentos superficiales influye significativamente en la contaminación en un periodo de mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba.

5.2.1. Origen de datos y fuentes de parámetros fisicoquímicos

Las concentraciones de los factores fisicoquímicos de las muestras fueron obtenidas mediante la recolección de agua y sedimentos superficiales en distintos puntos de muestreo, asegurando confiabilidad en los datos y control de la contaminación. Los resultados obtenidos se analizaron en simultaneo con las muestras de sedimentos y en gabinete del laboratorio de medio ambiente de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA), utilizando diferentes equipos de medición y métodos analíticos específicos para cada parámetro. Ver Tabla 12.

Tabla 12 — Métodos de análisis por parámetro

N°	Parámetro	Método de Análisis	Equipo/Instrumento
1	pH	Potenciometría	Multiparámetro HANNA HI98194
2	Resistividad (MΩ.cm)	Conductimetría	
3	Temperatura (T°C)	Medición directa	
4	Oxígeno disuelto (%DO)	Sensor óptico / Método Winkler	
5	Partículas en suspensión (PPmTds)	Gravimetría	
6	Turbiedad (NTU)	Nefelometría	Turbidímetro
7	Conductividad (S/cm, uS/cm^A)	Conductimetría	Multiparámetro HANNA HI98194
8	Potencial de óxido-reducción (Mvorp)	Electroquímica	
9	Salinidad (Psu)	Refractómetro / Sensor multiparamétrico	
10	Presión (Psi)	Medición directa	

Los resultados de algunos Límites Máximos Permisibles (LMP), se compararon con los estándares de calidad ambiental (ECA) de suelo, especificado en el Decreto Supremo 004-2017-MINAM (Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, E2 Ríos Costa y Sierra) y el Decreto Supremo 031-2010-SA (Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales), como se observa en la Tabla 13.

Tabla 13 — Límites Máximos Permisibles de parámetros fisicoquímicos

Parámetros	Unidad	Límites Máximos Permisibles		Promedio PO1	Promedio PO2
		D.S. 031-2010-SA	D.S.04-2017-MINAN		
Temperatura	T°C	00	A3	17,92	14,95
Turbiedad	NTU	5,0	5.0	0,65*	0,79*
pH	pH	6,5-8,5	6.50-9.0	7,70	7,85
Conductividad	uS/cm	1 500,0	1 000,00	55,00	361,14
Sólidos totales disueltos	mg/L	1000	< 100	55,14	183,43
* Supera límite máximo permisible					

5.2.2. Normalidad de los parámetros fisicoquímicos

Los resultados del test de Shapiro-Wilk se utilizan para evaluar si una muestra sigue una distribución normal. El valor clave aquí es el p-value, que te indica la probabilidad de que los datos sean consistentes con una distribución normal. Si el p-value es menor que un umbral típico (usualmente 0,05), rechazamos la hipótesis nula donde los datos siguen una distribución normal.



Tabla 14 — Normalidad de los parámetros fisicoquímicos

N°	Parámetro	Estadístico	p-valor	Normalidad
1	pH	0,4867	4,66e-06	No sigue distribución normal*
2	Mvorp	0,6760	0,0002	No sigue distribución normal*
3	%DO	0,8648	0,0355	No sigue distribución normal*
4	PPmDo	0,9031	0,1251	Sigue distribución normal**
5	S/cm	0,8879	0,0754	Sigue distribución normal**
6	uS/cm^A	0,8802	0,0585	Sigue distribución normal**
7	MΩ.cm	0,7853	0,0033	No sigue distribución normal*
8	PPmTds	0,8712	0,0436	No sigue distribución normal*
9	Psu	0,8074	0,0062	No sigue distribución normal*
10	T°C	0,9562	0,6609	Sigue distribución normal**
11	Psi	0,9443	0,4761	Sigue distribución normal**
* Utilizar pruebas no paramétricas				
** Utilizar pruebas paramétricas				

5.2.3. Histograma y cuartiles de parámetro fisicoquímicos

En el presente trabajo de investigación se tiene conjuntos de gráficos que se presenta en un histograma y un gráfico QQ-plot para diferentes parámetros ambientales. El histograma muestra la distribución de los datos medidos en el ambiente, mientras que el QQ-plot ayuda a evaluar si la distribución de los datos sigue una distribución normal:

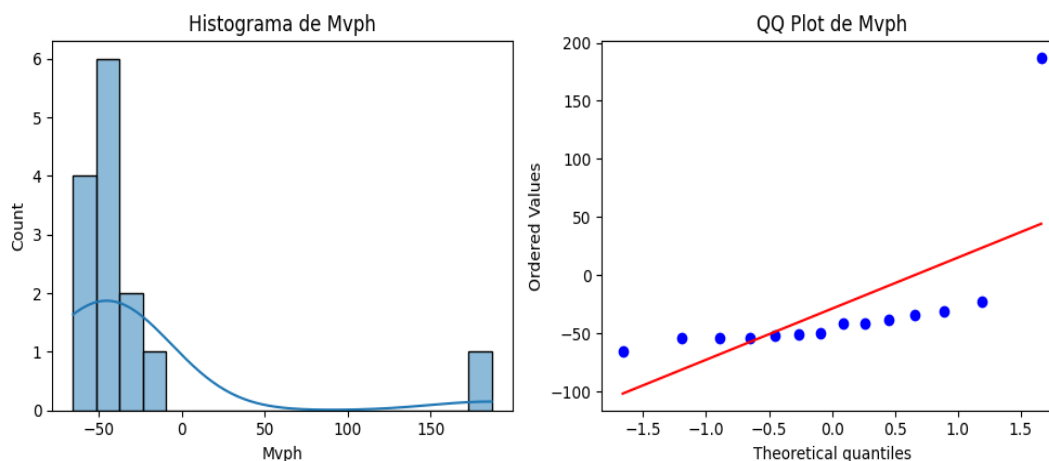


Figura 23 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de Mvph (Potencial de Hidrógeno Modificado)

El histograma de Mvph, muestra una distribución altamente sesgada a la derecha, con valores de concentración focalizados de -50 a 0 mV y valores atípicos mayores a 150 mV. con un valor extremo que puede estar asociado a alteraciones químicas en los sedimentos en condiciones reductoras a fuertes, afectando el medio acuático, en cuanto al QQ-Plot confirma que los datos no siguen una distribución normal, indicando valores atípicos y no presenta un comportamiento normal.

Así mismo, el Mvph anómalo podría sugerir fuentes de contaminación o industrial, ya que valores extremos pueden deberse a descargas de efluentes industriales o lixiviados mineros. El outlet detectado indica un posible evento de contaminación puntual o una tendencia de acumulación de ciertos compuestos en los sedimentos.

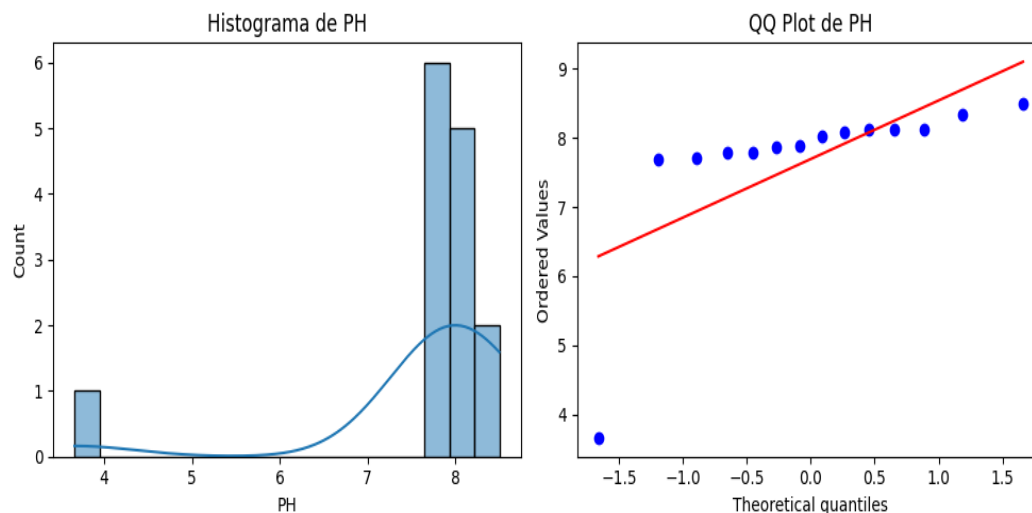


Figura 24 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de pH (Potencial de Hidrógeno)

El histograma de pH, muestran una distribución sesgada negativamente hacia la izquierda con un sesgo negativo, con un valor extremadamente bajo de 4 pH lo que rompe la tendencia normal esperada en sedimentos acuáticos, las concentraciones predominantes se encuentran entre 7,5 a 8,5 de pH que son valores típicos en aguas neutras y alcalinas.

En el QQ-Plot, los valores no siguen la línea teórica de normalidad, sugiriendo la presencia de un factor externo que modifica la acidez. Así mismo, el pH bajo en sedimentos puede indicar presencia de drenaje ácido de mina (DAM), especialmente si el área tiene actividad minera cercana y/o geológico.

La acidificación de los sedimentos impacta la solubilidad de metales pesados como el **arsénico, plomo y cadmio**, aumentando su disponibilidad tóxica para los ecosistemas acuáticos.

La falta de neutralización natural sugiere que la capacidad de amortiguación del ambiente ha sido sobrepasada, posiblemente por descargas contaminantes.

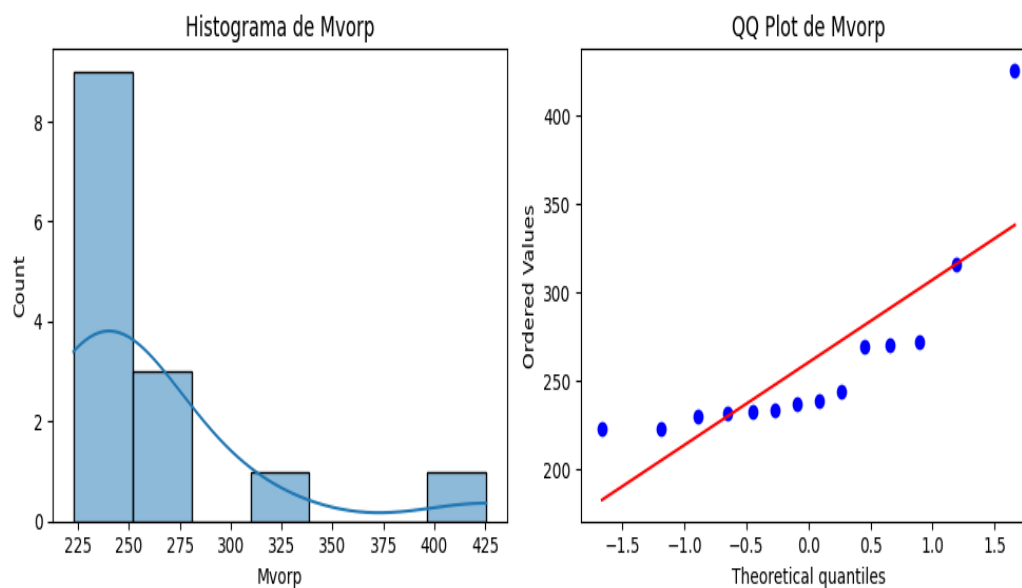


Figura 25 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de Mvorp (Potencial Redox en Sedimentos)

El histograma de Mvorp, La distribución es altamente asimétrica sesgada a la derecha, la cantidad de valores se agrupan entre 225 a 275 mV, con valores extremos de 400 con alta dispersión y con valores atípicos con valores predominantemente bajos, pero con algunos valores elevados que pueden indicar procesos de oxidación intensa.

En el QQ-Plot Mvorp, los valores se alejan de la normalidad, indicando posibles cambios en la dinámica de reducción-oxidación del ambiente.

Así mismo, el Mvorp elevado en sedimentos puede reflejar procesos oxidativos generados por contaminación química (ej. lixiviados de minería, fertilizantes con nitratos, aguas residuales y geológicos). Valores elevados pueden estar asociados con la oxidación de materia orgánica o sulfuros metálicos, lo que puede liberar metales pesados en formas más solubles y bioaccesibles.

En contraste, valores bajos pueden indicar condiciones anóxicas, favoreciendo la formación de especies tóxicas como el arsénico inorgánico y metales en estado reducido.

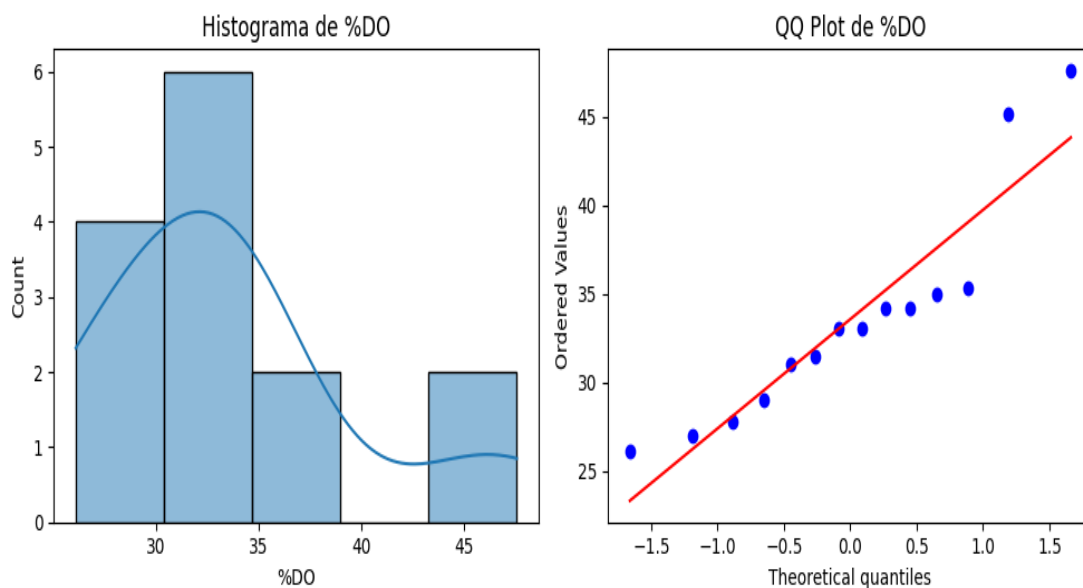


Figura 26 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de %DO (Oxígeno Disuelto)

El histograma de %DO, tiene una distribución levemente sesgada teniendo valores de agrupación entre 30 y 35 %, tiene una asimetría positiva ósea cola a la derecha con niveles bajos de oxígeno.

En el QQ-Plot de %DO, se observan desviaciones en los extremos, lo que sugiere que los datos no siguen completamente una distribución normal, la mayoría de los puntos centrales indican una aproximación a la normalidad con algunos valores alejados de la media tanto como inferiores o superiores muestran desviaciones significativas indicando valores atípicos. Por lo tanto; el Oxígeno disuelto (%DO), es bajo y puede indicar condiciones anóxicas, afectando la biodiversidad acuática.

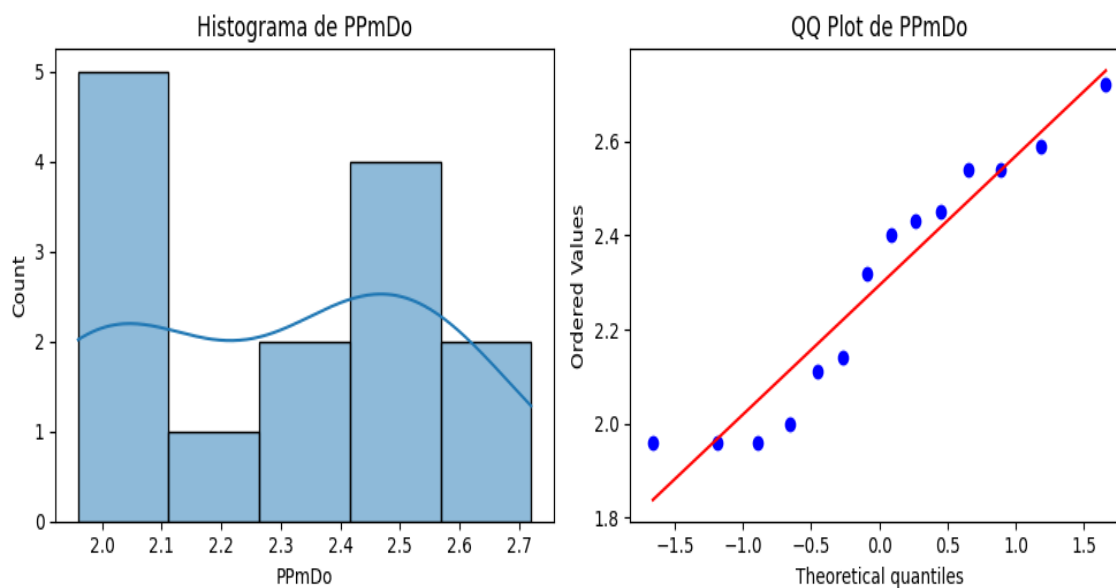


Figura 27 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de PPMDo

En el Histograma de PPMDo, se muestra una distribución dispersa con picos en ciertos valores con una frecuencia de 2,0 a 2,7 mg/L. con una leve asimetría a la izquierda. Se precisa que los datos no siguen una distribución normal, lo cual puede deberse a fuentes de contaminación puntuales o variaciones en las condiciones ambientales. La línea de densidad sugiere fluctuaciones en la concentración de este parámetro.

En el Gráfico QQ-Plot de PPMDo, los puntos se desvían de la línea roja, indicando que los datos no siguen una distribución normal. Esto sugiere que la contaminación relacionada con este parámetro es irregular y posiblemente afectada por fuentes esporádicas de contaminación.

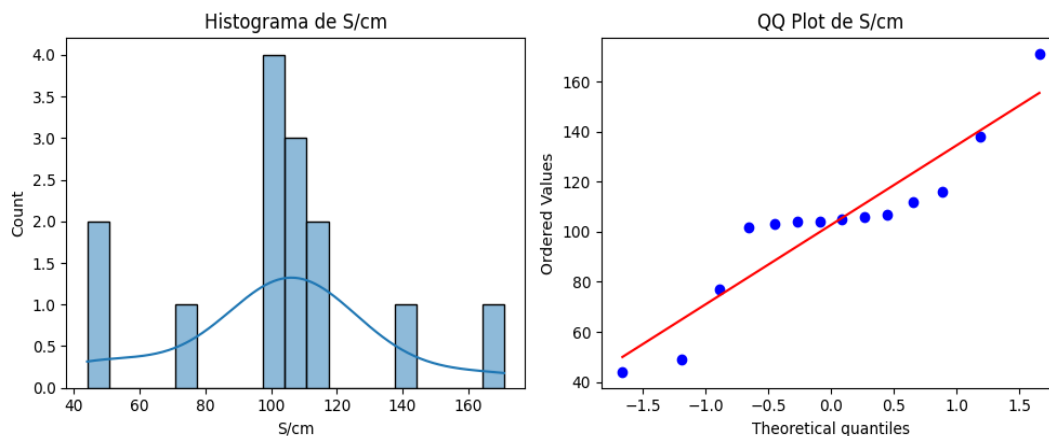


Figura 28 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de S/cm (Conductividad eléctrica del agua)

El Histograma de conductividad eléctrica muestra un rango entre 40 a 165 S/cm y valores más frecuentes entre 90 a 110 S/cm presenta y alta dispersión en el resto de los datos 60 a 150 S/cm con una asimetría positiva, múltiples picos, lo que indica que los valores de conductividad están influenciados por diferentes factores con posibles fuentes de contaminación incluyen descargas industriales, agrícolas o urbanas que modifican la salinidad del agua.

En el Gráfico QQ de S/cm, se observa una desviación de la normalidad, lo que confirma que los valores no siguen una distribución normal. La presencia de valores extremos sugiere eventos de contaminación intermitentes o impactos de diferentes fuentes de contaminación.

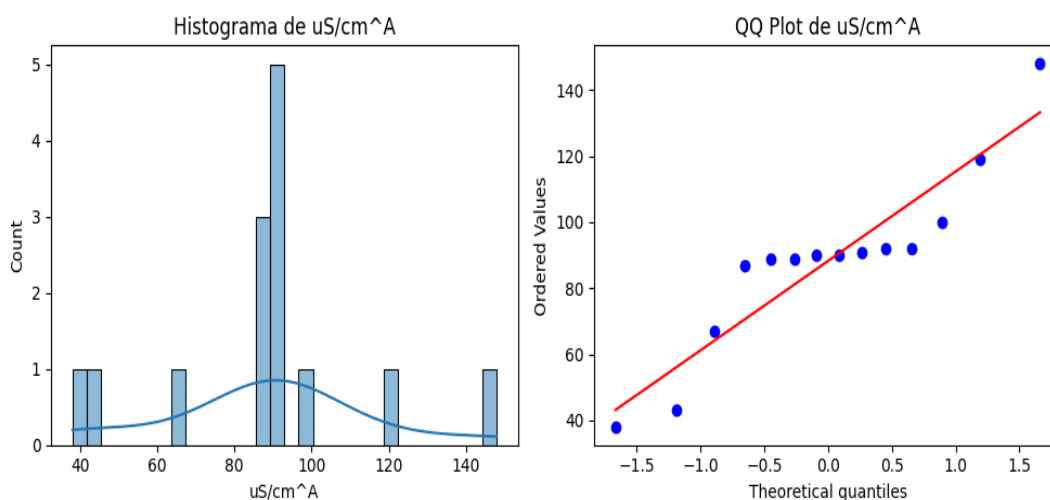


Figura 29 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de uS/cm^A (Variación en la conductividad eléctrica)

El Histograma de $\mu\text{S}/\text{cm}^A$, muestra valores que se concentran en torno a 75 a $100 \mu\text{S}/\text{cm}^A$, y variaciones muy debajo del promedio 40 y muy alejados del promedio $140 \mu\text{S}/\text{cm}^A$, Esto sugiere posibles fluctuaciones en la calidad del agua debido a actividades humanas o eventos ambientales (por ejemplo, lluvias que arrastran contaminantes).

El Gráfico QQ- plot de $\mu\text{S}/\text{cm}^A$, en los cuantiles se observa en la parte central de la diagonal varían entre -0,5 a 0,5 altos +1,5 y bajos -1,5. Expresa que los datos presentan sesgo y no siguen una distribución normal, esto podría significar la presencia de picos de contaminación en ciertos momentos, lo que justifica.

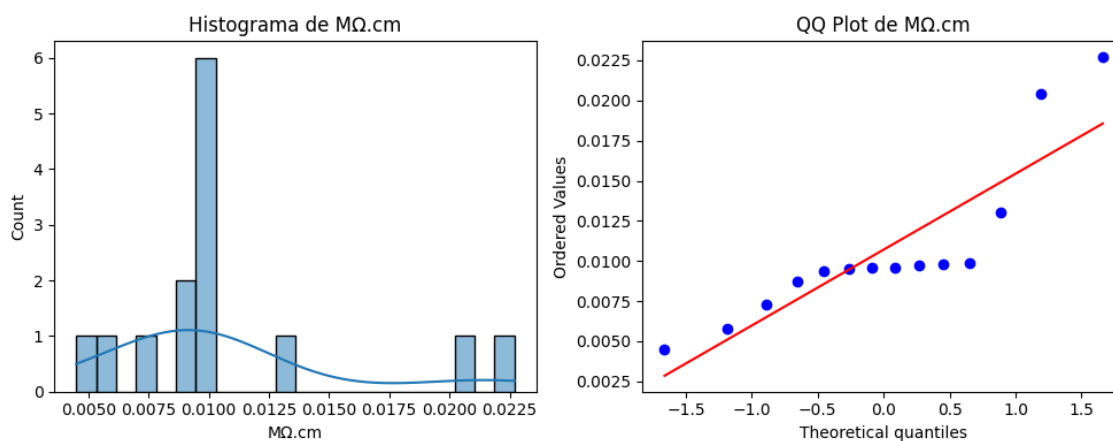


Figura 30 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de $M\Omega \cdot \text{cm}$ (Resistividad)

El Histograma de $M\Omega \cdot \text{cm}$, presenta varios picos, lo que indica una posible multimodalidad los valores normales varían de -0,008 a 0,012 $M\Omega \cdot \text{cm}$, y los puntos no normales están por debajo 0,005 y por encima de 0,020 $M\Omega \cdot \text{cm}$, en el extremo bajo. En el QQ-Plot $M\Omega \cdot \text{cm}$, existen desviaciones significativas en los extremos, lo que sugiere una distribución no normal.

La resistividad $M\Omega\cdot cm$, está relacionada con la conductividad eléctrica; ya que los valores bajos pueden indicar alta presencia de contaminantes, los cuantiles normales varían -0,5 y 0,5 y los vos valores extremos o no normales están fuera de +1,0 y -1,0.

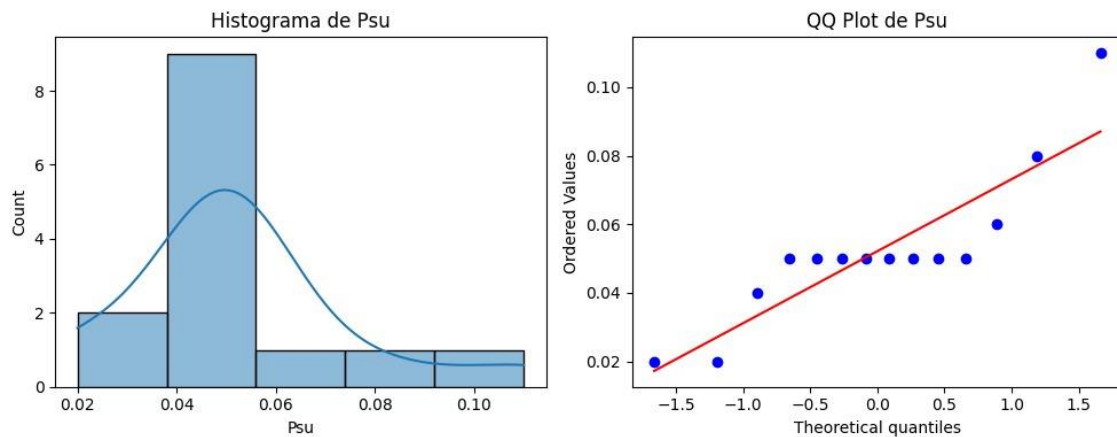


Figura 31 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de Psu (Salinidad)

El Histograma de Psu, tiene un sesgo positivo con valores concentrados entre 0,035 y 0,055, lo que implica baja salinidad debido a su entorno de agua dulce, asimismo se aprecian valores más altos de 0,10 indicando valores atípicos puntuales que pueden ser debido a infiltraciones salinas.

En el QQ-Plot de Psu, nos permite contrastar la distribución de valores obtenidos con una distribución de normalidad teórica, se observa que no sigue completamente la línea de normalidad, sugiriendo datos asimétricos, en el tramo central los puntos siguen una distribución normal en la mayoría de los datos y en los extremos desviaciones bajas, altos y un punto que se aleja significativamente del punto de referencia.

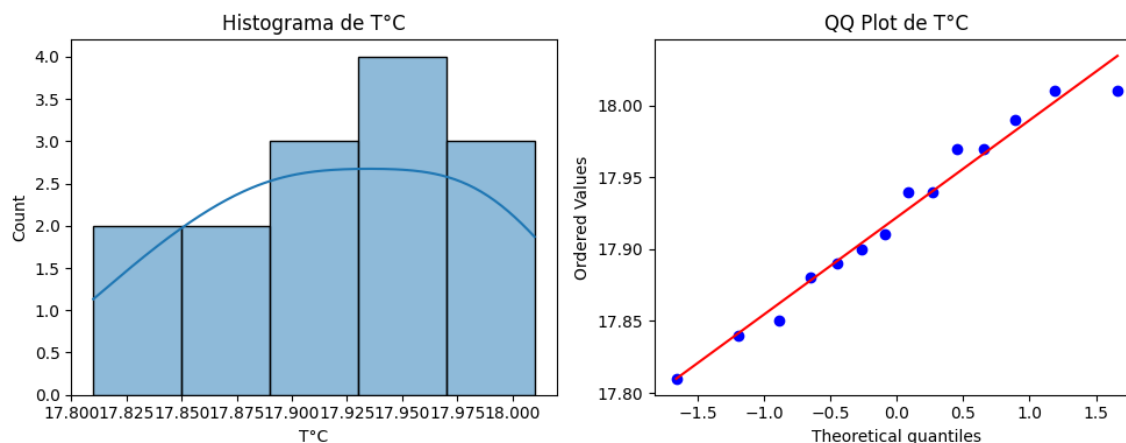


Figura 32 — Histograma y Cuartil Plot (Q-Q Plot) de T°C (Temperatura)

De la Figura 32, el histograma de la temperatura (T°C) muestra una distribución aproximadamente simétrica y cercana a una distribución normal, sin presencia de valores atípicos evidentes, y su variación está de 17,80 a 18,0 °C.

El gráfico QQ-Plot (Quantile-Quantile plot) indica un buen ajuste a la línea de referencia, lo que respalda la suposición de normalidad en los datos, no se consideran puntos atípicos.

La temperatura (T°C) es una variable clave en los sistemas acuáticos, ya que influye directamente en la solubilidad del oxígeno disuelto y en los procesos biológicos que ocurren en los sedimentos, como la descomposición orgánica y la actividad microbiana.

5.2.4. Matriz de correlación de los metales pesados

La matriz de correlación de los parámetros fisicoquímicos, muestran coeficientes de valoración de Pearson entre los patrones. Los valores varían entre -1, 0 y 1, donde:

- **Valores cercanos a 1**, revelan una correlación positiva fuerte. A medida que un parámetro aumenta su concentración, el otro también tiende a aumentar.
- **Valores cercanos a -1**, revelan que a medida que la concentración de ciertos parámetros pesados aumenta, la probabilidad de superar los

límites máximos permisibles en los ECAs también aumenta, puede revelar qué parámetros tienen patrones similares.

- **Valores cercanos a 0** indican que no hay una correlación lineal significativa entre los parámetros analizados.

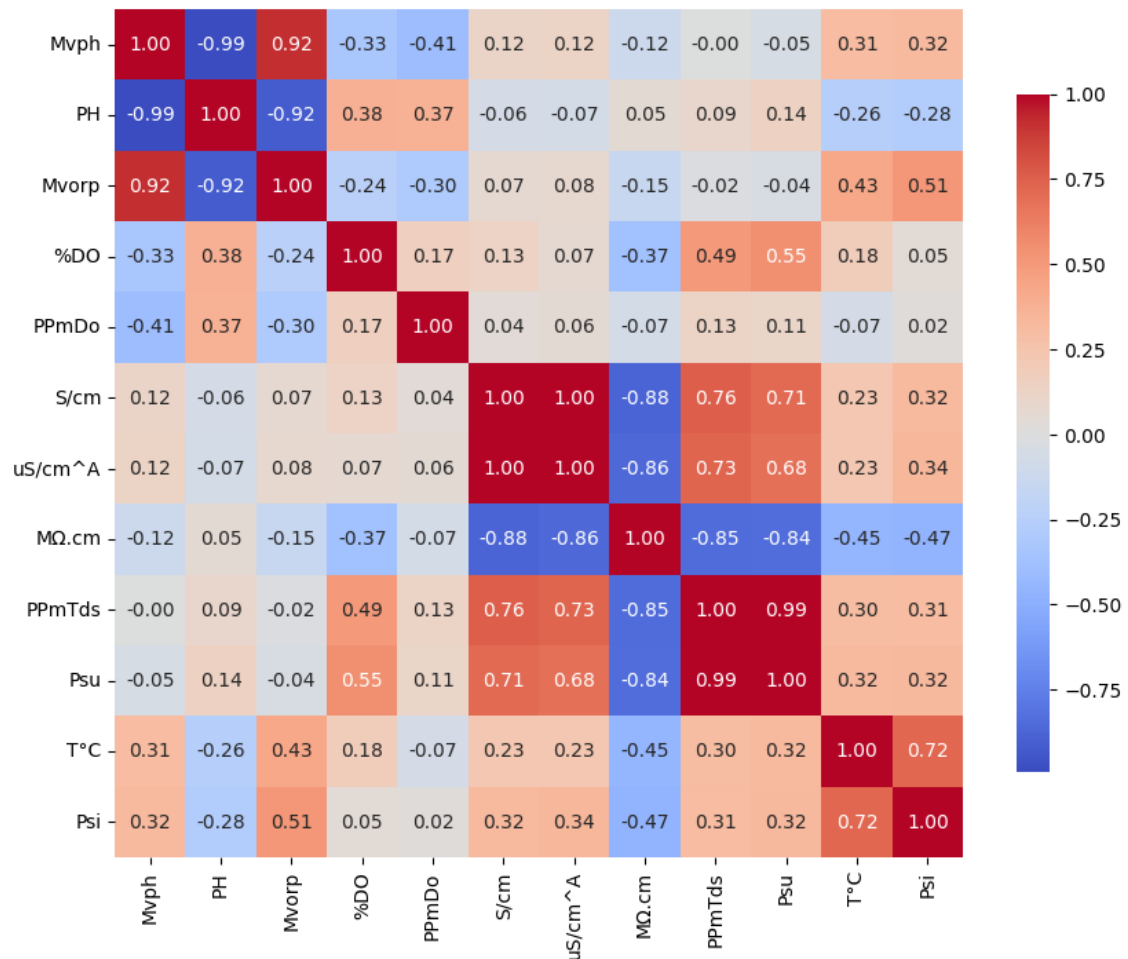


Figura 33 — Matriz de correlación por parámetro fisicoquímicos

La Figura 33, muestra la matriz de correlación por parámetro fisicoquímicos. Del cual, se observa lo siguiente:

5.2.4.1 La correlación del parámetro fisicoquímicos de nivel de acidez o alcalinidad (pH)

- Alta correlación negativa con **MvOrp (-0,92)** y **Mvph (-0,99)**: Indica que a medida que el pH disminuye (medio más ácido), estos parámetros aumentan.



- b) Correlación negativa con $T^{\circ}C$ (-0,26) y Psi (-0,28): Un pH más bajo podría estar asociado con cambios de temperatura y presión, posiblemente afectando la solubilidad de ciertos metales.
- c) Baja correlación con la salinidad (S/cm, 0,06) y conductividad eléctrica (uS/cm^A , -0,07), lo que sugiere que el pH no está directamente relacionado con la concentración de sales disueltas.

5.2.4.2 La correlación de parámetro fisicoquímicos Oxígeno Disuelto (%OD)

- a) Correlación negativa con $M\Omega.cm$ (-0,37): Puede indicar que una menor resistividad del agua está asociada con una menor concentración de oxígeno disuelto, posiblemente debido a contaminación orgánica.
- b) Correlaciones bajas con otros parámetros, lo que sugiere que el oxígeno disuelto no tiene una relación fuerte con los contaminantes metálicos en los sedimentos.

5.2.4.3 La correlación de parámetro fisicoquímicos Conductividad Eléctrica (S/cm, uS/cm^A)

- a) Alta correlación positiva entre S/cm y uS/cm^A (1,00): Como era de esperarse, ambas están altamente relacionadas porque miden la misma propiedad.
- b) Alta correlación negativa con $M\Omega.cm$ (-0,88 y -0,86): Indica que a mayor conductividad (más sales disueltas), menor resistividad del agua.
- c) Alta correlación con $PPmTds$ (0,76 y 0,73) y Psu (0,71 y 0,68): Confirma que la salinidad y los sólidos disueltos totales tienen un fuerte impacto en la conductividad.
- d) Relación baja con metales pesados, lo que sugiere que la conductividad está más influenciada por sales disueltas y no tanto por la contaminación metálica.



5.2.4.4 La correlación de parámetro fisicoquímicos Resistividad ($M\Omega.cm$)

- a) Correlación negativa con S/cm (-0,88), uS/cm^A (-0,86), PPMtds (-0,85), y Psu (-0,84): Se confirma que mayor salinidad y sólidos disueltos reducen la resistividad.
- b) Correlación negativa con $T^{\circ}C$ (-0,45): Indica que una temperatura más alta podría reducir la resistividad del agua.
- c) Correlación negativa con Psi (-0,47): Puede sugerir que la presión también afecta la resistividad, posiblemente debido a la compactación de sedimentos.

5.2.4.5 La correlación de parámetro fisicoquímicos Sólidos Disueltos Totales (PPMtds)

- a) Alta correlación con S/cm (0,76), uS/cm^A (0,73), Psu (0,99): Indica que una mayor concentración de sales en el agua se refleja en valores altos de sólidos disueltos.
- b) Baja correlación con los metales pesados y el oxígeno disuelto, lo que sugiere que la mayoría de los sólidos disueltos en este caso provienen de sales inorgánicas y no de contaminación metálica.

5.2.4.5 La correlación de parámetro fisicoquímicos Salinidad (Psu)

- c) Alta correlación con S/cm (0,71), uS/cm^A (0,68), y PPMtds (0,99): Como era de esperarse, la salinidad está directamente relacionada con la conductividad y los sólidos disueltos.
- d) Baja correlación con %DO, lo que indica que la salinidad no afecta directamente la concentración de oxígeno disuelto.

5.2.4.6 La correlación de parámetro fisicoquímicos Temperatura ($T^{\circ}C$)

- a) Correlación positiva con MvOrp (0,43): Sugiere que la temperatura puede influir en los procesos de oxidación-reducción en los sedimentos.
- b) Correlación con Psi (0,72): Puede estar relacionada con la estabilidad de los sedimentos y la presión a diferentes profundidades.



- c) Correlación negativa con $M\Omega.cm$ (-0,45): Indica que temperaturas más altas pueden reducir la resistividad del agua.

5.2.4.7 La correlación del parámetro fisicoquímicos Presión (Psi)

- a) Alta correlación con $T^{\circ}C$ (0,72): Puede indicar que la presión y la temperatura están relacionadas con cambios en la compactación de los sedimentos.
- b) Correlación positiva con $MvOrp$ (0,51): Indica que la presión puede influir en las condiciones de oxidación-reducción en los sedimentos.
- c) Correlaciones bajas con la mayoría de los otros parámetros, lo que sugiere que la presión no tiene un efecto directo en la contaminación por metales pesados.

5.2.4.8 Aspectos importantes

- a) Las variables de conductividad, resistividad y sólidos disueltos son clave para evaluar la composición del agua en contacto con los sedimentos.
- b) La salinidad y los sólidos disueltos tienen una fuerte relación con la conductividad eléctrica, lo que indica que el sistema está influenciado por sales inorgánicas.
- c) El pH y el potencial de oxidación-reducción ($MvOrp$) pueden influir en la movilidad de los metales pesados, ya que afectan su solubilidad y especiación química.
- d) El oxígeno disuelto no muestra una relación fuerte con los contaminantes metálicos, pero su variabilidad puede indicar zonas con actividad biológica o contaminación orgánica.
- e) Temperatura y presión están relacionadas con cambios en los sedimentos, lo que puede afectar la movilidad de contaminantes.

5.2.5. Correlación de Metales pesados con los parámetros fisicoquímicos

La evaluación se realizó para medir y visualizar la relación lineal entre múltiples variables en un conjunto de datos de las concentraciones de metales pesados . Esta



matriz muestra los coeficientes de correlación entre cada par de variables, ello ayuda a identificar qué variables están relacionadas entre sí y cómo se relacionan.

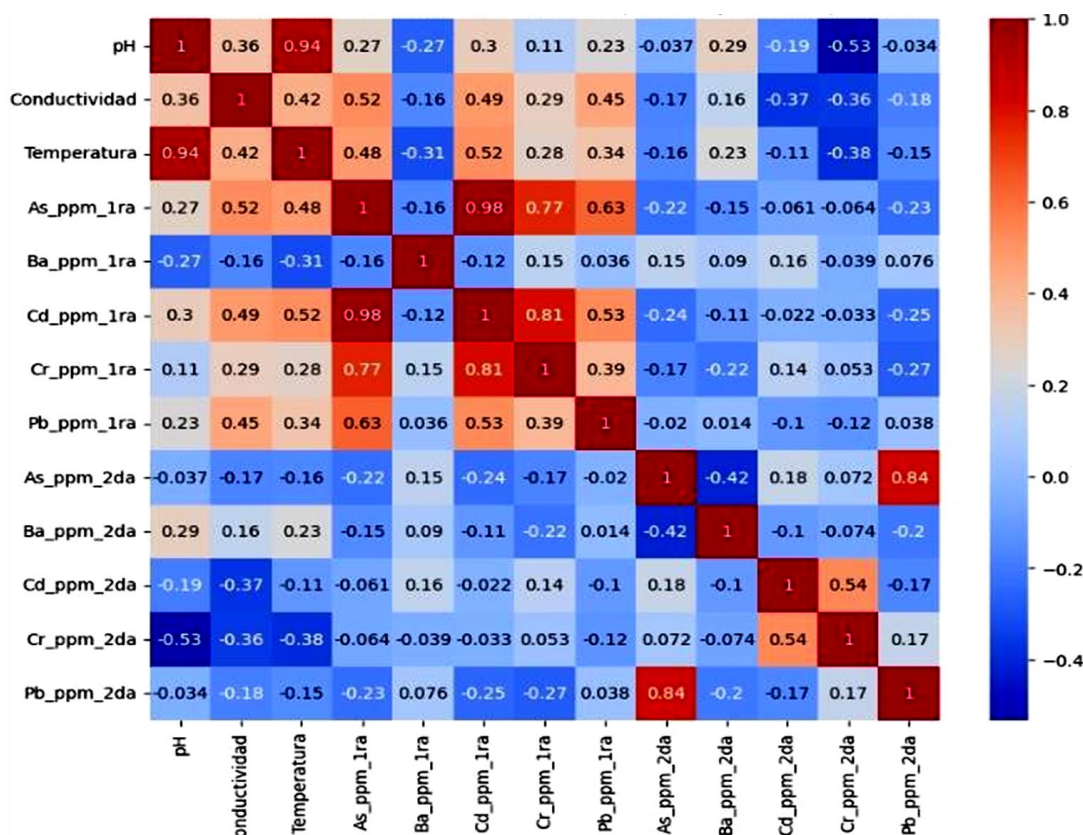


Figura 34 — Matriz de correlación de factores fisicoquímicos y metales pesados

A continuación de la Figura 34, se pueden extraer conclusiones preliminares sobre cómo los valores de pH, conductividad y temperatura influyen en la presencia y concentración de metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba, y se demostró a influencia de los factores como se sigue:

5.2.5.1. Influencia del pH

- **En Pb (Plomo) y As (Arsénico):**

Se observa que, una correlación negativa moderada entre el pH y los metales pesados como el plomo y el arsénico en ambas tomas de muestras. Esto sugiere que niveles más bajos de pH están asociados con concentraciones más altas de Pb y As en los sedimentos.



Límites ECA para suelos de Pb:

- Datos de concentración promedio: Pb: 42,23 ppm
 - Agrícola: 70 ppm
 - Residencial/Parques: 140 ppm
 - Comercial/Industrial/Extractivo: 800 ppm
- Datos de concentración promedio: As: 166,49 ppm
 - Agrícola: 50 ppm
 - Residencial/Parques: 50 ppm
 - Comercial/Industrial/Extractivo: 140 ppm

Los valores elevados de Pb y As sugieren una contaminación significativa en áreas agrícolas y residenciales/parques, superando los límites establecidos y presentando riesgos para la salud pública y el medio ambiente.

5.2.5.2. Influencia de la Conductividad:

- **Ba (Bario) y Cd (Cadmio)**

La conductividad del agua muestra una correlación positiva con el Bario y el Cadmio.

Límites ECA para suelos:

- Datos de concentración promedio: Ba: 238,85 ppm
 - Agrícola: 750 ppm
 - Residencial/Parques: 500 ppm
 - Comercial/Industrial/Extractivo: 2000 ppm
- Datos de concentración promedio: Cd: 1,26 ppm
 - Agrícola: 1.4 ppm
 - Residencial/Parques: 10 ppm
 - Comercial/Industrial/Extractivo: 22 ppm

Aunque las concentraciones de Ba y Cd están dentro de los límites ECA, la correlación positiva con la conductividad indica una posible mayor movilidad de estos metales en áreas con alta conductividad, lo que podría requerir monitoreo adicional.



5.2.5.3. Influencia de la Temperatura

No se observa una correlación clara entre la temperatura y los metales pesados en los datos analizados.

Aunque la temperatura no muestra una correlación directa con los metales pesados, su efecto indirecto a través de la solubilidad de los metales en el agua podría influir en la movilidad y disponibilidad de estos contaminantes.

5.2.5.4. Conclusiones Generales

Los datos indican que los valores de pH y conductividad son factores cruciales al evaluar la presencia de metales pesados en los sedimentos superficiales de la subcuenca del río Antabamba.

La determinación de estos factores fisicoquímicos proporciona una base inicial para la evaluación y análisis del conjunto de datos para hallar la contaminación ambiental a mediano plazo, permitiendo identificar patrones y fuentes potenciales de contaminación que podrían afectar negativamente la calidad del suelo y los ecosistemas acuáticos.

La determinación la calidad de suelo que establece la presencia de metales pesados en los sedimentos superficiales entonces se obtendrá la correlación de la contaminación del ambiente de la subcuenca del río Antabamba en un periodo de mediano plazo.

5.3. La determinación de los límites máximos permisibles de contaminación por metales pesados en los sedimentos superficiales que influyen en calidad de contaminación ambiental a mediano plazo de la subcuenca del río Antabamba.

5.3.1. Análisis de concentraciones de Metales Pesados

Se han registrado concentraciones promedio significativas de metales como:

- Arsénico (As): 166,46 ppm
- Bario (Ba): 238,85 ppm
- Cadmio (Cd): 1,26 ppm o Cromo (Cr): 10,98 ppm

- Plomo (Pb): 42,23 ppm

Estas cifras se comparan con los estándares de calidad ambiental (ECA) para diferentes tipos de suelo (agrícola, residencial/parques, comercial/industrial/extractivo), proporcionando una evaluación inicial de la contaminación presente en la subcuenca del río Antabamba.

5.3.2. Significado Ambiental

La presencia de concentraciones elevadas de metales pesados, especialmente arsénico y plomo, por encima de los límites establecidos para suelos agrícolas y residenciales/parques, indica una contaminación significativa en estas áreas. Esta correlación sugiere un riesgo ambiental considerable, afectando tanto la salud humana como la biodiversidad acuática en el área de estudio.

La evaluación de la calidad del suelo basada en la presencia de metales pesados proporciona una perspectiva crucial sobre los riesgos ambientales a mediano plazo. Estos metales pueden acumularse en los sedimentos, afectar la calidad del agua y la vida acuática, y potencialmente impactar negativamente la salud de las comunidades que dependen del río Antabamba para sus recursos hídricos y actividades agrícolas.

En base a los datos brindados anteriormente, la evaluación de la calidad del suelo mediante el análisis de metales pesados en los sedimentos superficiales proporciona una herramienta esencial para comprender y manejar los riesgos de contaminación ambiental a mediano plazo en la subcuenca del río Antabamba. Así mismo, existe una influencia significativa de las concentraciones de factores fisicoquímico con las concentraciones de metales pesados.

La evaluación de la contaminación de los sedimentos superficiales a mediano plazo, requieren de la realización de proyecciones de concentración de metales (Cr, As, Cd, Ba, Pb) a 3 meses, 6 meses, 9 meses, 1 año, 2 años, y 3 años. Se basa en los datos obtenidos de dos análisis previos de época secas y época de lluvias.

5.3.3. Las proyecciones de la contaminación de los sedimentos superficiales por metales pesados

Las proyecciones se han comparado con los ECAs (Estándares de Calidad Ambiental) establecidos para diferentes tipos de suelo.

Tabla 15 — Promedios y Proyecciones de Concentración de Metales Pesados

Elem entos	Prom. Análisis 1	Prom. Análisis 2	Proy. 3 meses	Proy. 6 meses	Proy. 9 meses	Proy. 1 año	Proy. 2 años	Proy. 3 años
Cr	8,48	13,47	10,98	12,98	14,98	16,98	18,98	20,98
As	210,90	122,07	156,61	136,29	115,97	95,65	85,65	75,65
Cd	1,59	0,93	1,26	1,11	0,96	0,81	0,71	0,61
Ba	270,46	207,24	238,85	225,35	211,85	198,35	188,35	178,35
Pb	42,16	42,30	42,23	42,27	42,30	42,34	42,44	42,54

NOTA: para mejor apreciación ver Figura 35, Figura 36 y Figura 37.

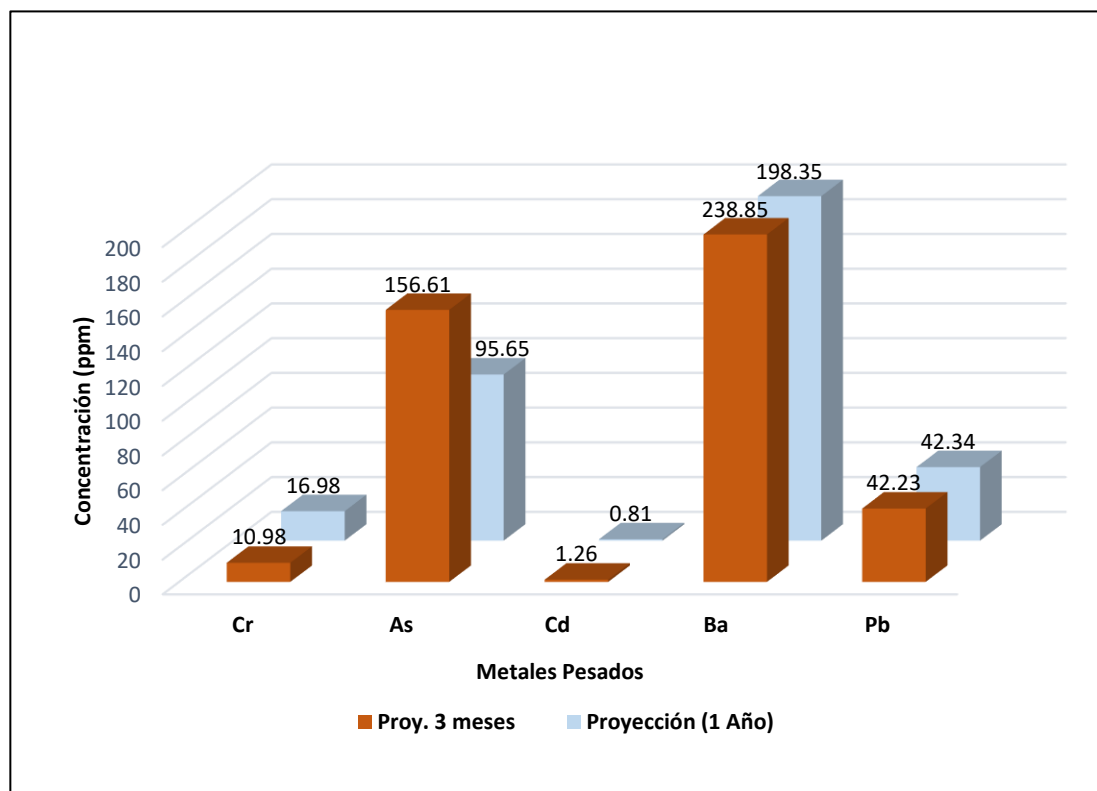


Figura 35 — Proyección Comparativa de la Concentración de Metales Pesados de 3 Meses a 1 Año



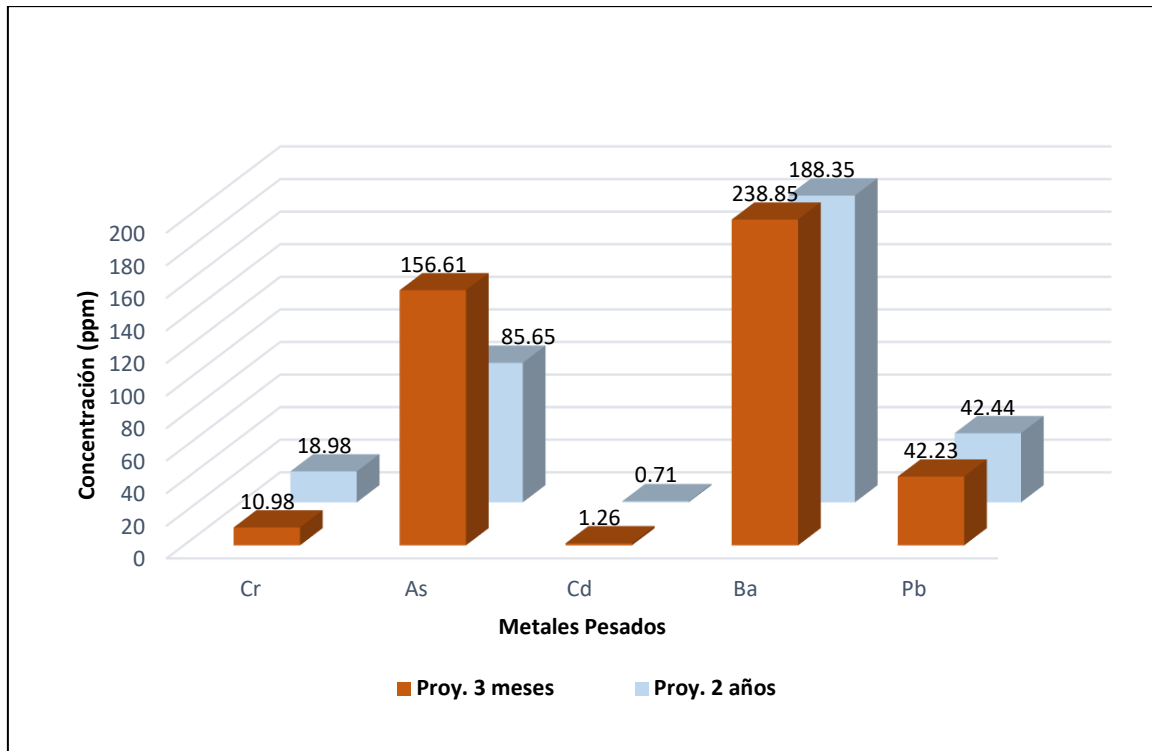


Figura 36 — Proyección Comparativa de la Concentración de Metales Pesados de 3 Meses a 2 Años

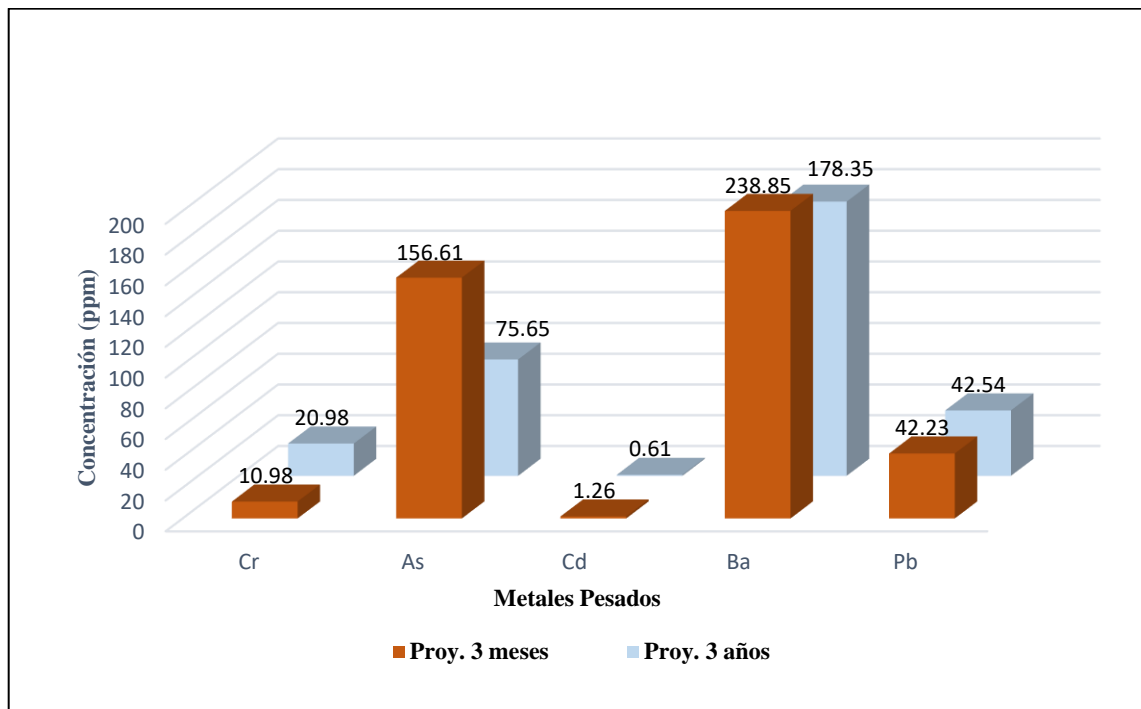


Figura 37 — Proyección Comparativa de la Concentración de Metales Pesados de 3 Meses a 3 Años

5.3.4. Resultados de las proyecciones

Los resultados, permiten visualizar la evolución de las concentraciones de metales pesados en los sedimentos bajo ciertas condiciones, así como las concentraciones de seis meses a nueve meses caso del Cr tiene un aumento anual de 2 ppm y Pb el incremento de concentración es de 0,1 ppm. En el caso del As, Cd, y Ba no es representativo, porque estos elementos tienden a disminuir su concentración lentamente. Por lo cual, es decisivo para la proyección y evaluación ambiental a largo plazo.

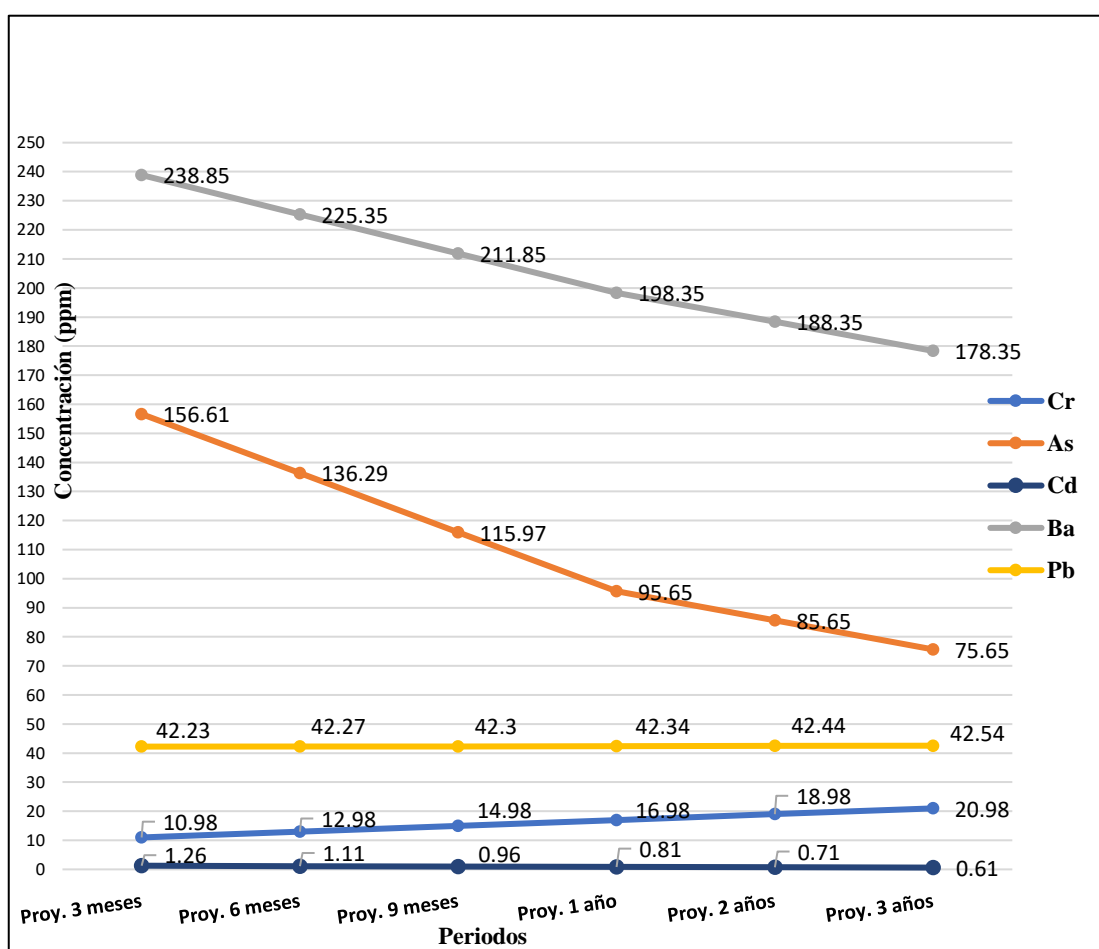


Figura 38 — Proyección de Concentraciones de Metales pesados en los sedimentos superficiales en meses y años.

Como se observa en la Figura 38. El análisis de proyección de concentraciones de metales pesados en los sedimentos superficiales se consideró periodos de tiempo en meses y años, que se ajustan a un modelo de proyección para que funcione en una escala mensual, cada elemento está



representado por un color, el Cr (azul), As (anaranjado), Cd (verde), Ba (rojo) y Pb (morado). Analizando la respectiva figura se tiene que el Cr aumenta ligeramente la concentración en los sedimentos de 8,48 ppm a 20,98 ppm en un tiempo de tres años, asimismo el Pb sigue la misma secuencia de incremento de la concentración en la proyección de tres años 42,16 ppm a 42,54 con menor frecuencia que el Cromo, por lo tanto, se debe peligro y se requiere un monitoreo de dichos elementos. En cambio, el As, Ba y el Cd tienden a una disminución de la concentración en los sedimentos por debajo de los LMP, los cuales no representan peligro alguno.

5.3.5. Las evaluaciones de la contaminación de los sedimentos superficiales por metales pesados

Tabla 16 — Evaluación de Contaminación del Suelo (Proyección a 1, 2 y 3 años)

Elementos	Proy. 1 año (ppm)	Proy. 2 años (ppm)	Proy. 3 años (ppm)	ECA Agrícola (ppm)	ECA Residencial (ppm)	ECA Comercial (ppm)
Cr	16,98	18,98	20,98	400 (No)	400 (No)	1000 (No)
As	95,65	85,65	75,65	50 (Si)	50 (Si)	140 (No)
Cd	0,81	0,71	0,61	1.4 (No)	10 (No)	22 (No)
Ba	198,35	188,35	178,35	750 (No)	500 (No)	2000 (No)
Pb	42,3	42,44	42,54	70 (No)	140 (No)	800 (No)

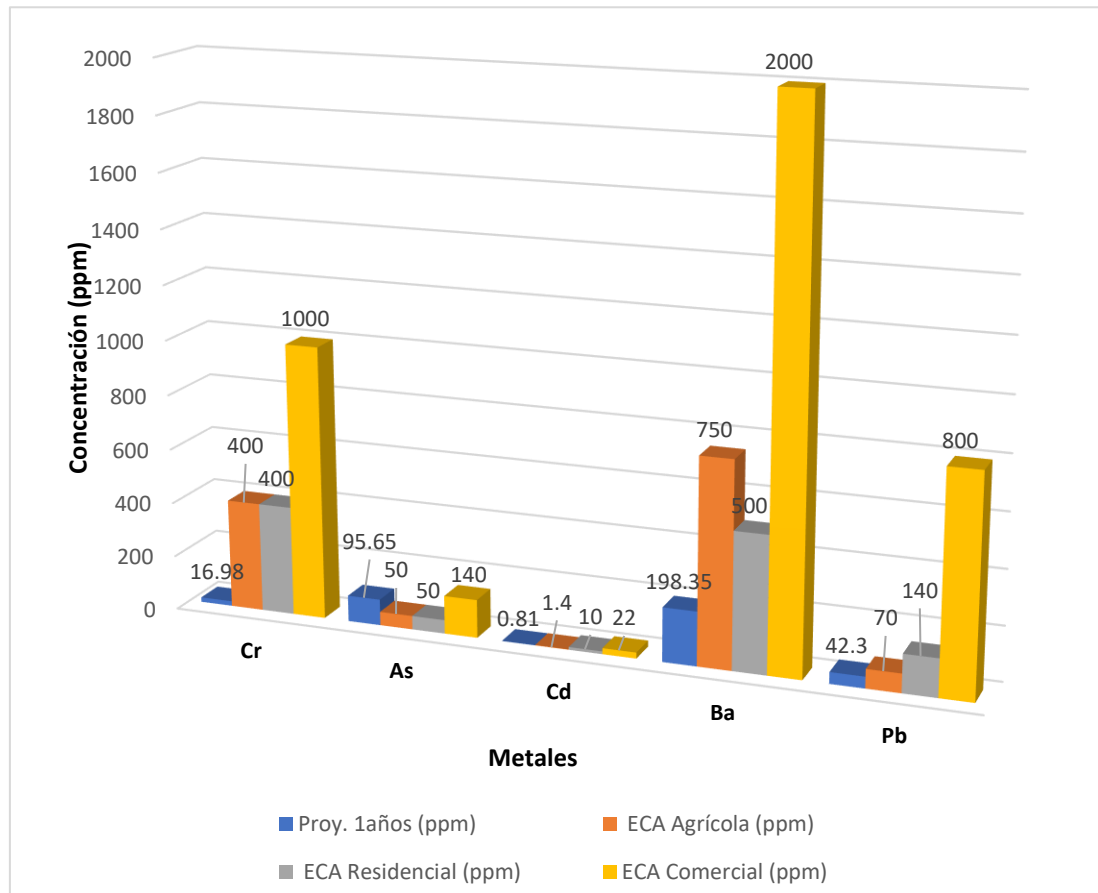


Figura 39 — Evaluación de Contaminación de Sedimentos superficiales (Proyección a 1 año)

En la Figura 39 se puede observar la proyección a un año de metales pesados como el Cr, As, Cd, Ba y Pb en los diferentes ECAS en cuanto a LMP, tanto Residencial, Agrícola y Comercial, como resultado se tiene que la concentración de arsénico (As) presenta un incremento significativo, alcanzando niveles de 95.65 ppm, lo que supera los valores establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental para Suelos (ECAS) en áreas residenciales y agrícolas, que están definidos en 50 ppm. Este aumento indica una preocupación potencial considerando los impactos ambientales y de salud asociados con la exposición a arsénico en la zona de estudio. En cambio, el Plomo (Pb) muestra un ligero incremento en los niveles de plomo (Pb), el cual ha pasado de 42,23 ppm a 42,54 ppm. A pesar de esta variación, es importante destacar que estos valores se mantienen por debajo de los Estándares de Calidad Ambiental de Suelos (ECAS) establecidos para las zonas residencial, agrícola y comercial, lo que indica que no representan un



riesgo inmediato para la salud pública ni para el medio ambiente en estas áreas. Sin embargo, es recomendable continuar el monitoreo de estos niveles para asegurar que no se produzcan incrementos que puedan comprometer la seguridad y calidad de los suelos. Así mismo el Cromo (Cr) 10,98 a 16,98 ppm, sigue un incremento muy bajo y está por muy debajo de los ECAS y para los metales pesados como Cadmio (Cd) y Bario (Ba), no presentan riesgo alguno para los suelos mencionados.

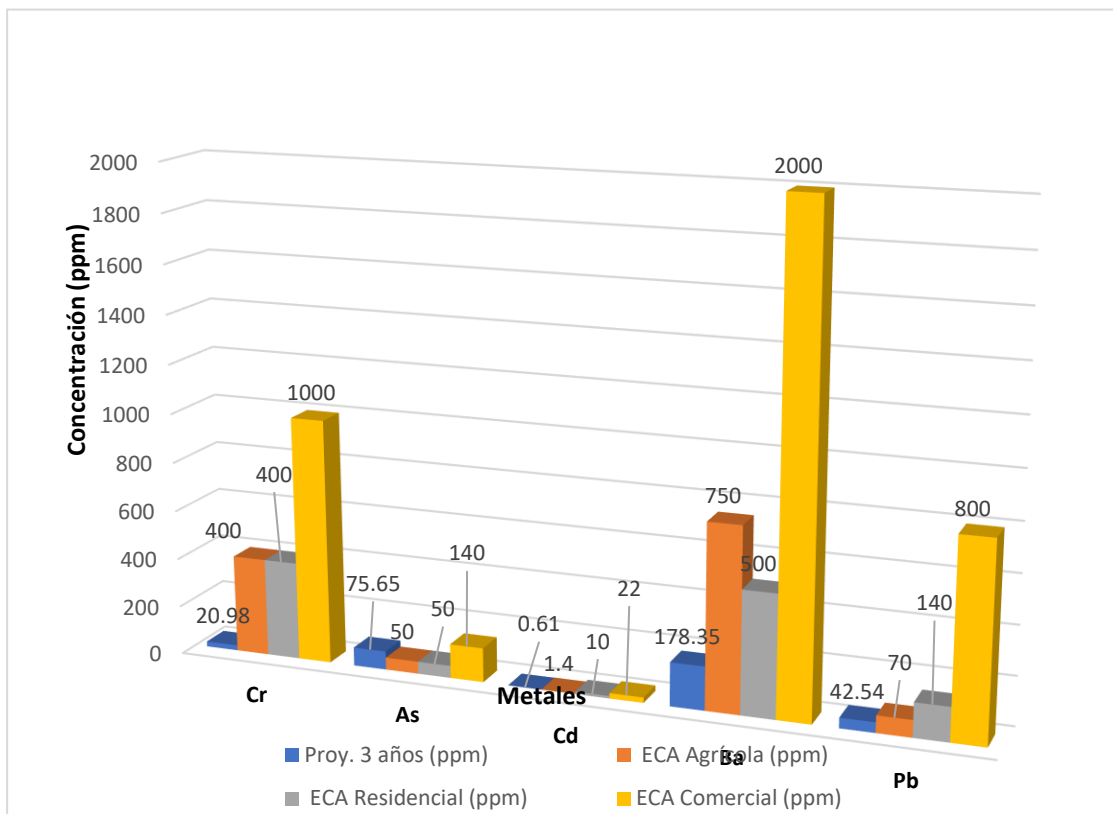


Figura 40 — Evaluación de Contaminación de los Sedimentos superficiales (Proyección a 2 años)

De la Figura 40 resumimos que el Arsénico se mantiene por encima de los ECAS el As sigue por encima de 85,65 ppm referente al residencial y agrícola, el Pb sigue su incremento, pero muy débil de 42,3 a 42,44 ppm y el Cr, también continua con su incremento a 16,98 a 18,98 ppm, y el Cd y el Ba se mantienen por debajo de los ECAS y no presentan riesgo alguno.



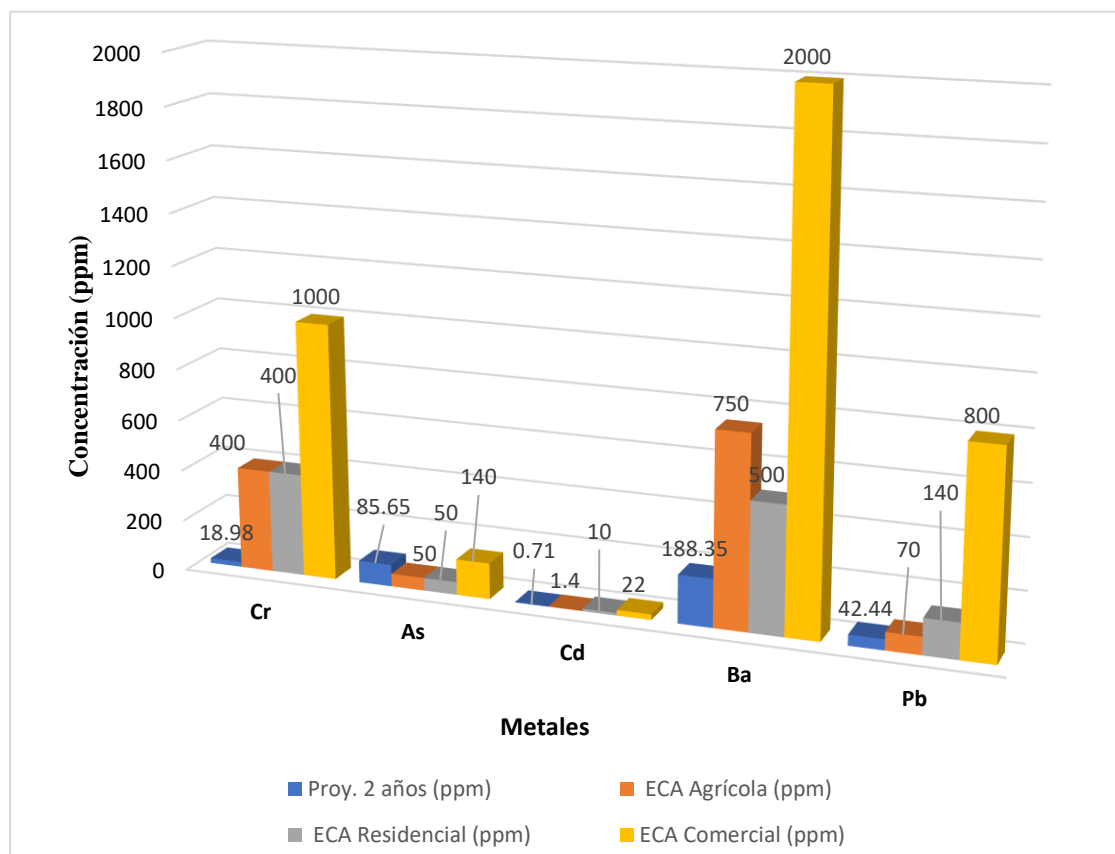


Figura 41 – Evaluación de Contaminación de los Sedimentos superficiales (Proyección a 3 años)

La Figura 41, nos presenta a un corto plazo de tres años la tendencia principalmente de los metales pesados que siguen manteniendo su alta concentración como el As de 75,65 ppm por encima de los ECAS residencial y agrícola, el Pb y el Cr siguen su ascendencia de incremento en su concentración hasta 42,54 y 20,58 ppm respectivamente, pero por debajo de los ECAS.

5.3.6. Proyecciones y evaluaciones de concentración de metales en el suelo

Se realizaron proyecciones para 3 meses, 6 meses, 9 meses y 1 año utilizando los datos de concentración de metales disponibles. Las tendencias observadas incluyen:

- **Proyección a 3 Meses**

Se observa un ligero aumento en las concentraciones de Cr y Pb, mientras que As, Cd y Ba muestran una disminución gradual.

- **Proyección a 6 Meses**



Las concentraciones de Cr y Pb continúan aumentando, mientras que As, Cd y Ba muestran una tendencia descendente más marcada.

- **Proyección a 9 Meses**

Las concentraciones de Cr y Pb siguen aumentando, aunque a un ritmo más lento, mientras que As, Cd y Ba muestran una estabilización o ligera reducción.

- **Proyección a 1 Año**

Las concentraciones de Cr y Pb continúan aumentando, mientras que As, Cd y Ba muestran una tendencia a estabilizarse.

- **Proyección a 2 Años**

Las concentraciones de Cr y Pb continúan aumentando, mientras que As, Cd y Ba muestran una tendencia a estabilizarse.

- **Proyección a 3 Años**

Las concentraciones de Cr y Pb continúan aumentando, mientras que As, Cd y Ba muestran una tendencia a estabilizarse.

Tabla 17 — Proyección de ECA por periodos trimestrales y anuales

Perio- do	Eleme n-to	Proyección (ppm)	Supera ECA Agrícola	Supera ECA Residencial	Supera ECA Comercial
3 meses	Cr	10,98	No	No	Si
	As *	156,61	Si	Si	No
	Cd	1,26	No	No	No
	Ba	238,85	No	No	No
	Pb	42,23	No	No	No
6 meses	Cr	12,98	No	No	No
	As*	136,29	Si	Si	No
	Cd	1,11	No	No	No
	Ba	225,35	No	No	No
	Pb	42,27	No	No	No
9 meses	Cr	14,98	No	No	No
	As*	115,97	Si	Si	No
	Cd	0,96	No	No	No
	Ba	211,85	No	No	No
	Pb	42,30	No	No	No
1 año	Cr	16,98	No	No	No
	As *	95,65	Si	Si	No
	Cd	0,81	No	No	No
	Ba	198,35	No	No	No
	Pb	42,34	No	No	No
2 años	Cr	16,98	No	No	No
	As *	95,65	Si	Si	No
	Cd	0,81	No	No	No
	Ba	198,35	No	No	No
	Pb	42,3	No	No	No
3 años	Cr	16,98	No	No	No
	As *	95,65	Si	Si	No
	Cd	0,81	No	No	No
	Ba	198,35	No	No	No
	Pb	42,3	No	No	No
* Muestran riesgo de contaminación					

5.3.7. Proyección de Contaminación de los sedimentos superficiales

Las proyecciones de los sedimentos superficiales, fueron evaluadas con respecto a los ECAs establecidos para suelos agrícolas, residenciales/parques y comerciales/industriales/extractivos.

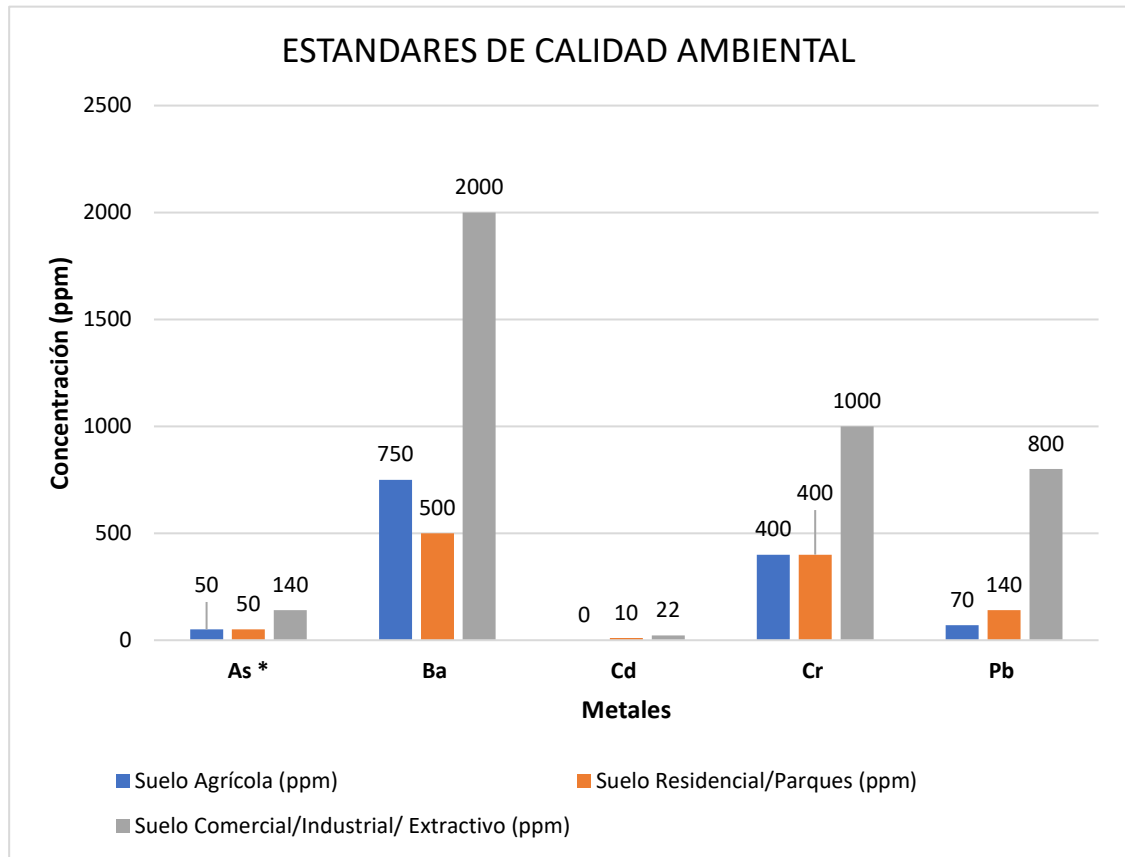


Figura 42 — Estándares de calidad establecidos para suelos



5.3.8. Análisis de variaciones en las concentraciones de metales pesados

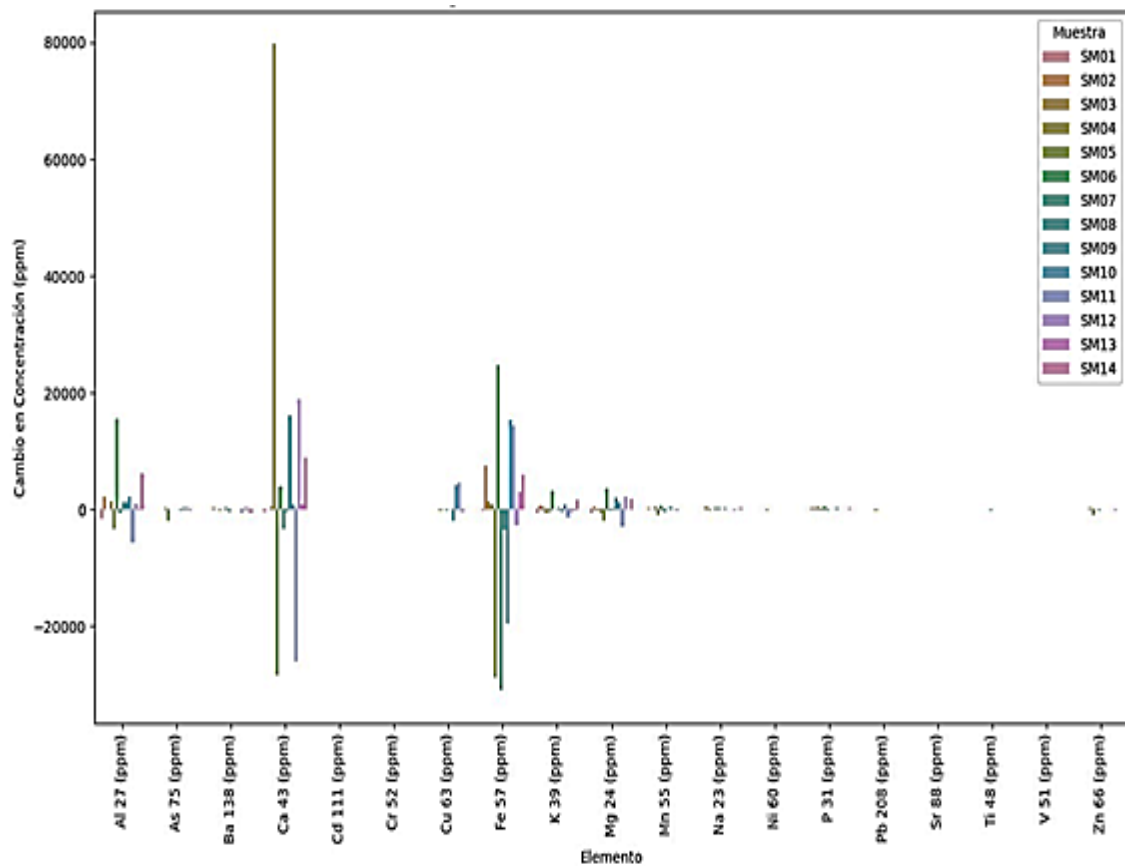


Figura 43 — Análisis de variaciones de concentraciones de metales pesados

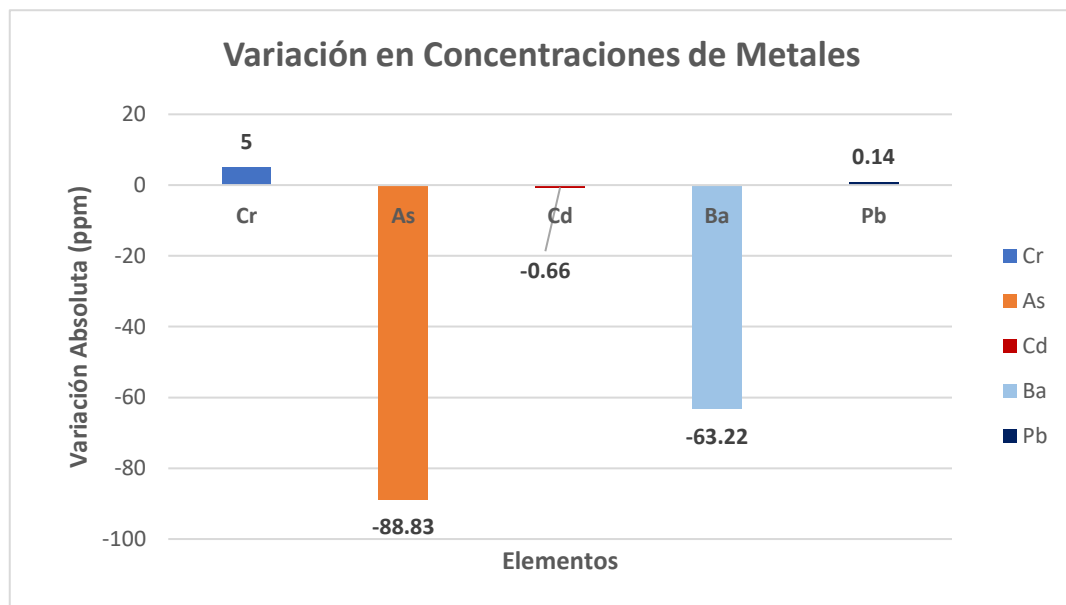


Figura 44 — Análisis de variaciones de concentraciones de metales pesados priorizado



La Figura 44 y la Tabla 17, muestran concentraciones de Metales Pesados por periodos y se muestra las siguientes apreciaciones:

- La comparación de las concentraciones de metales entre los dos periodos de análisis muestra cambios significativos en algunos elementos, lo que puede tener importantes implicaciones ambientales y de salud pública. A continuación, se destacan las conclusiones más relevantes:
- **Cromo (Cr):** La concentración de cromo ha mostrado un aumento notable de la concentración entre los dos análisis desarrollados en diferentes tiempos pasando de un promedio de 8,48 a 13,47 ppm, incrementándose en 4,99 ppm con un porcentaje de incremento de 58.84% entre los dos análisis. Este incremento significativo podría indicar una fuente reciente de contaminación o un cambio en las condiciones ambientales que favorecen la acumulación de cromo en el suelo.
- **Arsénico (As):** A diferencia del cromo, la concentración de arsénico ha disminuido de 210,90 a 122,07 ppm equivalente a 88,83 ppm en un porcentaje de 42,12 %. Esta disminución podría estar relacionada con medidas de mitigación efectivas, cambios en las actividades industriales, o una posible dilución en el ambiente.
- **Cadmio (Cd):** La concentración de cadmio también ha disminuido, con una variación absoluta de 1,59 a 0,93 ppm en un 0,66 ppm, equivalente a una reducción del 41,51%. Aunque esta reducción es significativa, el cadmio sigue siendo un elemento tóxico, por lo que su presencia en el suelo debe seguir siendo monitoreada.
- **Bario (Ba):** Se observa una disminución en la concentración de bario 270,46 a 207,24 ppm en un 63,22 ppm equivalente a 23,37 %, lo que podría indicar una menor actividad de las fuentes que lo generan o la implementación de estrategias de control de contaminación.
- **Plomo (Pb):** La concentración de plomo ha mostrado una variación mínima, con un aumento de 42,16 a 42,30 ppm en un 0,14 ppm con un porcentaje de 0,33%. Esto sugiere que las condiciones ambientales o las

fuentes de plomo han permanecido relativamente estables entre los dos periodos de análisis.

5.3.9. Implicaciones y Recomendaciones:

- **Monitoreo Continuo:** Dado que algunos elementos como el cromo han mostrado un **aumento** significativo, es crucial continuar el monitoreo de estos metales para detectar cualquier tendencia creciente que pueda representar un riesgo ambiental o para la salud humana.
- **Investigación Adicional:** Se recomienda llevar a cabo estudios adicionales para identificar las fuentes de contaminación que están contribuyendo a las variaciones observadas, especialmente para el cromo y el arsénico, dado el comportamiento contrastante de sus concentraciones.
- **Medidas Correctivas:** En casos donde se observe un aumento de concentraciones de elementos tóxicos, como el cromo, se deben considerar medidas correctivas inmediatas para mitigar la posible contaminación y sus efectos adversos.

En conclusión, aunque algunos metales han mostrado una disminución en su concentración, el aumento en otros como el cromo destaca la necesidad de una vigilancia constante y de una evaluación continua de las estrategias de mitigación implementadas.

5.3.10. Excedencias de los ECA

Para analizar el número de excedencias, primero debemos entender qué significa "excedencia" en el contexto de las concentraciones de metales en el suelo. Una excedencia ocurre cuando la concentración de un metal en una muestra supera un límite establecido, como un criterio de calidad ambiental o un estándar regulatorio, como las Especificaciones de Calidad de Agua (ECA) que se mencionó anteriormente.

Dado que los datos provistos muestran concentraciones promedio de distintos metales en dos análisis separados, podríamos realizar un análisis de excedencias comparando estas concentraciones con los límites máximos permitidos establecidos por las ECAS.

5.3.11. Cálculo de excedencias

Elementos a ser evaluados en cuanto a excedencias:

Tabla 18 — Promedios de análisis y límites máximos permisibles

Elemento	Promedio Análisis N°1	Promedio Análisis N°2	LMP(ppm)
Cr 52	8.48	13.47	10
As 75	52.58	122.07	100
Cd 111	0.82	0.93	1,0
Ba 138	253.61	207.24	200
Pb 208	23.43	42.30	40

Tabla 19 — Análisis de excedencias de los límites máximos permisible

Elemento	LMP (ppm)	Análisis N°1	¿Excede?	Análisis N°2	¿Excede?
Cr	10	8.48	No	13.47	Si
As	10	52.58	Si	122.07	Si
Cd	1,0	0.82	No	0.93	No
Ba	200	253.6 1	Si	207.24	Si
Pb	40	23.43	No	42.30	Si

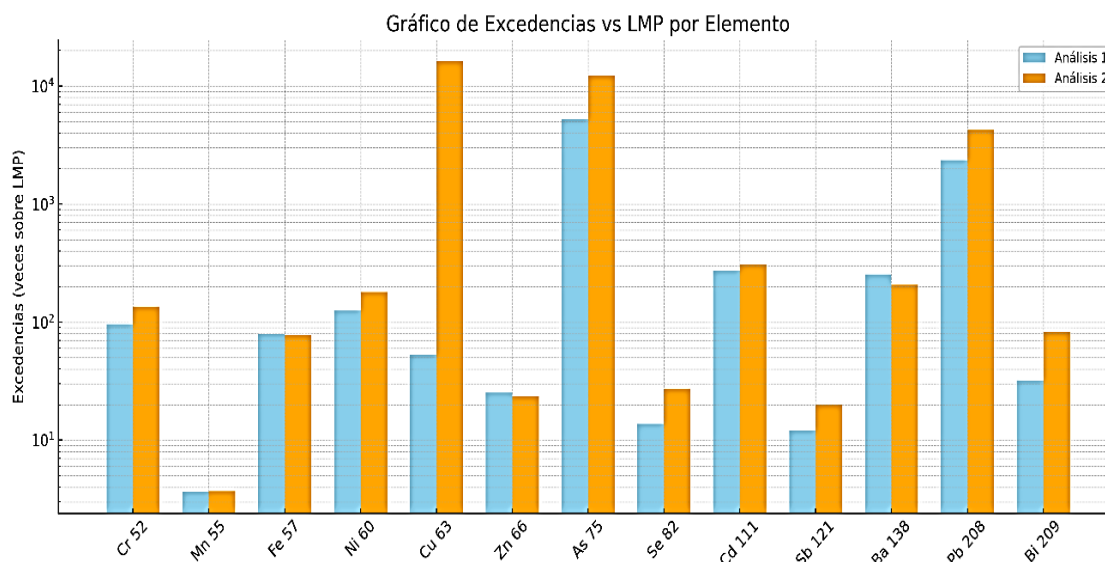


Figura 45 — Primer y segundo análisis de excedencias de concentraciones de metales pesados priorizados

La Figura 45, Eje Y en escala logarítmica, para mostrar claramente tanto elementos con límites muy bajos (como Cd o Pb) como los que están en miles, barras grises: LMP por elemento, barras celestes y naranjas: valores promedio del Análisis 1 y Análisis 2 respectivamente. Donde la barra azul o naranja está por encima de la gris, hay excedencia.

5.3.11. Análisis de excedencias

El análisis muestra que algunos metales, como el Arsénico, el Bario, exceden consistentemente los límites establecidos en ambos análisis, lo cual es motivo de preocupación. Esto sugiere la necesidad de un monitoreo continuo y la implementación de medidas de mitigación para reducir estas concentraciones y evitar riesgos para la salud y el medio ambiente. Otros metales, como el Cromo y el Plomo, muestran excedencias solo en uno de los análisis, lo que indica que, aunque todavía son problemáticos, podrían estar sujetos a variabilidad en las condiciones ambientales o en la fuente de contaminación y el Cadmio no presenta riesgo alguno por que se encuentra muy debajo de los LMP.

5.3.12. Modelo de predicción

El modelo de predicción se realiza con 3 algoritmos y muestran los siguientes resultados:

- a) **XGBoost:** muestra la efectividad del modelo en clasificar como "Permisible" o "Contaminado" los metales pesados, mostrando precisión del 100% en todos los casos analizados. Los verdaderos positivos y negativos indican alta exactitud en la clasificación, validando la eficacia del modelo en contextos donde es crucial minimizar errores de clasificación.
- b) **Bagging:** muestra un rendimiento excelente (100% de precisión) para Cr, As, Pb y Ba, mientras que el Cd alcanza un 75% de precisión, indicando posibles mejoras. Los errores ocurren en la clasificación de casos "Contaminado" como "Permisible".
- c) **Voting (XGBoost+Bagging):** técnica de aprendizaje automático que combina varios modelos como XGBoost y el Bagging y revela un rendimiento excelente (100% de precisión) para todos los MP. La matriz muestra un rendimiento alto (100% de precisión) para los metales pesados Cr, Cd, As, Pb y Ba, no existe errores en la clasificación de casos "Contaminado" para Cr, como "Permisible" para todos los casos restantes de los metales pesados

5.3.13. Validación del modelo de Voting de los metales pesados para la contaminación Agrícola

Para la validación del modelo de Voting, debemos entender primero la matriz de confusión que es una herramienta que se usa para evaluar el rendimiento de un modelo de clasificación, asimismo como se comparan las predicciones del modelo con los valores reales.



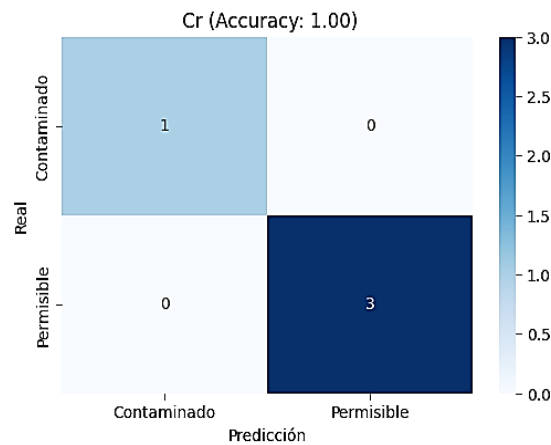


Figura 46 — Matriz de Confusión para el metal Cromo (Cr)

En la Figura 46, en la matriz de confusión para el Cr vemos dos clases: Contaminado y Permisible, los valores indican cuántas veces el modelo clasificó correctamente o incorrectamente esas clases, también mencionamos que en el eje vertical se presenta lo que realmente era la muestra y en el eje horizontal representa la predicción lo que el modelo predijo, contaminación por Cr en suelo agrícola, una (1) muestra era realmente y fue correctamente clasificada como contaminada, las 3 muestras eran permisibles y fueron correctamente clasificadas como permisibles y cero (0) no hubo errores de clasificación.

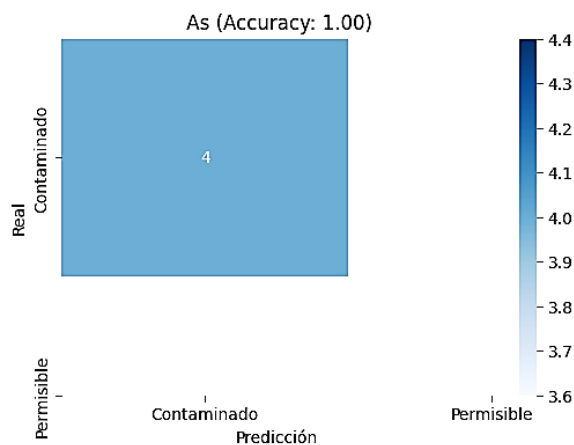


Figura 47 — Matriz de Confusión para el metal Arsénico (As)

De la Figura 47, solo se evaluaron 4 muestras en el caso del As, las 4 eran realmente contaminadas y el modelo predice 4 como contaminadas, en esta evaluación no hubo muestras permisibles por eso el grafico muestra la fila de permisibles en cero (o) está vacía. Como resultado se indica una precisión del 100 %

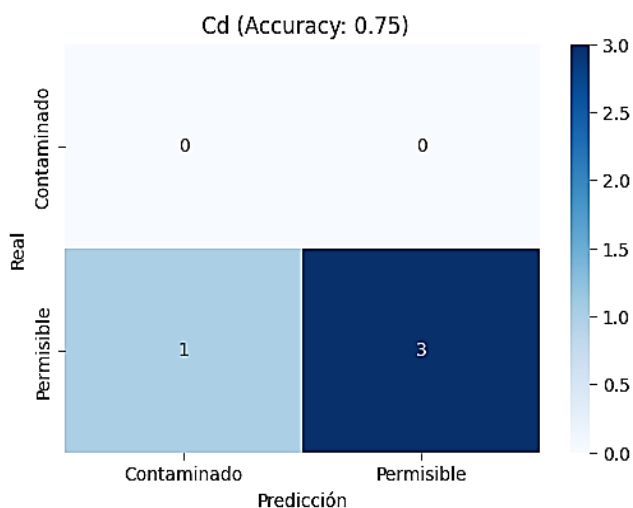


Figura 48 — Matriz de Confusión para el metal Cadmio

La Figura 48, muestra una exactitud del 75%, con tres muestras permisibles clasificadas correctamente y un falso positivo, en el que una muestra permisible fue clasificada como contaminada. En este conjunto de evaluación no se presentaron casos contaminados, lo cual coincide con los niveles bajos de Cadmio observados en el área de estudio

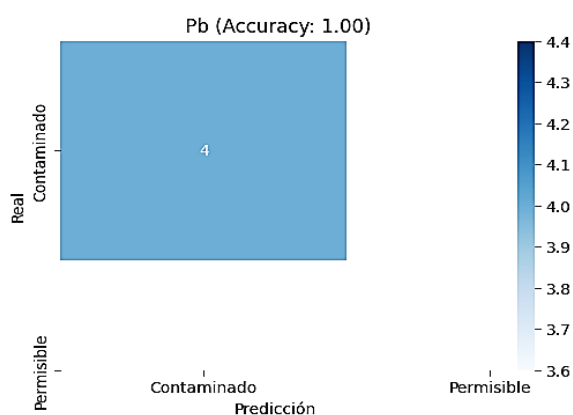


Figura 49 — Matriz de Confusión para el metal Plomo (Pb)

De la Figura 49, solo se evaluaron 4 muestras en el caso del Pb, las 4 eran realmente contaminadas y el modelo predice 4 como contaminadas, en esta evaluación no hubo muestras permisibles por eso el grafico muestra la fila de permisibles en cero (0) está vacía. Como resultado se indica una precisión del 100 %

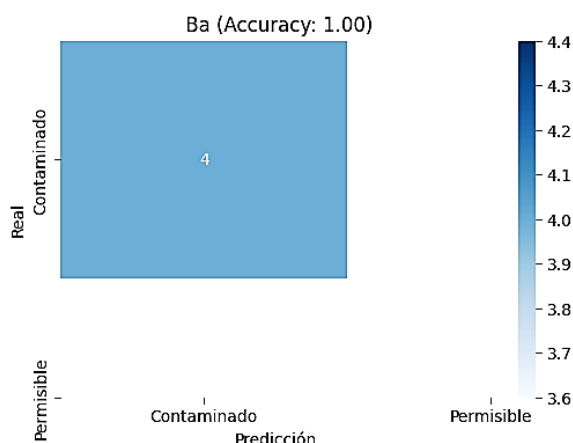


Figura 50 — Matriz de Confusión para el metal Bario (Ba)

De la Figura 50, solo se evaluaron 4 muestras en el caso del Ba, las 4 eran realmente contaminadas y el modelo predice 4 como contaminadas, en esta evaluación no hubo muestras permisibles por eso el grafico muestra la fila de permisibles en cero (o) está vacía. Como resultado se indica una precisión del 100 %.

Tabla 20 — Resultados de la validación del modelo

Metal	Precisión	Comentario	Resultados y recomendación
Cromo (Cr)	1,00	El modelo demuestra una precisión perfecta para la clasificación de muestras contaminadas y permitidas por cromo. No se detectan errores , lo que sugiere que las predicciones son	Falsos negativos (FN): 0 Falsos positivos (FP): 0 Sensibilidad y Especificidad: 100% para ambas clases. El modelo puede considerarse adecuado para decisiones preliminares sobre la calidad del



		confiables dentro del conjunto de prueba utilizado.	agua/suelo frente al cromo. Aun así, se recomienda validación cruzada adicional y pruebas en campo real.
Cadmio(Cd)	1,00	El modelo no detectó correctamente ningún caso de contaminación por cadmio. Aunque clasificó correctamente 3 de 4 muestras permisibles, falló al identificar la muestra permisible como contaminada, lo que genera acciones innecesarias o costos adicionales, por lo que se debería confirmar estos casos con análisis complementarios.	<p>Falsos negativos (FN) : 0 casos</p> <p>Falsos positivos (FP) : 1 caso permisible fue clasificado como contaminado.</p> <p>Sensibilidad (Recall) para clase contaminada: 0.00 → el modelo no está captando los casos críticos.</p> <p>Este modelo no es confiable para detectar contaminación por Cd . Se requiere ajuste de umbrales, mayor cantidad de datos contaminados para entrenamiento o técnicas de equilibrio</p>
Bario (Ba)	1,00	también presentó una única clase en el conjunto de entrenamiento, por lo tanto, no se generó una matriz de confusión multiclasa válida.	<p>Falsos negativos (FN): 0</p> <p>Falsos positivos (FP): 0</p> <p>Sensibilidad y Especificidad: 100% para ambas clases.</p> <p>Se detectó una única etiqueta en <i>y_true</i> y <i>y_pred</i>. Para obtener una representación adecuada en la matriz de confusión, se sugiere especificar todas las etiquetas con el parámetro <i>labels</i></p>
Plomo (Pb)	1,00	Al igual que con As, el modelo fue entrenado con una sola clase para Pb, lo que impide evaluar el rendimiento del modelo mediante una matriz de confusión multiclasa.	<p>Falsos negativos (FN): 0</p> <p>Falsos positivos (FP): 0</p> <p>Sensibilidad y Especificidad: 100% para ambas clases.</p> <p>Se encontró una sola etiqueta en <i>y_true</i> y <i>y_pred</i>. Considere usar el</p>



			parámetro <i>labels</i> para reflejar todas las clases posibles.
Arsénico (As)	1,00	El conjunto de entrenamiento solo contiene una clase para el Arsénico. Esto significa que todas las muestras tienen la misma etiqueta (por ejemplo, todas están clasificadas como "contaminadas" o "no contaminadas"), por lo que no se puede generar una matriz de confusión tradicional con múltiples clases.	Falsos negativos (FN): 0 Falsos positivos (FP): 0 Sensibilidad y Especificidad: 100% para ambas clases. Se detectó una única etiqueta en <i>y_true</i> y <i>y_pred</i> . Para obtener una matriz de confusión con la forma correcta, se recomienda utilizar el parámetro <i>labels</i> para incluir todas las clases conocidas.

En las matrices de confusión y en el resumen de la Tabla 20, dan resultados de exactitud del 100 %, excepto para el Cadmio que muestra 75 %, precisiones para el Cr (1), Cd (0,75), As (1), Pb (1), Ba (1). Ver Figura 57.

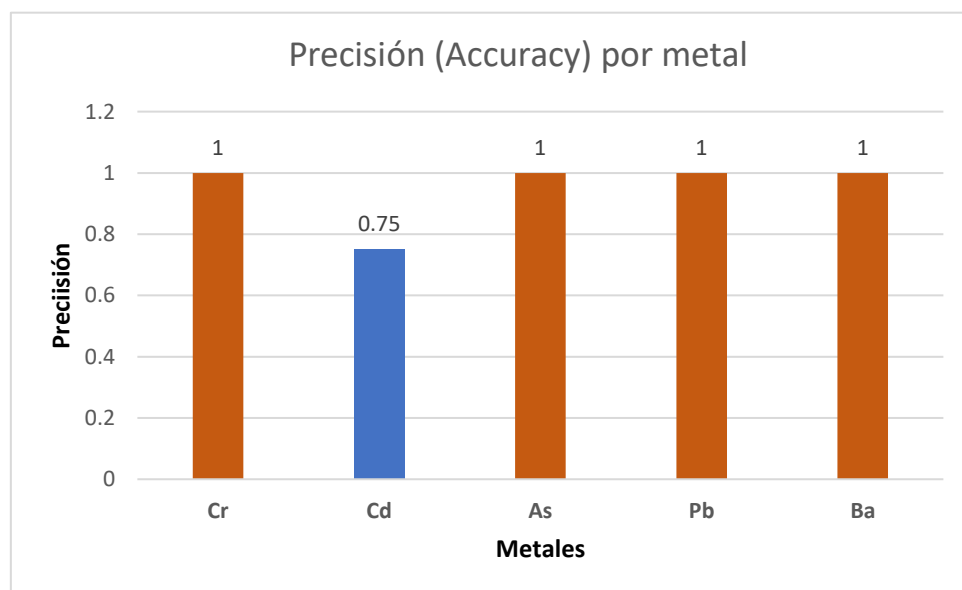


Figura 51 — Precisión de todos los metales pesados



5.3.13.1. Validación Cruzada

La validación cruzada de los algoritmos tienen los siguientes resultados;

- XGBoost - Precisión media 0,5375 (validación cruzada: 0,70)
- Bagging - Precisión media 0,5375 (validación cruzada: 0,70)
- Voting (XGBoost + Bagging) - Precisión media 0,5625 (validación cruzada: 0,75).

El análisis de resultados tanto XGBoost como Bagging presentan una precisión promedio idéntica de 0,5375, con un rendimiento en validación cruzada de 0,70, lo que sugiere que ambos algoritmos están logrando un desempeño similar en términos de ajuste y generalización en los datos de prueba.

Por otro lado, el modelo de Voting, que combina las salidas de XGBoost y Bagging, muestra una mejora notable en la precisión promedio, alcanzando un 0,5625, así como un incremento en la validación cruzada a 0,75. Esto indica que la combinación de los dos modelos potencia la capacidad predictiva, posiblemente al aprovechar las fortalezas de ambos algoritmos y reducir el riesgo de sobreajuste. Ver Figura 58.

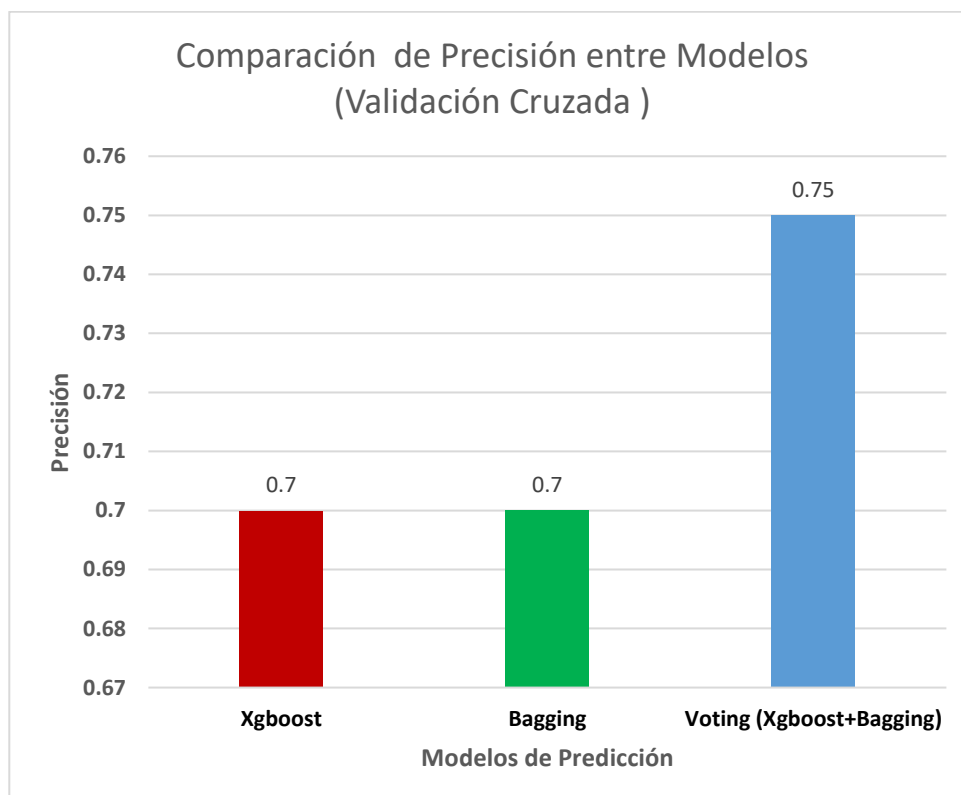


Figura 52 — Comparación de precisión de los modelos



5.3.13.2. Predicción futura a mediano plazo (36 meses) de Cromo

El comportamiento de la predicción por meses sugiere que, a corto y mediano plazo, ciertos metales pesados como el Cr representan un riesgo ambiental pronunciado, mientras que otros, como el Cd, As, Pb o Ba podrían convertirse en un problema a largo plazo debido a su crecimiento pausado en la zona de la sub cuenca del río Antabamba.

La determinación de contaminación a mediano plazo de 3 años con los algoritmos Xgboost, Baggin y Voting. Del cual, resalta la contaminación por el metal pesados Cr: "Cromo". Por lo tanto, el suelo no cumple con los ECAs permisibles para uso 'agrícola' ni para uso 'industrial'. Se realizará una evaluación de contaminación agrícola, ya que las muestras analizadas del río Antabamba se utilizan para actividades agrícolas en la zona.

Se debe tener en cuenta la interpretación de los gráficos 59, 60 y 61: presenta la interrelación de la predicción de la contaminación por 36 meses en el eje X y por otra parte el eje Y representa si una zona está contaminada o no, con valores de (1) significan que hay presencia de contaminación (según los criterios del modelo), y el valor de cero (0) significa que no hay presencia de contaminación, Las líneas de colores representa un metal específico en un tipo de suelo (industrial, agrícola y/o comercial).

A. **Con el algoritmo machine learning XGboost**, se tiene las siguientes precisiones:



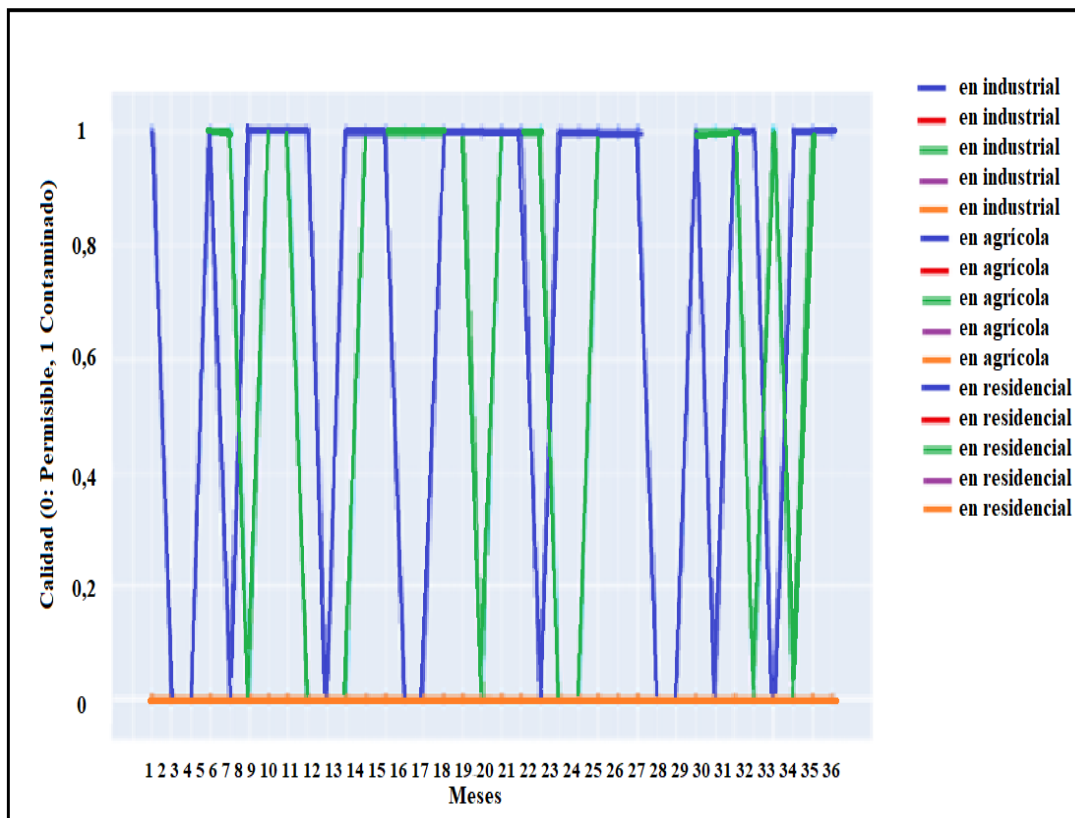


Figura 53 — Predicción de contaminación por 36 meses con el algoritmo machine learning XGBoost.

La Figura 53, en el análisis de contaminación de tres zonas (industrial, agrícola y residencial), se observa que el cromo (Cr) presenta variabilidad temporal en su concentración, evidenciando contaminación intermitente en las zonas industrial y agrícola, y un riesgo bajo en la zona residencial, donde solo alcanza ocasionalmente el valor 1. Según el modelo XGBoost, el Cr es el único metal que muestra riesgo de contaminación constante o intermitente proyectado en el suelo industrial en los tres tipos de uso de suelo; en el suelo agrícola, tanto el Cr como el plomo (Pb) presentan valores intermitentes que sugieren posibles focos de riesgo, mientras que en el suelo residencial el Cr se encuentra ocasionalmente en niveles de bajo riesgo. Los metales cadmio (Cd), arsénico (As) y bario (Ba) se mantienen en cero en las zonas industrial y residencial, indicando que no representan un riesgo significativo, y aunque en la zona agrícola también se registran ceros para Cd, As y Ba, el Pb presenta valores intermitentes, sugiriendo un riesgo de contaminación por plomo en esta área. Por lo tanto, se sugiere



dar seguimiento y control prioritario al Cromo, especialmente en zonas industriales y agrícolas.

Los análisis de laboratorio finalizaron, en el mes de setiembre del 2 023. Por lo cual, se considera agosto de 2 023 como el 'mes 1' y a los meses siguientes se les asignan números consecutivo del 1 al 36. A partir de ello se tiene resultados, como son :

- 2, 3, 7, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 24, 32, 33, 36 son 17 meses que exceden los LMP de ECAS para suelo agrícola.
- 1, 4, 5, 6 , 9, 11, 13, 17, 18,23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 34 y 35 son 19 meses que no exceden los LMP de ECAS para suelo agrícola.

B. Con el algoritmo machine learning Bagging, se tiene las siguientes precisiones:

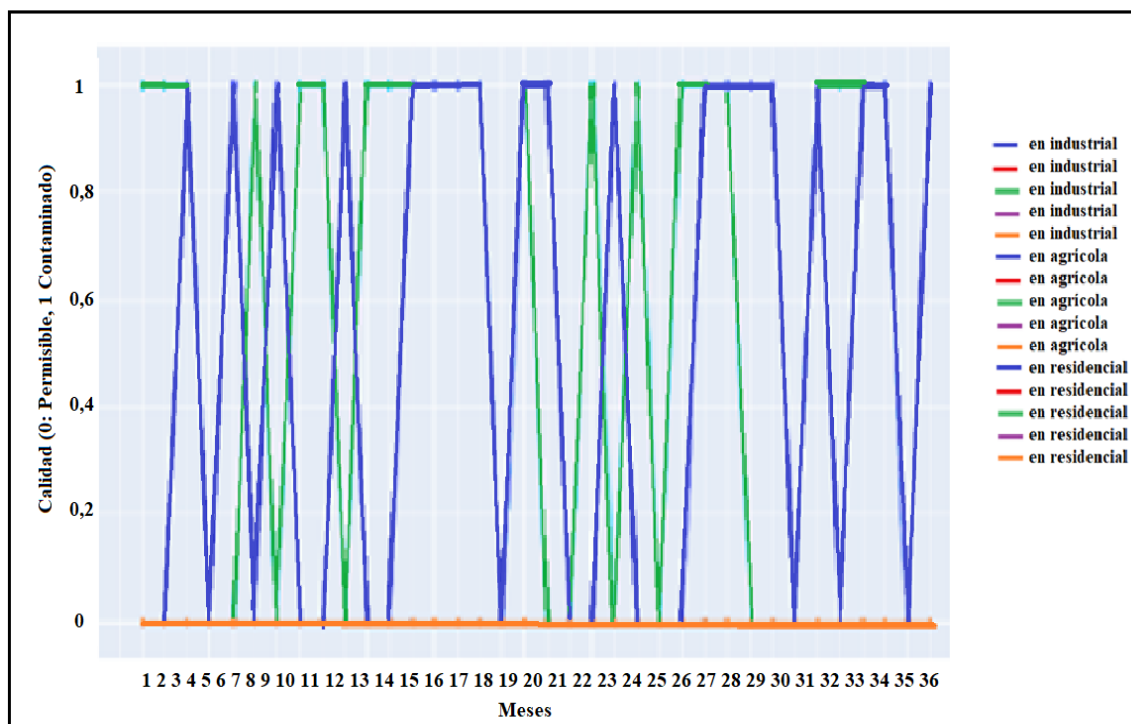


Figura 54 — Predicción de contaminación por 36 meses con el algoritmo machine Learning Bagging.

La Figura 54, muestra resultados del algoritmo Bagging, donde de 36 meses anunciados de contaminación por Cromo, en los meses:



- 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 19, 20, 24, 25, 27, 29, 31, 32, 33, 34, 35 , muestra 24 meses que exceden los LMP de ECAs para suelo agrícola, de los 36
- 1, 6, 10, 14, 17, 21, 22, 23, 26, 28, 30, 36 muestra 12 meses que no exceden los LMP de ECAs para suelo agrícola, de los 36 para suelo agrícola, de los 36

Se observa una gran variabilidad en los valores de contaminación en el tiempo.

Hay períodos en los que el cromo está en niveles permisibles (cerca de 0) y otros en los que está contaminado (valor 1).

Este comportamiento indica que el algoritmo detecta contaminación en diferentes intervalos de tiempo sin un patrón completamente uniforme, sugiriendo que puede estar capturando variaciones naturales o errores en los datos.

Este algoritmo también muestra fluctuaciones, pero parece ofrecer una predicción más estructurada en comparación con XGBoost.

La frecuencia de cambios entre contaminación y permisible es similar, pero con menos variabilidad en períodos cortos, lo que indica que el modelo tiene una mayor capacidad de generalización en la predicción.

Puede ser más robusto al ruido en los datos y ofrecer predicciones más estables en el tiempo.

Conclusión sobre la contaminación del Cromo: en entornos industriales: Se presenta con mayor frecuencia en estado contaminado, lo que indica un alto riesgo de contaminación persistente en este tipo de suelo.

Cromo en entornos agrícolas y residenciales: tiende a permanecer en niveles permisibles durante la mayor parte del tiempo, pero con episodios de contaminación que podrían representar riesgos intermitentes.

C. Con el modelo de predicción aplicando algoritmo Voting, tiene las siguientes precisiones:

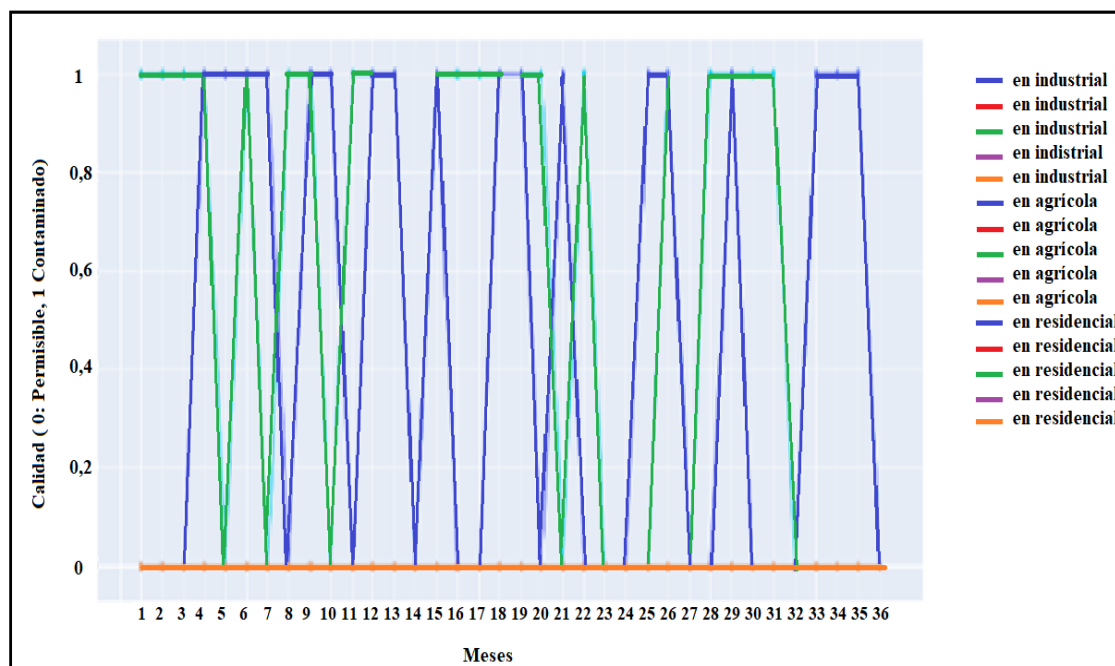


Figura 55 — Predicción de contaminación por 36 meses con el algoritmo Voting

La Figura 55, El criterio de calidad para el análisis del grafico nos indica que cero(0) suelo permisible no contaminado y 1 suelo contaminado, para suelo agrícola se identifica eventos intermitentes para el Cr y Cd, las causas podrían ser agroquímicos o escorrentías, pero hay meses con valores permisibles existe riesgo es moderado a alto de contaminación para cultivos y salud pública. Suelos industriales se observa alta concentración de contaminación para metales críticos como Cr y Pb con contaminaciones persistentes, Cd, As y en suelos residenciales no se registra contaminación en los 36 meses evaluados, manteniéndose en estado permisible para todos los metales pesados, 21 meses exceden los límites permitidos de Cr para suelo agrícola en los meses:

- 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 26, 28, 29, 30, 31, que son lo meses que exceden los LMP de ECAs para suelo agrícola, de los 36
- 5, 7, 10, 13, 14, 21, 23, 24, 25, 27, 32, 33, 34, 35, 36, que son lo meses que no exceden los LMP de ECAs para suelo agrícola, de los 36

Por lo tanto, es necesario prever acciones de mitigación de contaminación específicas para esos meses.

Presentando una tendencia similar al algoritmo Bagging, con oscilaciones entre contaminación y permisibilidad. El modelo Voting indicar una alta confiabilidad en los períodos donde la contaminación es estable y menos fluctuante. Asimismo, la presencia de tres colores de línea activamente porque: Solo 3 combinaciones presentan variación de datos (de 0 a 1), el resto de líneas están en 0 y se solapan. Algunos, colores son muy similares entre sí y no se distinguen fácilmente a simple vista.

5.3.13.3. Resultados generales

Siendo el modelo **Voting Regresor (XGBoost + Bagging)**, que integra a los algoritmos XGBoost y Bagging. Esta muestra, una máxima precisión del 75%. determinando que la contaminación según la Figura 61, en un mediano plazo de 36 meses, que a iniciando en el mes de octubre del 2023 a setiembre del 2026. Del cual, será que exceden los límites máximos permitidos de estándares de calidad de suelo agrícola (sedimento) por Cr, en los meses de:

- Octubre, noviembre y diciembre del 2023;
- Enero, marzo, mayo, junio, agosto, septiembre y diciembre del 2024;
- Enero, febrero, marzo, abril, mayo, julio, noviembre del 2025 y
- Enero, febrero, marzo y abril del 2026.

En la contaminación de Cromo (Cr), en suelos industriales, se observa una mayor frecuencia de contaminación a lo largo del tiempo. Existen picos constantes en los cuales el cromo es clasificado como contaminado, con pocas fases permisibles.

Esto indica que, en zonas industriales, la presencia de Cromo excede los valores permisibles con alta recurrencia.

En suelos agrícolas y residenciales, la contaminación es intermitente, pero con predominancia de valores permisibles. Hay momentos en los que se



presentan picos de contaminación, pero en general, la tendencia indica que la concentración de Cromo en estos suelos se mantiene en niveles aceptables.

Sin embargo, los episodios de contaminación podrían representar riesgos a largo plazo. El patrón de predicción en los algoritmos XGBoost, Bagging y Voting: muestran fluctuaciones más abruptas entre contaminación y permisible, lo que puede indicar sensibilidad a pequeñas variaciones en los datos.

XGBoost: Aunque también muestra alternancia, parece tener una predicción más estable y menos afectada por el ruido en los datos.

Por lo tanto, la contaminación del Cromo en suelos industriales es persistente, mientras que en suelos agrícolas y residenciales es más esporádica, pero con eventos de contaminación a lo largo del tiempo.

Se incide indicando que los modelos predicen que la contaminación del Cromo en suelos industriales es recurrente y sostenida, en suelos agrícolas y residenciales, la contaminación ocurre en momentos específicos, pero la tendencia es hacia niveles permisibles.

El algoritmo XGBoost, parece proporcionar comportamiento más estable y menos fluctuante aportado al modelo de predicción una mejor capacidad de modelado de la contaminación del cromo en estos entornos.

En general, el patrón de fluctuaciones: de los tres algoritmos muestran un comportamiento en el que la contaminación del cromo sigue un patrón cíclico, alternando entre períodos de contaminación y permisibilidad.



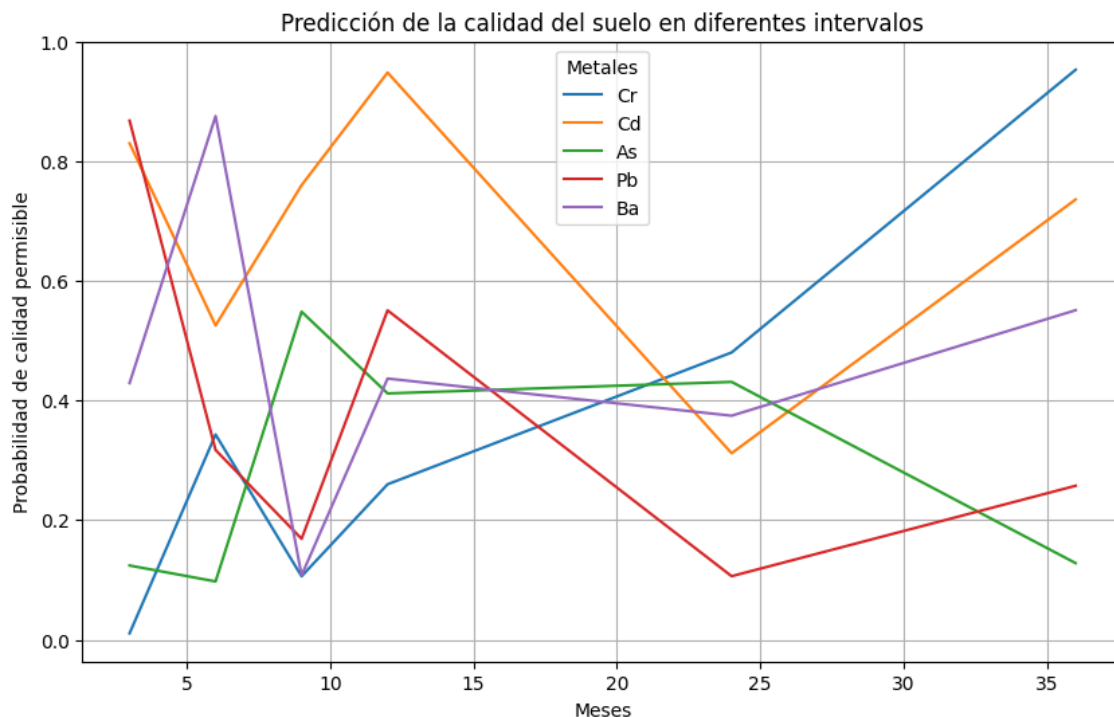


Figura 56 — Predicciones futuras a mediano plazo de los metales pesados

Según la Figura 56, de predicciones futuras a mediano plazo de los metales pesados tiene los siguientes resultados:

Tabla 21 — Tendencia de predicción a mediano plazos de los metales pesados

Metal	Tendencia	Interpretación
Cr *	Ascendente claro. 0 (calidad no permisible) Inicio (mes 1): 0 (calidad no permisible). Final (mes 36): ~0,95 (alta probabilidad de ser permisible).	Mejora progresiva en la calidad del suelo frente al cromo.
Cd*	Fluctuante, pero con picos altos. Máximo (mes 12): ~0,95 (muy permisible). Descenso entre meses 18-24, pero recupera al final (~0.7).	Calidad inestable, con episodios de posible contaminación.
As**	Irregular, con picos y caídas. - Inicio (mes 1): ~0,12 (muy contaminado).	Alta contaminación persistente. Riesgo importante a largo plazo.



	- Máximo (mes 12):~0,55, pero baja progresivamente después. - **Final (mes 36):~0,15.	
Pb**	Inestable, con tendencia a la baja. - Inicio (mes 1): ~0,9 (buena calidad). - Caída marcada hacia el mes 24 (~0,1), leve repunte después. - Final (mes 36): ~0.25.	Deterioro progresivo de la calidad por plomo. Requiere intervención.
Ba***	Altamente variable, pero con recuperación final. - Pico inicial (mes 6): ~0,9 - Caída (mes 9): ~0,12 - Recuperación final (mes 36): ~0,55	Calidad fluctuante**, podría estar influenciada por eventos estacionales o intervenciones.
<p>* Metales con tendencia positiva: Cr, Cd (aunque inestable)</p> <p>** Metales preocupantes: As y Pb (predominantemente contaminados)</p> <p>*** Metal Ba, con Variable, pero con mejora al final.</p>		

5.3.14. Discusión de resultados

La contaminación por metales pesados de sedimentos superficiales (CSSMP), en el río Antabamba, basada en 28 muestras analizadas con ICP-MS, mejoró su precisión de predicción de 35% a 75% mediante el algoritmo Voting Classifier (Bagging + XGBoost) (En-Nagre et al. 2024). En un periodo a mediano plazo, el 58,3% de los meses superaron los límites permisibles de ECAs agrícolas para Cr. En el río Yellow, 200 muestras analizaron CSSMP con una precisión superior al 90% usando Bagging, RDT y SVM, donde más del 40% superan LMP en ECAs para Pb y Zn (Baskin et al. 2017). Las predicciones adicionales en otros ríos alcanzaron más del 90% de precisión con XGBoost y RF, donde el 60% superan los límites de ECAs (BASKIN et al. 2017).

Por lo tanto, se observa la alta correlación positiva entre la concentración de metales pesados y la contaminación, en la relación significativa entre los ECAs agrícolas, residenciales e industriales, siendo especialmente alta en los sectores agrícola y residencial. La menor correlación en el sector industrial



sugiere una mayor tolerancia a la CSSMP (EN-NAGRE et al., 2024). Los resultados validan la eficacia del uso de algoritmos y su relevancia en estudios de impacto ambiental de la CSSMP (BASKIN et al., 2017).



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Respecto a la determinación de la contaminación por metales pesados en sedimentos superficiales y su influencia a mediano plazo en la subcuenca del río Antabamba. Los resultados obtenidos confirman que existe una contaminación significativa por metales pesados en los sedimentos superficiales, especialmente por arsénico (As) y cromo (Cr), cuyas concentraciones superan los límites máximos permisibles establecidos en las ECAs para suelos agrícolas y residenciales. Esta situación evidencia un riesgo ambiental persistente y potencialmente agravante en un periodo de mediano plazo. La tendencia de acumulación y permanencia de estos metales en el ambiente sedimentario implica efectos sostenidos sobre la calidad del suelo y del ecosistema acuático asociado.
- Respecto a la influencia de los metales pesados en la contaminación actual de la subcuenca del río Antabamba. Se comprobó que las concentraciones actuales de metales pesados, particularmente Cr, As y Cd, guardan una correlación directa con los niveles de contaminación presentes en los sedimentos de la subcuenca. La prueba de normalidad Shapiro-Wilk indicó que las variables no siguen una distribución normal, lo que sustenta el uso de análisis no paramétricos como Spearman, los cuales revelaron correlaciones significativas entre Cr-As ($r=0,3906$; $p=0,0399$) y Cr-Cd ($r=0,6365$; $p=0,0003$). Estas relaciones sugieren interacciones químicas que favorecen la persistencia y movilidad de los metales pesados, afectando negativamente el medio ambiente del entorno local.
- Sobre la influencia de los factores fisicoquímicos en la contaminación por metales pesados. Los factores fisicoquímicos, como el pH y la conductividad

eléctrica, muestran una relación significativa con las concentraciones de metales pesados en los sedimentos. Específicamente, un pH ácido se asocia con mayores niveles de arsénico y plomo, mientras que una alta conductividad está positivamente correlacionada con la concentración de bario y cadmio. Estos resultados sugieren que las condiciones fisicoquímicas del medio actúan como moduladores del comportamiento de los metales, afectando su solubilidad, adsorción y biodisponibilidad, lo que incrementa el riesgo de contaminación y su impacto en áreas sensibles.

- Respecto a la predicción de la calidad ambiental a mediano plazo basada en los límites máximos permisibles de metales pesados. Se aplicó el modelo de aprendizaje automático Voting Regressor. El cual, permitió predecir con una precisión del 75% las concentraciones futuras de metales pesados en los sedimentos, estimando que en el 58% de los meses evaluados (21 de 36) se excederán los límites máximos permisibles establecidos por las ECAs agrícolas. El análisis predictivo mostró un incremento significativo en Cr (hasta 20,98 ppm) y Pb (hasta 42,54 ppm), mientras que As, aunque en descenso, continuará por encima del umbral permitido (75,65 ppm). Estos hallazgos validan la efectividad del enfoque predictivo a medianos plazos para anticipar escenarios de riesgo ambiental y enfatizan la urgencia de estrategias de mitigación y vigilancia ambiental sostenida.



6.2 Recomendaciones

- Implementar un sistema integral de monitoreo y control ambiental en la subcuenca del río Antabamba a mediano plazo. Las concentraciones de metales como arsénico y cromo superan los límites máximos permisibles, se recomienda establecer un plan de monitoreo continuo de sedimentos y suelos, especialmente en estaciones críticas y durante épocas de mayor riesgo. Este sistema debe permitir la detección temprana de concentraciones elevadas, facilitando acciones correctivas y preventivas en tiempo real para preservar la salud del ecosistema y de la población.
- Diseñar e implementar programas de remediación y reducción de metales pesados en fuentes identificadas. En base a la contaminación actual determinada por Cr, As y Cd, es fundamental aplicar tecnologías de remediación como biorremediación, fitoextracción o enmiendas minerales en las áreas más afectadas. Además, se debe identificar las fuentes antrópicas o naturales responsables de estas concentraciones, a fin de limitar sus aportes mediante regulaciones y buenas prácticas ambientales.
- Establecer lineamientos técnicos para la gestión de parámetros fisicoquímicos que afectan la movilidad de metales. Los resultados evidencian que factores como el pH y la conductividad influyen directamente en la presencia y comportamiento de metales en los sedimentos. Por ello, se recomienda la elaboración de protocolos técnicos para el manejo de estos parámetros, priorizando su control en actividades agrícolas, mineras o urbanas que alteren la química del suelo. Esto permitirá minimizar la movilidad y toxicidad de los metales pesados en el entorno.
- Fortalecer el uso de modelos predictivos con algoritmos de aprendizaje automático para la toma de decisiones ambientales. Considerando la efectividad del modelo Voting Regressor con un 75% de precisión, se sugiere su implementación como herramienta oficial para la predicción de escenarios de contaminación en intervalos trimestrales y anuales. Su aplicación debe complementarse con el ajuste de hiperparámetros y la inclusión de variables ambientales complementarias (uso de suelo, lluvia, pendientes, entre otros), a fin de mejorar la anticipación de riesgos y diseñar estrategias de gestión más eficientes y sostenibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUAFONDO, F. de A. para L. y C., MINAM, M. del A. y SINIA, S.N. de I.A., 2023. Glosario de Términos para Fondos de Agua [en línea]. 1ra. Ed. Lima- Callao: AQUAFONDO. [consulta: 18 agosto 2024]. vol. 1. ISBN Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/Glosario%20de%20T%20C3%A9rminos%20para%20Fondos%20de%20Agua.pdf>.

AGBASI, J.C. y EGBUERI, J.C., 2023. Intelligent soft computational models integrated for the prediction of potentially toxic elements and groundwater quality indicators: a case study. *Journal of Sedimentary Environments*, vol. 8, no. 1, pp. 57-79. ISSN 2447-9462. DOI 10.1007/s43217-023-00124-y. <https://doi.org/10.1007/s43217-023-00124-y> PMID:PMC9849108

AHN, Y., YUN, H.-S., PANDI, K., PARK, S., JI, M. y CHOI, J., 2020. Heavy metal speciation with prediction model for heavy metal mobility and risk assessment in mine-affected soils. *Environmental Science and Pollution Research International*, vol. 27, no. 3, pp. 3213-3223. ISSN 1614-7499. DOI 10.1007/s11356-019-06922-0. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06922-0> PMID:31838671

ALFAYETE BLANCO, J.M., GONZÁLEZ DELGADO, M.N., PÉREZ SERRANO, A. y RODRIGUEZ VIDAL, F.J., 2004. Contaminación ambiental. Una visión desde la química: una visión desde la química [en línea]. Madrid. España: Ediciones Paraninfo, S.A. ISBN 978-84-9732-178-5. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=nUoOx-8knyUC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>. 41- 62 p.

ÁVILA, H., QUINTERO, E., ANGULO, N., CÁRDENAS, C., ARAUJO, M., MORALES, N. y PRIETO, M., 2014. Determinación de metales pesados en sedimentos superficiales costeros del Sistema Lago de Maracaibo, Venezuela. *Multiciencias*, vol. 14, no. 1, pp. 16-21. ISSN 1317-2255.

BACH, P.M., RAUCH, W., MIKKELSEN, P.S., MCCARTHY, D.T. y DELETIC, A., 2014. A critical review of integrated urban water modelling - Urban drainage and beyond. *Environmental Modelling & Software*, vol. 54, pp. 88-107. ISSN 1364-8152. DOI 10.1016/j.envsoft.2013.12.018. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.018>

BADARIAH, B., SUKMAWATI, N., HERANINGSIH, S.F., RAINIYATI, R., RIDUAN, A. y PUTRI, R.D., 2023. Heavy metal contamination of Batanghari River, Jambi, Indonesia: determination based on sediment enrichment factor value. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, vol. 10, no. 4, pp. 4761-4768. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2023.104.4761>

BASKIN, I.I., MARCOU, G., DRAGOS, H. y VARNEK, A., 2017. Bagging and Boosting of Regression Models - Tutorials in Chemoinformatics - Wiley Online Library. [en línea]. [consulta: 30 diciembre 2024]. Disponible en:



<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119161110.ch16>.

<https://doi.org/10.1002/9781119161110.ch16>

BESSER, J., BRUMBAUGH, W., INGERSOLL, C., IVEY, C., KUNZ, J., KEMBLE, N., SCHLEKA, C. y GARMAN, E., 2009. Chronic toxicity of nickel-spiked freshwater sediments: Variation in toxicity among eight invertebrate taxa and eight sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 32, no. 11, pp. 2495-2506. ISSN 0730-7268. DOI 10.1002/etc.2271. <https://doi.org/10.1002/etc.2271> PMID:23657897

BHAGAT, S.K., TIYASHA, T., AWADH, S.M., TUNG, T.M., JAWAD, A.H. y YASEEN, Z.M., 2021. Heavy metal contamination prediction using ensemble model: Case study of Bay sedimentation, Australia. *Environmental Pollution*, vol. 268, pp. 115663. ISSN 0269-7491. DOI 10.1016/j.envpol.2020.115663. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115663> PMID:33120144

BHUYAN, R., BRAHMA, P., CHABUKDHARA, M., TYAGI, N., GUPTA, S.K. y MALIK, T., 2023. Heavy metals contamination in sediments of Bharalu river, Guwahati, Assam, India: A tributary of river Brahmaputra. *PloS One*, vol. 18, no. 4, pp. 0283665. DOI:10.1371/journal.pone.0283665. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283665> PMID:37018233 PMCID:PMC10075429

BREIMAN, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5-32. ISSN 1573-0565. DOI 10.1023/A:1010933404324. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

CHEN, Y., JIANG, Y., HUANG, H., MOU, L., RU, J., ZHAO, J. y XIAO, S., 2018. Long-term and high-concentration heavy-metal contamination strongly influences the microbiome and functional genes in Yellow River sediments. *Science of The Total Environment*, vol. 637-638, pp. 1400-1412. ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.05.109. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.109> PMID:29801233

CORREA CUBA, O., OLIVERA DE LESCANO, O., FUENTES BERNEDO, F., RODAS GUIZADO, E., REYNAGA MEDINA, A., OLIVARES PASTOR, O. y PORRAS DÍAS, N., 2020. 5 Determinación de metales pesados mediante fluorescencia de rayos X en sedimentos del agua en la microcuenca del río Huancaray, Apurímac-Perú, para periodos de estiaje y lluvia. *Acta Nova*, vol. 9, no. 4, pp. 504-523. ISSN 1683-0789.

CUI, S., ZHANG, F., HU, P., HOUGH, R., FU, Q., ZHANG, Z., AN, L., LI, Y.-F., LI, K., LIU, D. y CHEN, P., 2019. Heavy Metals in Sediment from the Urban and Rural Rivers in Harbin City, Northeast China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, pp. 4313. DOI 10.3390/ijerph16224313. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224313> PMID:31698765 PMCID:PMC6888195



EDWARD, TRIANDIZA, T., RUGEBREGT, M.J. y OPIER, R.D.A., 2021. Prediction of sediment quality based on the concentration of heavy metals Cu, Zn, and Ni in Jakarta Bay using the index analysis approach. En: Indonesia, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 777, no. 1, pp. 012031. ISSN 1755-1315. DOI 10.1088/1755-1315/777/1/012031.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/777/1/012031>

EN-NAGRE, K., AQNOUY, M., OUARKA, A., ALI ASAD NAQVI, S., BOUIZROU, I., EDDINE STITOU EL MESSARI, J., TARIQ, A., SOUFAN, W., LI, W. y EL-ASKARY, H., 2024. Assessment and prediction of meteorological drought using machine learning algorithms and climate data. Climate Risk Management, vol. 45, pp. 100630. ISSN 2212-0963. DOI 10.1016/j.crm.2024.100630.

<https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100630>

FIEDLER, M., 2023. Long-Term Changes in the Pollution of Warta River Bottom Sediments with Heavy Metals, Poland-Case Study. International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 20, no. 10, pp. 5869. ISSN 1660-4601. DOI 10.3390/ijerph20105869.

<https://doi.org/10.3390/ijerph20105869>

PMid:37239595 PMCID:PMC10217876

FLORES, J. y CAROLINA, D., 2015. Metales pesados en sedimentos riverinos de cuencas hidrográficas impactadas por minería en la región sur del Ecuador [en línea]. bachelorThesis. S.l.: Loja: Universidad Nacional de Loja. [consulta: 30 marzo 2025]. Disponible en:

<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/11022>.

HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R. y MENDOZA, C., 2018. Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. [en línea]. México: Mc Graw Hill y Revista Universitaria Digital de Ciencias Sociales (RUDICS). [consulta: 28 diciembre 2024]. vol. 10. ISBN 978-1-4562-6096-5. Disponible en:

<https://doi.org/10.22201/fesc.20072236e.2019.10.18.6> ,

<https://virtual.cuautitlan.unam.mx/rudics/?p=2612>.

HERRERA-NÚÑEZ, J., RODRÍGUEZ-CORRALES, J., COTO-CAMPOS, J.M., SALGADO-SILVA, V. y BORBÓN-ALPÍZAR, H., 2013. Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. Revista Tecnología en Marcha, vol. 26, no. 1, pp. pág. 27-36. ISSN 2215-3241. DOI 10.18845/tm.v26i1.1119.

<https://doi.org/10.18845/tm.v26i1.1119>

HUARANGA MORENO, F., MÉNDEZ GARCÍA, E., QUILCAT LEÓN, V. y HUARANGA ARÉVALO, F., 2012. Contaminación por metales pesados en la Cuenca del Río Moche, 1980 - 2010, La Libertad - Perú. Scientia Agropecuaria, vol. 3, no. 3, pp. 235-247. ISSN 2306-6741. DOI 10.17268/sci.agropecu.2012.03.05.

<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2012.03.05>

IJC, (International Joint Commission), 1999. St. Marys River Area of Concern. International Joint Commission Status Assessment, February, 1999. University of



INGEMMET, I.G.M. y M.D. de G.A. y R., 2022. Evaluación de peligros geológicos en el sector Sallar de la comunidad de Huancaray. Distrito Pachaconas, provincia Antabamba, departamento Apurímac. En: Accepted: 2022-12-15T16:44:36Z, Repositorio Institucional INGEMMET [en línea], [consulta: 29 diciembre 2024]. Disponible en:

https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/4293/1/A7330-Eval_pelig_sector_Sallar_Huancaray-Apurimac.pdf.

ISLAM, M.S., ISLAM, M.T., ISMAIL, Z., SHAHID, S., ISLAM, A.R.M.T., ALI, M.M. y IDRIS, A.M., 2023. Contamination and ecological risk assessment of Cr, As, Cd and Pb in water and sediment of an urban river in a developing country. Research Square [en línea], vol. 1, [consulta: 28 diciembre 2024]. ISSN 2693-5015. DOI 10.21203/rs.3.rs-2942911/v1. Disponible en:

<https://www.researchsquare.com/article/rs-2942911/v1>.

JIMÉNEZ LOPEZ, M.A., MONKS, S., SERRANO, A., FLORES PULIDO, G., OYARZUN GAYTAN, J.C. y LÓPEZ ORTEGA, M., [sin fecha]. Dinámica de las variables fisicoquímicas del sedimento de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz, México. [en línea]. [consulta: 19 agosto 2025]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/318913215_Dinamica_de_las_variables_fisicoquimicas_del_sedimento_de_la_Laguna_de_Tampamachoco_Veracruz_Mexico.

LI, R., TANG, X., GUO, W., LIN, L., ZHAO, L., HU, Y. y LIU, M., 2020. Spatiotemporal distribution dynamics of heavy metals in water, sediment, and zoobenthos in mainstream sections of the middle and lower Changjiang River. Science of The Total Environment, vol. 714, pp. 136779. ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.136779.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136779>

PMid:31991268

LIU, Y., ZHOU, Z., GONG, W., XU, Y., DING, Q. y CUI, L., 2023. Distribution, risk assessment of heavy metals in sediments and their potential risk on water supply safety of a drinking water reservoir, middle China. Environmental science and Pollution [en línea], vol. 2, [consulta: 28 diciembre 2024]. ISSN 2693-5015. DOI 10.21203/rs.3.rs-2185391/v1. Disponible en:

<https://www.researchsquare.com/article/rs-2185391/v1>.

MACO-GARCÍA, M. y SANDOVAL, E., 2015. Presencia de mercurio en el agua y sedimento de fondo en el río nanay Perú. [en línea], vol. 14, no. 2, [consulta: 28 diciembre 2024]. DOI <https://doi.org/10.24841/fa.v14i2.406>. Disponible en: <https://revistas.iiap.gob.pe/index.php/fofiaamazonica/article/view/406>.

<https://doi.org/10.24841/fa.v14i2.406>

MCCARTHY, D.T., LIZAMA ALLENDE, K. y FLETCHER, T.D., 2014. The influence of media type on removal of arsenic, iron and boron from acidic wastewater in horizontal flow wetland microcosms planted with *Phragmites australis*. Chemical Engineering Journal, vol. 246, pp. 217-228. ISSN 1385-8947. DOI 10.1016/j.cej.2014.02.035.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.02.035>



MINAM, 2013. Ley general del medio ambiente - Ministerio del Ambiente. [en línea]. [consulta: 18 agosto 2025]. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/06/ley-general-del-ambiente.pdf>.

MINAM, 2024. Ministerio del Ambiente - Plataforma del Estado Peruano. [en línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/minam>.

MINEM, 2018. Compendio Normativo del Proceso de Formalización y Minería Ilegal Minera Integral [en línea]. 1ra Ed. Ministerio de Energía y Minas, Lima-Perú: s.n. [consulta: 19 agosto 2025]. 1, ISBN 2018-07616. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4636379-compendio-normativo-del-proceso-de-formalizacion-y-mineria-ilegal-minera-integral>.

MOHAMAD, M., AL-ANSARI, N. y KNUTSSON, S., 2016. Annual Runoff and Sediment in Duhok Reservoir Watershed Using SWAT and WEPP Models. Scienific Research An Academic Publisher, vol. 8, no. 7, pp. 410-422. DOI 10.4236/eng.2016.87038. <https://doi.org/10.4236/eng.2016.87038>

NEGRETE, J.L.M. y CÁRDENAS, I.D.U., 2019. Estabilización de metales pesados (cd, pb, ni, cr, hg, as) por el proceso de enclado en sedimentos procedentes del dragado de caño mosquito de la región de la Mojana - Colombia [en línea]. Colombia: UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA. Disponible en: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/e434fbf1-c928-4293-bdb7-560f190b9239/content>.

OEFA, 2021. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. En: Creado: 2012-07-11T19:04:07+00:00, OEFA [en línea]. [consulta: 19 septiembre 2021]. Disponible en: <https://www.oefa.gob.pe/somos-oefa/>.

OKONKWO, S.I., IDAKWO, S.O., KOLAWOLE, M.S., FALOYE, O. y ELUEZE, A.A., 2023. Source, Contamination Assessment and Risk Evaluation of Heavy Metals in the Stream Sediments of Rivers around Olode Area SW, Nigeria. Journal of Environmental & Earth Sciences, vol. 5, no. 1, pp. 65-84. ISSN 2661-3190. DOI 10.30564/jees.v5i1.5060. <https://doi.org/10.30564/jees.v5i1.5060>

OSORES PLENGE, F., ROJAS JAIMES, J.E. y MANRIQUE LARA ESTRADA, C.H., 2012. Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: Un problema de salud pública. Acta Médica Peruana, vol. 29, no. 1, pp. 38-42. ISSN 1728-5917.

PABÓN, S.E., BENÍTEZ, R., SARRIA, R.A. y GALLO, J.A., 2020. Water contamination by heavy metals, analysis methods and removal technologies. A review. Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 14, no. 27, pp. 9-18. ISSN 1909-8367. <https://doi.org/10.31908/19098367.1734>



PYTHON, S.F., 2025. The Python Language Reference. Python documentation [en línea]. [consulta: 19 agosto 2025]. Disponible en: <https://docs.python.org/3/reference/index.html>.

QUISPE YANA, R.F., BELIZARIO QUISPE, G., CHUI BETANCUR, H.N., HUAQUISTO CÁCERES, S., CALATAYUD MENDOZA, A.P. y YÁBAR MIRANDA, P.S., 2019. Concentración de metales pesados: cromo, cadmio y plomo en los sedimentos superficiales en el río Coata, Perú. *Revista Boliviana de Química*, vol. 36, no. 2, pp. 83-90. ISSN 0250-5460. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.36.2.3>

RAE y ASALE, 2016. Diccionario de la lengua española. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario [en línea]. [consulta: 19 agosto 2025]. Disponible en: <https://dle.rae.es/contaminar>.

RODRÍGUEZ MORANTE, I., ACOSTA ALE, J.G., TUMIALÁN DE LA CRUZ, P.H., SEMPERE, T., BUSTAMANTE BALDEÓN, C., HUACACUNI MAMANI, D., VILLARREAL JARAMILLO, E., TRELLES VÁSQUEZ, G. y TORRE ANTAY, J., 2023. Compendio minería y yacimientos minerales del Perú - [Boletín B 86] [en línea]. 1ra Ed. Lima - Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET. [consulta: 19 agosto 2025]. vol. 1. ISBN 978-612-47898-5-4. Disponible en: <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/4751>.

RUSSELL, S. y NORVIG, P., 2020. Artificial Intelligence: A Modern Approach [en línea]. 4th Ed. Boston: Pearson. [consulta: 19 agosto 2025]. vol. 1. ISBN 978-0-13-461099-3. Disponible en: <http://aima.cs.berkeley.edu/>.

SAIFUL ISLAM, BELAL HOSSAIN, ABDUL MATIN y SHAFIQL ISLAM SARKER, 2018. Assessment of heavy metal pollution, distribution and source apportionment in the sediment from Feni River estuary, Bangladesh. *PubMed*, pp. 202, 25-32. DOI 10.1016/j.chemosphere.2018.03.077. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.077>
PMid:29554504

SEBESTA, R.W., 2019. Concepts of Programming Languages [en línea]. 12. Boston, University of Colorado at Colorado Springs: Pearson. [consulta: 19 agosto 2025]. vol. 1. ISBN 978-0-13-499718-6.

SIAR, 2021. SIAR Apurímac - Sistema de Información Ambiental Regional de Apurímac. [en línea]. [consulta: 11 agosto 2021]. Disponible en: <http://siar.minam.gob.pe/apurimac/tematicas/agua?page=2>.

SOJKA, M. y JASKUŁA, J., 2022. Heavy Metals in River Sediments: Contamination, Toxicity, and Source Identification-A Case Study from Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 17, pp. 10502. ISSN 1660-4601. PMID:36078217 PMCID:PMC9518182
<https://doi.org/10.3390/ijerph191710502>



TAO, H., AL-KHAFAJI, Z.S., QI, C., ZOUNEMAT-KERMANI, M., KISI, O., TIYASHA, T., CHAU, K.-W., NOURANI, V., MELESSE, A.M., ELHAKEEM, M., FAROOQUE, A.A., POUYAN NEJADHASHEMI, A., KHEDHER, K.M., ALAWI, O.A., DEO, R.C., SHAHID, S., SINGH, V.P. y YASEEN, Z.M., 2021. Artificial intelligence models for suspended river sediment prediction: state-of-the art, modeling framework appraisal, and proposed future research directions. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 15, no. 1, pp. 1585-1612. ISSN 1994-2060. DOI 10.1080/19942060.2021.1984992.

UNEP, 2019. United Nations Environment Programme Archives. ICLEI [en línea]. [consulta: 30 marzo 2025]. Disponible en: <https://iclei.org/partners/unep-united-nations-environment-programme/>.

VU, H., 2019. A Machine Learning Assessment to Predict the Sediment Transport Rate Under Oscillating Sheet Flow Conditions. Senior Honors Theses [en línea], Disponible en: https://scholarworks.uno.edu/honors_theses/135.

WINDSOR, pp. 16. ISSN 1894280032.
<https://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1533&context=ijcarchive>

XIE, Y., HUO, X., HU, C. y TAO, Y., 2023. Contamination, Ecological Risk and Source Apportionment of Heavy Metals in the Surface Sediments in the Hailar River, the Upper Source of the Erguna River between China and Russia. *Sustainability*, vol. 15, no. 4, pp. 3655. ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su15043655.
<https://doi.org/10.3390/su15043655>

YANG, H.J., KANG, T.-W., CHOI, B., HWANG, S.H., SHIN, D. y PARK, W.-P., 2022. Potential Sources of Heavy Metals in Sediments of an Urban-Agricultural Watershed and Relationship with Land Use Using a Statistical Approach. *Sustainability*, vol. 14, no. 15, pp. 9444. ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su14159444.
<https://doi.org/10.3390/su14159444>

YONGO, E., JIN, F., MUTETHYA, E., WU, D., ZHANG, P. y GUO, Z., 2023. Sediment Heavy Metal Pollution Assessment in Changwang and Wuyuan Rivers in Hainan Island, China. *Water*, vol. 15, no. 8, pp. 1580. ISSN 2073-4441. DOI 10.3390/w15081580.
<https://doi.org/10.3390/w15081580>

ZHANG, M., 2019. Challenges of solving the problem of soil and groundwater contamination -An interdisciplinary approach-. *Synthesiology English edition*, vol. 12, no. 1, pp. 41-50. ISSN 1883-0978, 1883-2318. DOI 10.5571/syntheng.12.1_41.
https://doi.org/10.5571/syntheng.12.1_41

ZHANG, M., HE, P., QIAO, G. y HUANG, J., 2024. Heavy metal contamination assessment of surface sediments of the Subei Shoal, China: Spatial distribution, source apportionment and ecological risk. *ResearchGate* [en línea], [consulta: 28 diciembre 2024]. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.02.058. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/331082391_Heavy_metal_contamination_assessment_of_surface_sediments_of_the_Subei_Shoal_China_Spatial_distribution_source_apportionment_and_ecological_risk.



ZHONG, S., 2015. Risk Assessment and Prediction of Heavy Metal Pollution in Groundwater and River Sediment: A Case Study of a Typical Agricultural Irrigation Area in Northeast China. ResearchGate [en línea], [consulta: 29 diciembre 2024]. DOI 10.1155/2015/921539. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/281779738_Risk_Assessment_and_Prediction_of_Heavy_Metal_Pollution_in_Groundwater_and_River_Sediment_A_Case_Study_of_a_Typical_Agricultural_Irrigation_Area_in_Northeast_China. <https://doi.org/10.1155/2015/921539>
PMid:26366176 PMCID:PMC4561112



ANEXOS



ANEXO I.

PRIMER ANÁLISIS DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO ANTABAMBA POR ESPECTROSCOPIA DE MASAS CON PLASMA ACOPLADO INDUCTIVAMENTE (ICP-MS).

Elemento	SM01	SM02	SM03	SM04	SM05	SM06	SM07	SM08	SM09	SM10	SM11	SM12	SM13	SM14
P 31 (ppm)	404,54	355,84	447,87	488,58	689,76	200,48	663,38	516,17	456,25	188,83	543,75	445,47	397,56	262,19
B 11(ppm)	4,94	5.,18	1,13	2.17	6,65	1,00	2,21	1,66	1,10	1,03	2,46	0,26	0,72	-0,62
Na 23 (ppm)	445,95	190,68	265,22	351.90	239,74	95,19	271,38	471,33	100,17	54,22	127,20	339,01	329,53	165,81
Mg 24 (ppm)	3476,20	1145,63	3065,38	3226.41	4641,02	1383,09	3254,47	3176,24	1024,61	281,78	4458,85	2740,01	2737,74	1220,06
Al 27 (ppm)	9416,12	3690,74	5373,81	7348.16	9547,94	5051,78	7762,94	7433,20	5767,80	3193,24	10928,08	6248,69	6389,68	3126,39
K 39 (ppm)	2887,00	1539,75	1960,64	2054.19	2149,94	1115,42	1980,50	2105,69	2141,11	1051,25	3097,58	1788,00	1930,74	1007,49
Ca 43 (ppm)	22971,84	3247,14	1967,40	12876.26	46487,11	2733,82	21311,30	15154,23	415,68	202,93	27197,16	13417,45	14055,92	6526,68
Ti 48 (ppm)	94,52	121,74	484,20	121.82	56,73	3,00	352,30	71,39	29,82	7,78	74,86	93,13	81,70	87,29
V 51 (ppm)	25,23	15,23	22,30	32.49	69,57	7,29	77.,44	26,13	16,24	6,45	19,83	26,36	23,16	19,55
Cr 52 (ppm)	9,11	3,26	3,30	9.59	23,57	4,79	17,08	9,01	6,18	2,84	9,68	7,35	7,67	5,29
Mn 55 (ppm)	301,98	303,35	227,40	366.68	1165,59	226,60	770,11	419,37	43,36	71,78	312,97	299,20	295,39	371,89
Fe 57 (ppm)	17044,65	14191,15	13447,82	23825.91	45446,22	11611,84	52251,86	21684,20	38503,81	20957,48	22080,49	24072,91	18993,38	16530,38
Ni 60 (ppm)	10,86	4,82	3,39	12.54	83,36	8,32	20,38	14,20	5,56	1,83	10,63	12,08	11,34	6,19
Cu 63 (ppm)	70,94	196,30	35,07	105.66	220,84	15,36	226,68	116,49	1955,39	305,95	38,32	455,90	174,99	178,42
Zn 66 (ppm)	107,25	89,68	42,88	126.73	968,16	87,08	196,06	165,26	64,32	34,04	72,85	130,76	138,37	84,37
As 75 (ppm)	36,20	63,44	28,25	52.58	1947,63	42,40	114,77	66,58	270,41	65,73	31,82	106,23	67,45	59,16
Se 82 (ppm)	0,67	0,91	0,30	0.69	7,27	0,23	1,54	0,81	3,78	0,57	0,49	1,51	0,99	0,87
Sr 88 (ppm)	46,91	23,88	14,55	40.42	73,69	10,49	43,13	48,59	13,86	9,04	40,82	36,66	34,61	2253
Cd 111 (ppm)	0,76	0,31	0,06	0.82	13,45	0,50	1,19	1,30	0,24	0,16	0,35	1,29	1,21	0,59
Sn 118 (ppm)	0,11	0,03	0,06	0.06	0,02	0,02	0,13	0,02	0,02	0,03	0,04	0,07	0,03	0,04
Sb 121 (ppm)	0,49	0,41	1,03	0.76	0,93	0,31	0,78	0,71	0,63	0,44	0,26	0,64	0,85	0,98
Ba 138 (ppm)	95,67	258,11	116,18	253.61	147,76	61,17	586,46	225,82	81,37	56,76	599,93	281,43	171,32	850,84
Pb 208 (ppm)	15,24	56,11	6,34	23.43	89,54	25,93	49,60	34,29	85,91	57,73	35,29	34,62	26,39	49,88
Bi 209 (ppm)	0,24	1,50	0,42	0.32	7,07	0,52	0,7	0,42	2,71	1,71	0,54	0,66	0,33	0,32

ANEXO II

SEGUNDO ANÁLISIS DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO ANTABAMBA POR ESPECTROSCOPIA DE MASAS CON PLASMA ACOPLADO INDUCTIVAMENTE (ICP-MS).

Elemento	SM01	SM02	SM03	SM04	SM05	SM06	SM07	SM08	SM09	SM1,0	SM11	SM12	SM13	SM14
P 31 (ppm)	496,37	559,93	609,55	817,87	70,14	648,19	503,00	523,22	528,61	500,18	500,18	463,78	509,36	507,58
B 11(ppm)	5,34	11,09	3,67	6,17	3,50	7,85	5,10	6,27	8,39	2,73	2,73	2,51	3,82	6,17
Na 23 (ppm)	410,28	166,08	772,69	203,77	313,49	230,88	429,26	465,82	316,61	120,60	120,60	101,64	302,25	399,04
Mg 24 (ppm)	2964,97	1523,93	2956,82	2683,09	2752,45	5024,65	3097,83	3348,69	2978,65	1545,49	1545,49	4980,55	2807,66	2995,41
Al 27 (ppm)	7924,82	5820,70	5445,32	8766,80	6289,41	20598,86	7206,88	8655,81	6960,67	5290,27	5290,27	7301,08	6528,62	9254,82
K 39 (ppm)	2292,08	2256,56	2364,88	1513,25	1703,71	4320,13	1922,66	2278,42	1876,28	1834,39	1834,39	1348,47	1750,50	2583,24
Ca 43 (ppm)	22710,69	3322,01	2440,01	92660,91	18160,38	6646,77	18029,81	14744,32	16492,50	1116,36	1116,36	32180,40	14838,05	15394,64
Ti 48 (ppm)	98,13	178,01	490,53	147,72	93,15	7,23	119,28	99,51	89,51	52,31	52,31	44,77	88,79	125,57
V 51 (ppm)	26,06	23,11	27,51	75,14	25,33	27,72	33,12	29,84	27,05	18,72	18,72	15,38	28,40	36,12
Cr 52 (ppm)	9,89	4,75	6,21	19,97	12,16	29,89	14,53	13,71	13,15	11,30	11,30	13,21	13,85	14,69
Mn 55 (ppm)	278,56	442,55	213,53	796,09	305,09	779,31	328,76	414,79	399,48	103,40	103,40	325,27	327,70	338,99
Fe 57 (ppm)	16850,12	21752,16	14836,48	24649,51	16656,30	36317,87	21253,61	18116,71	18917,20	36344,35	36344,35	21436,73	21962,47	22482,58
Ni 60 (ppm)	10,60	72,59	4,49	49,52	9,88	24,41	11,21	12,62	11,54	5,01	5,01	11,98	11,24	11,94
Cu 63 (ppm)	65,18	279,65	40,05	51,28	83,31	39,36	98,93	109,22	93,53	450,401	4504,01	53,91	274,08	229,43
Zn 66 (ppm)	106,09	100,91	43,47	343,32	91,93	172,95	115,18	148,26	118,60	53,36	53,36	59,03	117,02	122,59
As 75 (ppm)	38,94	80,98	37,03	309,11	41,48	67,47	60,61	66,16	78,93	344,78	344,78	38,32	94,68	105,64
Se 82 (ppm)	0,46	0,89	0,16	2,04	0,44	0,91	0,66	0,51	0,69	5,14	5,14	0,28	0,95	0,96
Sr 88 (ppm)	51,39	38,53	20,48	96,88	45,82	36,20	44,06	62,01	45,63	22,29	22,29	45,98	43,75	45,15
Cd 111 (ppm)	0,79	0,37	0,19	2,94	0,77	1,08	0,96	1,33	1,02	0,28	0,28	0,27	1,18	1,61
Sn 118 (ppm)	0,01	0,04	0,02	0,06	0,08	0,40	0,08	0,11	0,11	0,08	0,08	0,11	0,08	0,11
Sb 121 (ppm)	1,53	1,22	0,67	1,95	1,18	1,13	0,84	1,11	1,13	1,39	1,39	1,60	1,10	1,17
Ba 138 (ppm)	113,95	390,81	116,15	137,85	139,02	194,38	167,81	211,64	185,04	91,09	91,09	469,58	342,62	250,28
Pb 208 (ppm)	17,57	51,52	8,36	52,42	20,94	63,25	26,09	21,99	24,51	103,67	103,67	36,86	32,15	29,15
Bi 209 (ppm)	0,30	1,53	0,85	0,50	0,21	0,41	0,34	0,30	0,39	2,58	2,58	0,48	0,54	0,46

ANEXO III

PRIMER ANÁLISIS FISICOQUIMICOS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO ANTABAMBA

MUESTRA	Mvph	pH	Mvorp	%DO	PPmDo	uS/cm	uS/cm^A	MΩ.cm	PPmTds	Psu	T°C	Psi
01	-54,3	8,13	222,7	27,8	2,11	103	89	0,0097	52	0,05	17,81	10,895
02	-50,6	8,08	222,8	26,1	2,0	44	38	0,0227	22	0,02	17,85	10,894
03	-49,9	7,89	231,8	33	2,59	49	43	0,0204	25	0,02	17,84	10,895
04	-38,2	7,86	239,3	31,5	2,45	104	90	0,0096	52	0,05	17,99	10,897
05	-41,7	8,03	237,1	31	2,32	171	148	0,0058	86	0,08	17,88	10,899
06	-65,6	8,35	230	33	2,54	138	119	0,0073	69	0,06	17,91	10,898
07	-54,1	8,12	232,5	35,3	2,72	105	91	0,0095	53	0,05	17,94	10,899
08	-51,3	8,13	233,4	45,2	1,96	107	87	0,0099	50	0,05	17,89	10,894
09	-53,6	8,5	244	47,6	2,4	112	92	0,0045	111	0,11	17,97	10,900
10	186,8	3,66	425,6	27	1,96	116	100	0,0087	57	0,05	17,97	10,901
11	-41,6	7,70	315,8	34,2	2,43	77	67	0,0130	39	0,04	17,94	10,901
12	-34,2	7,79	272,6	34,2	2,54	104	90	0,0096	52	0,05	17,90	10,902
13	-31,4	7,78	270,9	29	2,14	106	92	0,0094	53	0,05	18,01	10,901
14	-22,6	7,72	269,8	35	1,96	102	89	0,0098	51	0,05	18,01	10,905
Promedios	-28,7	7,70	260,6	33,6	2,3	103	88	0,0107	55	0,05	17,92	10,899

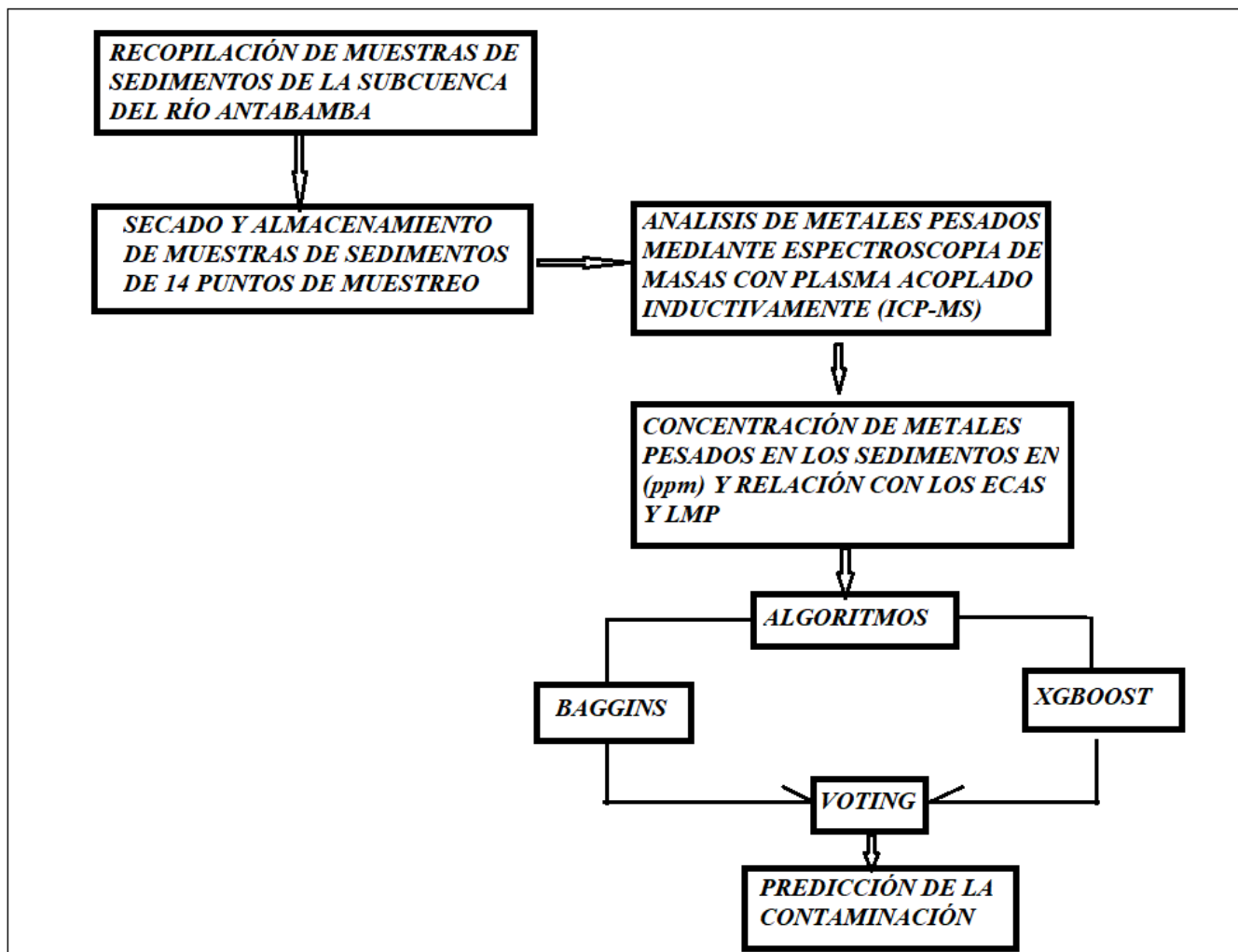
ANEXO IV

SEGUNDO ANALISIS FISICOQUIMICOS DEL RÍO ANTABAMBA

MUESTRA	Mvph	pH	Mvorp	%DO	PPmDo	uS/cm	uS/cm^A	MΩ.cm	PPmTds	Psu	T°C	Psi
01	-64,8	8,21	190,2	30	2,28	402	302	0,0025	200	0,19	12,09	10,819
02	-61,9	8,15	166,1	29,4	2,25	204	155	0,0049	102	0,1	12,42	10,795
03	-46,8	7,88	169,2	34,1	2,68	144	103	0,0069	62	0,07	10,24	10,805
04	-48,9	7,91	176,3	33,5	2,61	395	304	0,0025	197	0,19	12,85	10,973
05	-73,9	8,36	156,5	32,6	2,44	395	317	0,0025	198	0,19	14,52	10,84
06	-66,7	8,23	152	37,4	2,88	387	303	0,0026	195	0,19	13,65	11,132
07	-62,8	8,17	155,1	36,8	2,84	391	308	0,0026	196	0,19	13,75	11,113
08	-69,2	8,25	150,9	52,7	2,28	385	341	0,0026	192	0,18	18,98	11,17
09	-69,8	8,28	142,2	51,4	2,59	392	318	0,0026	196	0,19	15,11	11,198
10	202,1	3,22	457,9	29,2	2,12	498	424	0,002	249	0,24	17,25	11,165
11	-68,1	8,26	188,5	33,4	2,37	399	349	0,0025	199	0,19	18,43	11,219
12	-69,3	8,24	175,6	35,5	2,64	392	327	0,0026	196	0,19	16,23	11,249
13	-69,6	8,27	155	29,4	2,17	394	531	0,0025	197	0,19	16,52	11,222
14	-80,8	8,47	150,7	42,2	2,36	278	322	0,0026	189	0,19	1,2	11,258
Promedios	-46,5	7,85	184,7	36,3	2,465	361	315	0,0030	183	0,18	14,95	11,068

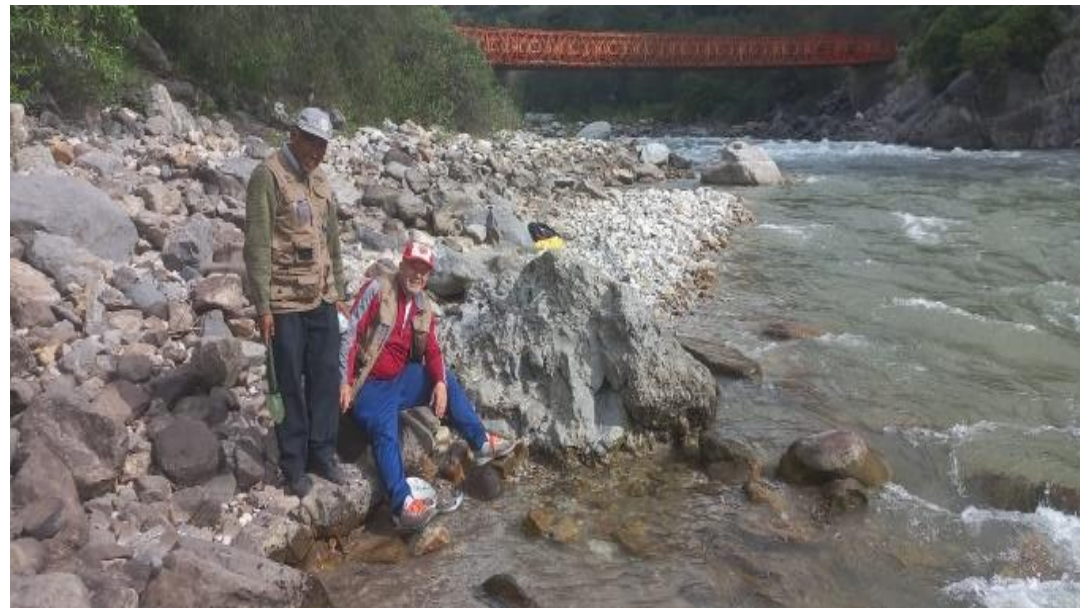
ANEXO V

FLUJO ESQUEMATICO DEL PROCESO DE LA PREDICCIÓN DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO ANTABAMBA



ANEXO VI GALERÍA DE FOTOS















ANEXO VII

PLANO HIDROGRÁFICO DE LA SUBCUENCA DEL RIO ANTABAMBA



ANEXO VIII

PLANO DE UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO DE SUBCUENCA DEL RIO ANTABAMBA

