

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DEL DAM DE METALES PESADOS ENTRE
LOS SECTORES DE MICHQUILLAY ALTO Y BAJO, DISTRITO DE LA
ENCAÑADA, 2023.**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Geólogo

Autor:

Bach. Rios Quiliche Alondra Orquidea

Asesor:

MCs. Ing. Arapa Vilca Victor Ausberto

Cajamarca, Perú

2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador : RIOS QUILICHE ALONDRA ORQUIDEA
DNI : 72657524
Escuela Profesional : INGENIERÍA GEOLÓGICA

2. Asesor : VICTOR AUSBERTO ARAPA VILCA
Facultad : INGENIERÍA

3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor

4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico

5. Título de Trabajo de Investigación:
EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DEL DAM DE METALES PESADOS ENTRE LOS SECTORES DE MICHQUILLAY ALTO Y BAJO, DISTRITO DE LA ENCAÑADA, 2023.

6. Fecha de evaluación: 07 DE ENERO DE 2025

7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)

8. Porcentaje de Informe de Similitud: 11%
9. Código Documento: oid:3117: 419730977
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 20 DE ENERO DE 2025

 <hr/> FIRMA DEL ASESOR Víctor Ausberto Arapa Vilca DNI: 29552145	 <hr/> UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI
--	---

Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258601 soft
Motivo: En señal de conformidad
Fecha: 20/01/2025 11:09:15-0500

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : "EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DEL DAM DE METALES PESADOS ENTRE LOS SECTORES DE MICHQUILLAY ALTO Y BAJO, DISTRITO DE LA ENCAÑADA, 2023"

ASESOR : M.Cs. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0156-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 24 de abril de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **veintiocho días del mes de abril de 2025**, siendo las ocho horas (08:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Secretario : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada "EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DEL DAM DE METALES PESADOS ENTRE LOS SECTORES DE MICHQUILLAY ALTO Y BAJO, DISTRITO DE LA ENCAÑADA, 2023", presentado por la Bachiller en Ingeniería Geológica ALONDRA ORQUIDEA RIOS QUILICHE, asesorada por el M.Cs. Víctor Ausberto Arapa Vilca, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 03.00 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11.00 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 14.00 PTS. **CATORCE** (En letras)

En consecuencia, se lo declara **APROBADA** con el calificativo de **CATORCE** acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las **09.00** horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.


Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Presidente


Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Vocal


M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Secretario


M.Cs. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Asesor

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme dado la vida y la salud para lograr mis objetivos.

A cada uno de los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica por transmitirnos sus conocimientos y por habernos formado con responsabilidad y empeño durante la época universitaria.

A mi familia, por su apoyo incondicional hacia mi persona y porque de una u otra manera han apoyado en la realización de la presente tesis.

Al MCs. Ing. Victor Arapa Vilca, por haber infundido el trabajo constante para la culminación de esta tesis, además del tiempo dedicado como mi maestro y asesor en la investigación.

Alondra Rios

DEDICATORIA

A mis padres Irene y Rafael por permitirme y brindarme la herencia más noble, como lo es la educación.

A mi abuelito, en el cielo, Juan Rios, por ser mi inspiración para realizar mi investigación en el lugar que tanto amó: Michiquillay.

Alondra Rios

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
LISTA DE ABREVIATURAS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II.....	3
MARCO TEÓRICO	3
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
2.1.1 Internacionales.....	3
2.1.2 Nacionales.....	4
2.1.3 Locales.....	4
2.2 BASES TEÓRICAS	6
2.2.1 Evaluación geoambiental.....	6
2.2.2 Drenaje ácido de mina (DAM)	6
2.2.3 Estándares de la calidad ambiental (ECA).....	11
2.2.4 Metales Pesados.....	14
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	26
CAPÍTULO III	28
MATERIALES Y MÉTODOS	28
3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	28
3.1.1 Geográfica	28
3.1.2 Política.....	28
3.2 ACCESIBILIDAD	30
3.3 CLIMA	32
3.4 VEGETACIÓN	32
3.5 HIDROLOGÍA	33
3.6 PROCEDIMIENTOS	35
3.6.1 Definición de variables.....	35
3.6.2 Metodología	35
3.6.2.1 Tipo, nivel, diseño y método de investigación	35
3.6.2.2 Población de estudio	37
3.6.2.3 Muestra.....	37
3.6.2.4 Unidad de análisis.....	37

	Pág.
3.6.3	Técnicas de recolección y análisis de datos37
3.6.3.1	Etapa de pre-campo.....37
3.6.3.2	Etapa de campo.....37
3.6.3.3	Etapa de gabinete.....38
3.6.4	Instrumentos y equipos de recolección de datos.....39
3.7	MARCO GEOLÓGICO40
3.7.1	Geología Local40
3.7.1.1	Grupo Goyllarisquizga40
3.7.1.1.1	Formación Farrat40
3.7.1.2	Grupo Crisnejas41
3.7.1.2.1	Formación Chúlec.....41
3.7.1.2.2	Formación Pariatambo.....42
3.7.1.3	Grupo Pulluicana43
3.7.1.3.1	Formación Yumagual.....43
3.7.1.4	Rocas Intrusivas.....44
3.7.1.4.1	Pórfido Dacítico.....44
3.7.1.5	Depósitos Cuaternarios.....46
3.7.1.5.1	Depósito Coluvial (Q-co).....46
3.7.1.5.2	Depósito fluvial (Q-fl).....47
3.7.1.5.3	Depósito aluvial (Q-al).....48
3.8	MARCO GEOMORFOLÓGICO48
3.8.1	Unidades Geomorfológicas48
3.8.1.1	Unidades geomorfológicas por ambiente Denudacional49
3.8.1.1.1	Colinas.....49
3.8.1.1.2	Lomadas.....50
3.8.1.1.3	Laderas51
3.8.1.1.4	Planicies.....51
3.8.1.1.5	Deslizamiento.....52
3.8.1.2	Unidades geomorfológicas por ambiente Fluvial53
3.8.1.2.1	Cono de deyección o abanico aluvial.....53
3.8.1.2.2	Valle en “V”54
3.8.1.2.3	Terrazas55
	CAPÍTULO IV56
	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS56
4.1	RESULTADOS DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS56

	Pág.
4.1.1	Ubicación de los puntos de muestreo.....56
4.1.1.1	Punto de muestreo 1 (M-01)58
4.1.1.2	Punto de muestreo 2 (M-02)60
4.1.1.3	Punto de muestreo 3 (M-03)62
4.1.1.4	Punto de muestreo 4 (M-04*).....65
4.1.2	Presentación y análisis de resultados de laboratorio66
4.1.2.1	Aluminio (Al).....68
4.1.2.2	Arsénico (As)70
4.1.2.3	Bario (Ba)71
4.1.2.4	Berilio (Be)73
4.1.2.5	Boro (B).....75
4.1.2.6	Cadmio (Cd).....76
4.1.2.7	Cobre (Cu)78
4.1.2.8	Cobalto (Co).....81
4.1.2.9	Cromo (Cr).....83
4.1.2.10	Hierro (Fe)85
4.1.2.11	Litio (Li)87
4.1.2.12	Magnesio (Mg)88
4.1.2.13	Manganeso (Mn).....90
4.1.2.14	Níquel (Ni).....91
4.1.2.15	Plomo (Pb)93
4.1.2.16	Selenio (Se).....95
4.1.2.17	Zinc (Zn).....96
4.2	RESULTADOS GEOAMBIENTALES98
4.2.1	Identificación de pasivos ambientales.....98
4.3	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS103
4.4	CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS106
CAPÍTULO V.....107	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES107	
5.1	CONCLUSIONES107
5.2	RECOMENDACIONES.....108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS109	
ANEXOS119	

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1: Clasificación de las aguas residuales de mina en función al pH.....	10
Tabla 2: Parámetros inorgánicos en la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales	13
Tabla 3: Tipos y subtipos de PAM.....	26
Tabla 4: Vértices del área de investigación.....	28
Tabla 5: Accesibilidad al área de investigación.....	30
Tabla 6: Identificación de variables en la investigación	35
Tabla 7: Clasificación del tipo de investigación	36
Tabla 8: Recursos materiales usados durante la investigación	39
Tabla 9: Índices de inclinación de laderas	49
Tabla 10: Ubicación de los puntos de muestreo	56
Tabla 11: Resultados de los valores de la concentración de los metales pesados en las muestras de agua analizadas.	67
Tabla 12: Resultados de la concentración de Aluminio.....	68
Tabla 13: Resultados de la concentración de Arsénico	70
Tabla 14: Resultados de la concentración de Bario	72
Tabla 15: Resultados de la concentración de Berilio	74
Tabla 16: Resultados de la concentración de Boro	75
Tabla 17: Resultados de la concentración de Cadmio.....	77
Tabla 18: Resultados de la concentración de Cobre.....	79
Tabla 19: Resultados de la concentración de Cobalto.....	81
Tabla 20: Resultados de la concentración de Cromo	83
Tabla 21: Resultados de la concentración de Hierro	85
Tabla 22: Resultados de la concentración de Litio	87
Tabla 23: Resultados de la concentración de Magnesio	88
Tabla 24: Resultados de la concentración de Manganeso.....	90
Tabla 25: Resultados de la concentración de Níquel.....	91
Tabla 26: Resultados de la concentración de Plomo.....	93
Tabla 27: Resultados de la concentración de Selenio.....	95
Tabla 28: Resultados de la concentración de Zinc.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Trayectoria de DAM	10
Figura 2: Ubicación del área de investigación.....	29
Figura 3: Accesibilidad desde Cajamarca a los sectores de Michiquillay Alto y Bajo.	31
Figura 4: Microcuenca hidrográfica del río La Encañada.....	34
Figura 5: Formato de petrografía macroscópica ígnea.	46
Figura 6: Ubicación de los puntos de muestreo de agua.....	57
Figura 7: Ex Campamento minero ubicado en Michiquillay Alto. Coordenadas: E:794659; N:9220710; Cota: 3447 m.s.n.m.....	101
Figura 8: Delimitación y ubicación de los Pasivos Ambientales Mineros.....	102

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1: Vista de la vegetación como pinos, arbustos, eucaliptos y pastizales presentes en el sector de Michiquillay.....	32
Foto 2: Afloramiento rocoso de la Formación Farrat, señalando las areniscas cuarzosas blanquecinas características. Coordenadas: E:795464; N: 9220794; Cota: 3468 m.s.n.m...40	40
Foto 3: a. Afloramiento de calizas grises de la Formación Chúlec. b. Margas de coloración amarillentas características. Coordenadas: E:795200; N: 9220415; Cota: 3395 m.s.n.m.41	41
Foto 4: Afloramiento de la Formación Pariatambo. Coordenadas: E:794159; N: 9220807; Cota: 3400 m.s.n.m.42	42
Foto 5: a. Intercalación de calizas bituminosas con limolitas. b. Caliza bituminosa señalada con círculo rojo.....42	42
Foto 6: Afloramiento de la Formación Yumagual, señalando la capa de calcita. Coordenadas: E:794735; N: 9212456; Cota: 3288 m.s.n.m.....43	43
Foto 7: a. Caliza mudstone grade compacta gris-parduzca. b. Marga amarillenta con contenido fosilífero de Exogyras.44	44
Foto 8: Cuerpo ígneo dacítico, señalando la presencia de calcantita (color azul-verdosa). Coordenadas: E:795678; N: 9221070; Cota: 3498 m.s.n.m.45	45
Foto 9: a. Venillas con contenido de cuarzo, pirita y óxidos de hierro. b. Venillas de stockwork rellenas con óxidos de Fe en roca Dacita alterada por procesos supérgenos.45	45
Foto 10: a. Depósito coluvial en la intersección de la Quebrada Quinuamayo con el río Michiquillay. b. Gravas angulosas (círculos amarillos) con matriz arenosa con contenido de óxidos de Fe. Coordenadas: E:795000; N: 9219581; Cota: 3274 m.s.n.m.....47	47
Foto 11: En a y b se observan los depósitos fluviales generados por las aguas del río Michiquillay47	47
Foto 12: Depósito aluvial al margen izquierdo del río Michiquillay en el sector de Michiquillay Alto.48	48
Foto 13: Colina identificada en la zona de investigación. Coordenadas: E:795166; N: 9220370; Cota: 3427 m.s.n.m.....50	50
Foto 14: Lomas con el relieve y pendientes características. Coordenadas: E:795166; N: 9220370; Cota: 3427 m.s.n.m.....50	50
Foto 15: a. Ladera en Michiquillay Alto, margen izquierdo del río Michiquillay. Coordenadas: E:795317; N: 9220643; Cota: 3425 m.s.n.m. b. Ladera identificada en Michiquillay Bajo, margen izquierdo del río Michiquillay. Coordenadas: E:794790; N: 9219536; Cota: 3298 m.s.n.m.51	51

Foto 16: En a y b se aprecian planicies identificadas aguas abajo del río Michiquillay, sector de Michiquillay Alto. Coordenadas: E:795119; N: 9220638; Cota: 3420 m.s.n.m. y E:794790; N: 9219536; Cota: 3298 m.s.n.m. respectivamente.....	52
Foto 17: Planicie identificada en el margen derecho del río Michiquillay, en el sector de Michiquillay Alto. Coordenadas: E:794883; N: 9220824; Cota: 3457 m.s.n.m.....	52
Foto 18: Deslizamiento ubicado en Michiquillay Alto. Coordenadas: E:795550; N: 9220806; Cota: 3500 m.s.n.m.....	53
Foto 19: Abanico aluvial identificado en la intersección de la quebrada Quinuamayo y el río Michiquillay. Coordenadas: E:794952; N: 9219597; Cota: 3314 m.s.n.m.....	54
Foto 20: Forma típica de la geoforma Valle en “V”, identificado en el sector de Michiquillay Alto. Coordenadas: E:795511; N: 9221050; Cota: 3498 m.s.n.m.	54
Foto 21: Terrazas formadas por el curso del río Michiquillay, en el sector de Michiquillay Bajo. Coordenadas: E:794927; N: 9219599; Cota: 3306 m.s.n.m.	55
Foto 22: Ubicación del punto de muestreo 1 (M-01), río Michiquillay, aguas arriba de la bocamina Michiquillay “El Túnel”.....	58
Foto 23: a. Toma de muestra M-01 en época de lluvia. b. Preservación de la muestra M-01 en época de lluvia.....	58
Foto 24: Sellado y etiquetado de la muestra M-01 para envío a laboratorio en época de lluvia.	59
Foto 25: a. Toma de muestra M-01 en época de estiaje. b. Preservación de la muestra M-01 en época de estiaje.....	59
Foto 26: Sellado y etiquetado de la muestra M-01 para envío a laboratorio en época de estiaje.	60
Foto 27: Ubicación del punto de muestreo 2 (M-02) en la Bocamina Michiquillay “El Túnel”.....	60
Foto 28: a. Toma de muestra M-02 en época de lluvia. b. Preservación de la muestra M-02 en época de lluvia.....	61
Foto 29: Sellado y etiquetado de la muestra M-02 para envío a laboratorio en época de lluvia.	61
Foto 30: a. Toma de muestra M-02 en época de estiaje. b. Preservación de la muestra M-02 en época de estiaje.....	62
Foto 31: Sellado y etiquetado de la muestra M-02 para envío a laboratorio en época de estiaje.	62
Foto 32: Desembocadura del agua del DAM de la bocamina Michiquillay “El Túnel”.	63
Foto 33: Ubicación del punto de muestreo 3 (M-03), en la descarga de la bocamina “El Túnel” al río Michiquillay.....	63
Foto 34: a. Recolección y preservación de la muestra M-03 en época de lluvia. b. Sellado y etiquetado de la muestra M-03 para envío a laboratorio en época de lluvia.....	64
Foto 35: a. Toma de muestra M-03 en época de estiaje. b. Preservación de la muestra M-03 en época de estiaje.....	64
Foto 36: Etiquetado de la muestra M-03 para envío a laboratorio en época de estiaje (menor caudal del río Michiquillay).	65
Foto 37: Ubicación de la muestra M-04* en el río Michiquillay, zona que corresponde a Michiquillay Bajo.....	65
Foto 38: Vestigios de la Planta Piloto ubicada en Michiquillay Alto. Coordenadas: E:795091; N:9220918; Cota: 3486 m.s.n.m.....	98
Foto 39: Depósito de relaves revegetado, ubicado en Michiquillay Alto, al margen derecho del río Michiquillay. Coordenadas: E:794979; N:9220731; Cota: 3439 m.s.n.m.....	99
Foto 40: Bocamina principal “El Túnel” con el drenaje ácido de mina que efluye de su interior. Coordenadas: E:795623; N:9220971; Cota: 3500 m.s.n.m.	100
Foto 41: Poza de sedimentación del drenaje que efluye de la bocamina principal. Coordenadas: E:795628; N:9220952; Cota: 3500 m.s.n.m.	100
Foto 42: Depósito de desmonte adyacente a la bocamina Michiquillay ubicado en Michiquillay Alto. Coordenadas: E:795620; N:9221004; Cota: 3500 m.s.n.m.	101

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1: Comparación de resultados de Aluminio con los ECA del agua-categoría 3.....	68
Gráfico 2: Comparación de resultados de Arsénico con los ECA del agua-categoría 3.....	70
Gráfico 3: Comparación de resultados de Bario con los ECA del agua-categoría 3.....	72
Gráfico 4: Comparación de resultados de Berilio con los ECA del agua-categoría 3.....	74
Gráfico 5: Comparación de resultados de Boro con los ECA del agua-categoría 3.....	75
Gráfico 6: Comparación de resultados de Cadmio con los ECA del agua-categoría 3.....	77
Gráfico 7: Comparación de resultados de Cobre con los ECA del agua-categoría 3.....	79
Gráfico 8: Comparación de resultados de Cobalto con los ECA del agua-categoría 3.....	82
Gráfico 9: Comparación de resultados de Cromo con los ECA del agua-categoría 3.....	84
Gráfico 10: Comparación de resultados de Hierro con los ECA del agua-categoría 3.....	85
Gráfico 11: Comparación de resultados de Litio con los ECA del agua-categoría 3.....	87
Gráfico 12: Comparación de resultados de Magnesio con los ECA del agua-categoría 3.....	89
Gráfico 13: Comparación de resultados de Manganeso con los ECA del agua-categoría 3.....	90
Gráfico 14: Comparación de resultados de Níquel con los ECA del agua-categoría 3.....	92
Gráfico 15: Comparación de resultados de Plomo con los ECA del agua-categoría 3.....	93
Gráfico 16: Comparación de resultados de Selenio con los ECA del agua-categoría 3.....	95
Gráfico 17: Comparación de resultados de Zinc con los ECA del agua-categoría 3.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS

ECA	:	Estándares de la Calidad Ambiental
MINAM	:	Ministerio del Ambiente
DAM	:	Drenaje Ácido de Mina
D.S.	:	Decreto Supremo
PAM	:	Pasivos Ambientales Mineros
pH	:	Potencial de hidrógeno
mg/L	:	Miligramos por litro
ATSDR	:	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades
UTM	:	Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator
m.s.n.m.	:	Metros sobre el nivel del mar
OEFA	:	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
h./min.	:	Horas/Minutos
km/km ²	:	Kilómetro/Kilómetro cuadrado
m.	:	Metros
et al.	:	Y otros
°C	:	Grados Celsius
Ej.	:	Ejemplo
LCM	:	Límite de Cuantificación del Método
NE/SW	:	Noreste / Suroeste
NW/SE	:	Noroeste / Sureste
E	:	Este
N	:	Norte
ppm	:	Partes por millón
Ki-pa	:	Formación Pariatambo
Ki-chu	:	Formación Chúlec
Ti-da	:	Roca Ígnea Dacita
Qda.	:	Quebrada

RESUMEN

La presente investigación se realizó en Michiquillay Alto y Bajo, distrito de La Encañada, provincia y departamento de Cajamarca, con el objetivo de evaluar la calidad geoambiental de las aguas superficiales del río Michiquillay y las afectadas por el pasivo ambiental de la bocamina "El Túnel", mediante un método descriptivo y comparativo, basado en análisis de laboratorio de muestras de agua tomadas en tres puntos durante las estaciones de lluvia (mayo) y estiaje (agosto). Los resultados mostraron concentraciones mayoritariamente por debajo de los límites del D.S. N° 004-2017-MINAM establecidos para aguas según la categoría 3 (riego y bebida de animales), excepto en ciertos casos. El cobre (Cu) superó los estándares en los puntos M-02 y M-03 (1.148 mg/L en lluvia y 0.919 mg/L en estiaje), mientras que el hierro (Fe) lo hizo en el punto M-02 en ambas estaciones (15.87 mg/L en mayo y 9.828 mg/L en agosto). En Michiquillay Bajo, se incluyó un punto referencial (M-04*), cuyos valores según estudios previos del 2013 realizados por la OEFA se encuentran dentro de los límites establecidos. La investigación analizó las posibles causas de estas concentraciones con base en la litología, mineralogía y geomorfología de la zona, concluyendo que la calidad del agua superficial en la zona estudiada es regular ya que se encuentra influenciada por la mineralización del pórfido y el pasivo ambiental.

Palabras claves: Geoambiental, pasivo ambiental minero, DAM, metal pesado, ECA, calidad del agua.

ABSTRACT

The present investigation was carried out in Michiquillay Alto and Bajo, district of La Encañada, province and department of Cajamarca, with the objective of evaluating the geoenvironmental quality of the surface waters of the Michiquillay River and those affected by the environmental liability of the "El Túnel" mine entrance. ", using a descriptive and comparative method, based on laboratory analysis of water samples taken at three points during the rainy (May) and dry (August) seasons. The results showed concentrations mostly below the D.S. limits. No. 004-2017-MINAM established for waters according to category 3 (animal irrigation and drinking), except in certain cases. Copper (Cu) exceeded the standards at points M-02 and M-03 (1.148 mg/L in rain and 0.919 mg/L in dry season), while iron (Fe) did so at point M-02 in both seasons (15.87 mg/L in May and 9.828 mg/L in August). In Michiquillay Bajo, a reference point (M-04*) was included, whose values according to previous 2013 studies carried out by the OEFA are within the established limits. The investigation analyzed the possible causes of these concentrations based on the lithology, mineralogy and geomorphology of the area, concluding that the quality of the surface water in the studied area is regular since it is influenced by porphyry mineralization and environmental liabilities.

Keywords: Geoenvironmental, mining environmental liability, DAM, heavy metal, ECA, water quality.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La actividad minera en la comunidad de Michiquillay, ubicada en el distrito de La encañada, en la provincia y departamento de Cajamarca, se remonta a los años 1957 y 1958, cuando la empresa Northern Perú Mining Company realizó trabajos de exploración en el territorio de la actual comunidad campesina. Dichos estudios fueron continuados por la empresa American Smelting and Refining Company (ASARCO), que, entre 1959 y 1969, realizó trabajos de prospección y exploración en el proyecto Michiquillay para determinar las reservas del yacimiento. Después de que el yacimiento de Michiquillay fuera explorado en reiteradas oportunidades, en el 2007, este proyecto fue adquirido por Anglo American Michiquillay, empresa ganadora de la subasta pública internacional convocada por Proinversión (Bravo, 2019). Actualmente se encuentra como propiedad de la empresa Southern Peru Copper Corporation, la cual viene realizando trabajos de exploración en la zona.

En el área del Proyecto Minero Michiquillay, existen pasivos ambientales mineros, los cuales corresponden a drenajes ácidos, bocaminas, caminos, campamentos, desmontes de mina, plantas de procesamiento y relaves, producto de las actividades mineras realizadas a lo largo del tiempo, siendo uno de los más representativos el de la Bocamina Michiquillay.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente es que se ha considerado la siguiente formulación del problema: ¿Cuál es la evaluación geoambiental del DAM de metales pesados, comprendidos entre los sectores de Michiquillay Alto y Bajo en el distrito de La Encañada?, la cual conlleva a tener una respuesta tentativa y decir que las aguas superficiales correspondientes al DAM de la bocamina y al río Michiquillay tienen concentraciones de metales pesados, cuyos valores exceden a los ECA del agua según la categoría 3 establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM, lo que estaría afectando la calidad de estas aguas.

Es así que, el objetivo principal de la presente investigación es realizar la evaluación geoambiental del DAM de metales pesados entre los sectores de Michiquillay Alto y Michiquillay Bajo, distrito de la Encañada, teniendo como objetivos específicos, evaluar las concentraciones de metales pesados en las aguas superficiales en épocas de estiaje y lluvia,

determinar la calidad de las aguas superficiales comparándolas con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) del agua, según el D.S N° 004-2017-MINAM en la categoría 3, e identificar los aspectos geológicos y geomorfológicos que determinan las causas de las concentraciones de los metales pesados en las aguas superficiales analizadas, es así que, estas concentraciones se tratan de explicar en su mayoría en base a la litología, mineralogía y unidades geomorfológicas de la zona de investigación, puesto que estos también influyen en la concentración de los metales pesados, a lo cual se suma el impacto de la actividad minera ejercida desde muchos años atrás hasta la actualidad.

De esta manera es que, esta investigación busca servir como línea base para futuras investigaciones en la zona y a su vez pretende valer de aporte a la comunidad de Michiquillay a fin de que se implementen proyectos y monitoreos ambientales participativos continuos, en busca de una mejor calidad de las aguas superficiales pertenecientes a la comunidad, principalmente de aquellas que se encuentran expuestas a la actividad minera, a fin de lograr una concientización ambiental.

Finalmente, la presente investigación se ha dividido en cinco capítulos, estructurada de la siguiente manera: El capítulo I constituye la introducción, donde se define la problemática y se describe de forma general la investigación. El capítulo II constituye el marco teórico de la investigación, mismo que comprende a los antecedentes teóricos de la investigación y a las bases teóricas imprescindibles en su desarrollo; así como también una definición de los términos básicos utilizados. El capítulo III corresponde a materiales y métodos, donde se describe la ubicación de la zona de estudio, la accesibilidad y el procedimiento que se ha seguido para alcanzar los objetivos propuestos. Asimismo, se describe el contexto geológico, en cuanto a la geología local y las unidades geomorfológicas de la zona de investigación. El capítulo IV constituye el análisis y discusión de resultados, aquí se detallan los resultados obtenidos en la investigación y su análisis comparativo en base a los parámetros de los ECA para el agua-categoría 3 y a las características geológicas de la zona de estudio. En el capítulo V se detallan las conclusiones y recomendaciones derivadas de los resultados en base a los objetivos de la investigación. Por último, se mencionan las referencias bibliográficas y los anexos utilizados en el desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 Internacionales

Alcívar y Mosquera (2011), en su investigación denominada: Concentración de Metales Pesados (Cr total, Pb, Cd) en agua superficial y sedimentos en el Estero Salado (Guayaquil), determinaron la concentración de metales pesados Cadmio, Cromo total y Plomo, en las matrices agua superficial y sedimento, concluyendo que, los valores encontrados en cada una de las matrices reflejan la problemática medio ambiental existente en este ecosistema debido principalmente a las actividades industriales, crecimiento poblacional acelerado, deforestación y el mal manejo de desecho y descargas de uso doméstico e industrial no tratadas, ocasionando así el deterioro de este ecosistema.

Cervantes (2014), en su investigación titulada: Caracterización del drenaje ácido y de las rocas asociadas a una mina para evaluar su posible aplicación en un sistema de tratamiento pasivo, tuvo como objetivo evaluar la posibilidad de un tratamiento pasivo con el uso de las rocas de la zona, a partir de la caracterización del DAM y de las rocas asociadas al yacimiento de la mina, cuyos resultados indicaron que la filita y la caliza tienen minerales como calcita, micas y plagioclasas que tiene capacidad de neutralizar el DAM, concluyendo que es posible utilizar estas rocas en un sistema de tratamiento pasivo.

Sarmiento (2014), en su investigación titulada: Estudio de la contaminación por drenajes ácidos de mina de las aguas superficiales en la cuenca del río Odiel (España), tuvo como objetivo caracterizar y cuantificar el grado de la contaminación por drenaje ácido de minas y estudiar sus variaciones estacionales, concluyendo que de los 1149 km. de cursos fluviales de la cuenca del río Odiel, 427 km. se encuentran afectados por drenajes ácidos de minas, lo que supone el 37% de la red hidrológica.

2.1.2 Nacionales

Huarcaya (2018), en su tesis denominada: Identificar los niveles de concentración de metales pesados presentes en las aguas provenientes de la rampa San Marcelo – CIA de Minas Sillustani S.A., tuvo como objetivo el identificar y determinar la concentración de metales pesados de los efluentes de la rampa San Marcelo, resultando que los valores son altos, los mismos que están por encima de los Límites Máximos Permisibles, concluyendo que existe contaminación hacia el recurso hídrico con estas concentraciones de metales pesados, los cuales son dañinos para la salud e integridad de los seres bióticos, así como del medio ambiente.

Cuentas et al. (2019). En su artículo denominado: Evaluación de riesgos de pasivos ambientales mineros en la comunidad de Condoraque – Puno, tuvieron como objetivo la evaluación simplificada de riesgos por contaminación utilizándose la metodología propuesta por Golder Associates. Se identificaron siete PAMs, cuyos resultados indicaron que, el drenaje que fluye de la rampa San Marcelo y la infiltración del mismo en la napa freática tiene índices de probabilidad de ocurrencia alto, pero sus consecuencias son: alta con respecto a la vida acuática, moderada con respecto a la vida terrestre, baja con respecto a las personas y despreciable con respecto a la agricultura y la ganadería.

2.1.3 Locales

Chávez (2016), en su tesis denominada: Determinación de metales pesados en el agua del manantial La Quintilla y línea de conducción del sistema de agua potable del distrito de Sucre – Celendín, determinó la concentración de metales pesados (Pb, Cd, Fe, Cu, Cr, Al, Zn) en época de estiaje y época húmeda, con la finalidad de determinar si el agua que proviene del manantial la Quintilla y la línea de conducción del sistema de agua potable del distrito de Sucre presenta una elevada concentración de metales pesados, concluyendo que los valores de concentración en mg/L de metales pesados, no exceden a los valores permisibles establecidos en la normativa nacional e internacional para consumo humano (D.S N° 031-2010-SA).

Córdova (2017), en su tesis denominada: Calidad del agua en la microcuenca del río Challhuahuacho comparado con los estándares de calidad ambiental para riego y bebedero

(ECA 3) en la zona de Challhuahuacho, Cotabamba – Apurímac – 2016, concluyó que, aguas abajo, la microcuenca no cumple con los ECA categoría 3 para riego de vegetales y bebedero de animales pues están contaminadas con residuos termo tolerantes procedente de los seres humanos y de animales, haciendo que no sea apta para consumo de ningún ser vivo.

Flores (2016), en su investigación titulada: Evaluación de la concentración de metales pesados en las aguas del río Grande y su relación con la actividad minera, cuantifica la presencia de metales pesados en las aguas del río Grande, para así determinar si su concentración supera los estándares nacionales de calidad ambiental para agua, concluyendo que si bien los resultados demuestran que en todos los puntos de monitoreo existen metales pesados, no se puede ultimar que sea debido a la actividad minera, siendo el plomo el único metal que en cinco puntos de monitoreo sobrepasó los Estándares de Calidad Ambiental para Agua.

Izquierdo y Verástegui (2017), en su tesis denominada: Concentración de metales pesados (As, Cd, Cr, Hg Y Pb) en el agua de la cuenca baja del río Jequetepeque, en relación a los estándares de calidad del agua - categoría 3, tienen como objetivo principal determinar la concentración de metales pesados As, Cd, Cr, Hg y Pb en el agua de la cuenca baja del Río Jequetepeque. Los resultados fueron concentraciones menores a los estándares establecidos por el D.S. N°015-2015-MINAM para aguas superficiales categoría 3 (D1: Riego de cultivos de tallo alto y bajo y D2: bebida de animales) y solo fue detectada la presencia de Arsénico, Cadmio y Plomo.

Sáenz y Vásquez (2022), en su investigación denominada: Efecto de la descarga de agua del pasivo ambiental minero Condorguachana en el río Michiquillay – La Encañada, determinan la concentración de los parámetros fisicoquímicos e inorgánicos; para realizar previamente cierta comparación con las normativas vigentes en el D.S. N.º 004-2017-MINAM -Categoría 3, Estándares de Calidad Ambiental (ECA), cuyos resultados muestran niveles bajos de parámetros fisicoquímicos e inorgánicos en comparación con los ECA-III, concluyendo que la descarga de agua del pasivo ambiental minero Condorguachana no impacta de manera negativa el agua del río Michiquillay, La Encañada.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Evaluación geoambiental

La geología ambiental es la aplicación del conocimiento geológico a la investigación del ambiente. Apoya al diagnóstico y mitigación de los problemas de contaminación, minimizando la posible degradación ambiental o maximizando la posibilidad del adecuado uso del ambiente natural o modificado. También se ocupa de los peligros y riesgos por fenómenos naturales (geológicos e hidrometeorológicos) y antropogénicos (causados por el ser humano) (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

En la evolución natural del paisaje, los elementos que lo componen interactúan, y se combinan de diferentes formas, dando lugar a la formación de paisajes diferenciados, denominados unidades geoambientales (Gola, 2017).

Según Edvaldo (2010), citado por Gola (2017), las unidades geoambientales son entendidas como un paisaje con características más o menos homogéneas. Estas unidades ocupan cierta porción de superficie terrestre, a la vez, que revelan toda una serie de características propias de acuerdo a la geología, geomorfología, climatología, hidrografía y formaciones vegetales, además de las potencialidades naturales y las limitaciones de uso.

Corrales (2019), en su investigación, menciona que la evaluación geoambiental tiene por objetivo verificar el cumplimiento de la normativa y los parámetros ambientales actualmente vigentes. Estas evaluaciones ambientales permiten conocer el estado de los componentes del entorno, posibilitando la planificación de las acciones a tomar a fin de mantener o mejorar las características del medio ambiente. Además de esto, indica que, es de vital importancia que el planificador tenga en cuenta el conjunto de elementos del sistema ambiental, que le permitan un análisis en conjunto de la situación a evaluar, tomando en cuenta las potencialidades y oportunidades con que cuenta.

2.2.2 Drenaje ácido de mina (DAM)

Según la Dirección General de Asuntos Ambientales (2009), el fenómeno de drenaje ácido proveniente de minerales sulfurosos es un proceso que ocurre en forma natural. Hace cientos

de años, se descubrieron muchos yacimientos minerales por la presencia de agua de drenaje rojiza, indicando la presencia de minerales sulfurosos. Hace sólo alrededor de 20 años, se desarrolló una preocupación ambiental asociada con esta agua ácida, rica en metales disueltos, así como el término "drenaje ácido de mina" o DAM. No obstante, el drenaje ácido no ocurre únicamente en las minas, por lo que el término "drenaje ácido de roca" o DAR también es usado comúnmente.

Por su parte, Alfonso et al. (2020) mencionan que, si las actividades que son desarrolladas en el proyecto minero exponen el material sulfuroso al agua y al aire, el drenaje resultante es Drenaje Ácido Minero (DAM) mientras que el DAR se forma por la oxidación natural de minerales sulfurosos cuando son expuestos al aire y al agua.

Partiendo de esto y como la presente investigación se centra en el análisis del agua que proviene de un pasivo ambiental como es una bocamina, producto de una labor minera antigua, se considera el término Drenaje Ácido de Mina (DAM).

La Dirección General de Asuntos Ambientales (2009), considera que el drenaje ácido se refiere a un drenaje contaminado que resulta de la oxidación de minerales sulfurados y lixiviación de metales asociados, provenientes de las rocas sulfurosas cuando son expuestas al aire y al agua. El desarrollo del DAM es un proceso dependiente del tiempo y que involucra procesos de oxidación tanto química como biológica y fenómenos físico-químicos asociados, incluyendo la precipitación y el encapsulamiento.

El término drenaje contaminado, se refiere al agua de drenaje que contiene niveles de cualquier elemento o contaminante que no se encuentre dentro de los límites reglamentarios para el agua que drena de un asiento minero, o que podría ocasionar un impacto ambiental adverso. Según el Ministerio de Energía y Minas (1995), generalmente el DAM se caracteriza por:

- valores de pH por debajo de 7 hasta 1.5
- alcalinidad decreciente y acidez creciente
- concentraciones elevadas de sulfato
- concentraciones elevadas de metales (disueltos o totales)
- concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales

Según Zamora y Meza (2022), el drenaje ácido en operaciones mineras, se caracteriza por tener una alta acidez, metales pesados tóxicos disueltos y sulfato, y se genera cuando los residuos ricos en sulfuro se exponen al agua de la lluvia y al oxígeno del aire. Este tipo de drenaje se genera en el interior de las minas subterráneas; aunque, en ambos casos, por la acción de los tres ingredientes principales: Sulfuros, agua y oxígeno, siendo la característica principal de los DAM, su elevada acidez, la presencia de metales pesados tóxicos disueltos y de sulfato; por lo que, desde muchas décadas hasta ahora, se constituye en una de las preocupaciones ambientales más importantes en la gestión ambiental de las operaciones mineras.

2.2.3 Fuentes del DAM

Quispe (2019), señala que, el principal mineral responsable de la generación de drenaje ácido de minas (yacimientos no explotados) es la pirita (FeS_2), esto debido a que su fórmula influye un átomo de azufre extra, que al oxidarse en presencia de agua da lugar a la formación de ácido sulfúrico. Además de ello, menciona a las siguientes fuentes de generación de drenaje ácido:

- Labores subterráneas
- Acopios de estériles o minerales económicos (desmonte)
- Tajos abiertos
- Pilas de lixiviación
- Vertientes naturales
- Depósitos de relaves

Por su parte la Dirección General de Asuntos Ambientales (2009), indica que los minerales sulfurosos están en todas partes en el ambiente geológico, pero se encuentran principalmente en rocas que yacen debajo de una capa de suelo y, a menudo, debajo de la napa freática. Bajo condiciones naturales, el suelo que cubre la roca y el agua subterránea minimizan el contacto con el oxígeno, permitiendo así que la generación de ácido prosiga a una velocidad tan baja que el efecto sobre la calidad general del agua será insignificante o indetectable. La exposición de roca sulfurosa reactiva al aire y al agua, como resultado de actividades tales como la construcción de carreteras o explotación minera, puede acelerar la velocidad de generación de ácido y ocasionar un impacto en el ambiente.

En un asiento minero, las fuentes primarias de drenaje ácido son las áreas en las cuales la roca de mina ha sido disturbada, y la superficie expuesta. Entre las fuentes principales del DAM están:

- las pilas de desmonte
- las pilas de lixiviación
- los embalses de relaves
- las labores mineras subterráneas
- las minas de tajo abierto
- la roca de construcción -relleno, represas, carreteras.

Además, el drenaje ácido puede ocurrir en otras áreas del asiento minero, las cuales contienen generalmente menor volumen de roca, pero que deberían considerarse en la evaluación del lugar, por ejemplo:

- derrames de concentrados y relaves
- almacenamiento de concentrados e instalaciones de descarga
- apilamiento de mineral
- superficies de roca expuestas al cortar rocas para carreteras, etc.
- caminos por los cuales pasan camiones o ferrocarriles con concentrados
- aliviaderos de emergencia
- pozas de almacenamiento de lodos en plantas de tratamiento.

Es de fundamental importancia identificar todas y cada una de las fuentes potenciales de drenaje ácido de mina, tanto en el diseño como en la operación de cada asiento minero. También, es importante que, al desarrollar el programa de pruebas de predicción, se comprendan las diferencias en los controles físicos y químicos del DAM para cada una de estas fuentes (Dirección General de Asuntos Ambientales, 2009)

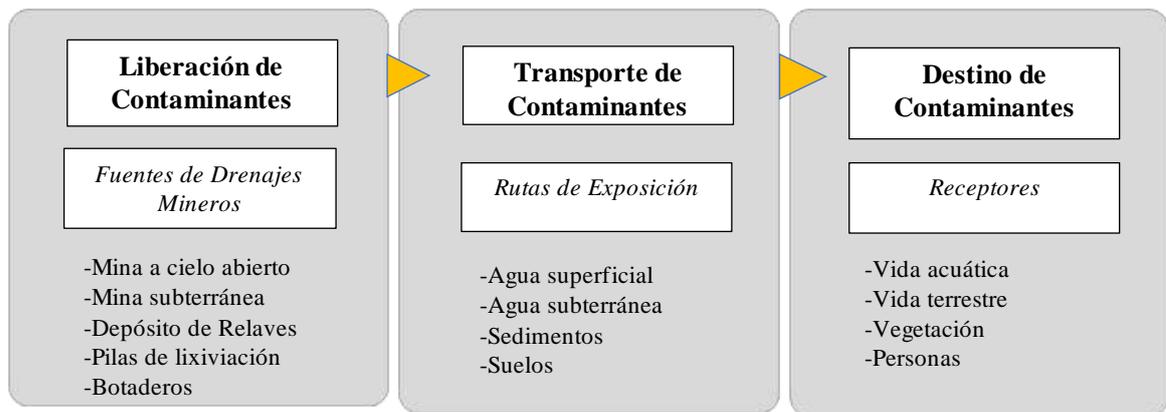


Figura 1: Trayectoria de DAM

Fuente: Modificado de Alfonso et al., (2020)

2.2.3.1 Categorías de drenajes de mina

Según Aduvire (2006), para determinar el tipo de drenaje es necesario hacer un estudio detallado de las condiciones físicas del medio, el clima de lugar y una caracterización de los efluentes de mina, para ello, se realizan muestreos de agua y sedimentos para su análisis en laboratorio y determinar las concentraciones metálicas presentes, también se recurre a la medición in-situ de parámetros como: pH, contenido de oxígeno, potencial redox, conductividad, temperatura, Fe, acidez/alcalinidad, turbidez y otros.

White (1968), citado por Aduvire (2006), hace una clasificación de las aguas residuales de mina en función al pH y los agrupa en 6 categorías, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de las aguas residuales de mina en función al pH.

Clase	pH
Altamente ácidas	1,5 a 4,5
Blandas, ligeramente ácidas	5,0 a 7,0
Duras, neutras a alcalinas	7,0 a 8,5
Blandas, alcalinas	7,5 a 11,0
Muy salinas	6,0 a 9,0
Blandas ácidas	3,5 a 5,5

Fuente: Aduvire, (2006)

Aduvire (2006), también menciona que, el drenaje ácido de mina, es la consecuencia de la oxidación de algunos sulfuros minerales (pirita, pirrotita, marcasita, etc.) en contacto con el oxígeno del aire y agua: *Sulfuro mineral + Oxígeno + Agua = Sulfato + Acidez + Metal*.

Además, señala que, otros oxidantes como hierro férrico puede reemplazar al oxígeno del aire en la reacción y en algunos casos al oxígeno del agua: *Sulfuro mineral + Hierro férrico + Agua = Sulfato + Acidez + Metal*.

2.2.4 Estándares de la calidad ambiental (ECA)

La Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, define a los ECA como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente.

Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos.

El Instituto de la Calidad Ambiental (2023), refiere que el Estándar de Calidad Ambiental para el Agua, es el que se utiliza para medir el estado de la calidad del agua en el ambiente es decir ya sea de uso humano, riego o industrial dentro de una ciudad, región o país. Asimismo, este instrumento de medición toma como base las medidas de la concentración de elementos o parámetros presentes en el agua en su condición de cuerpo receptor, el cual no debería representar riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente.

Dentro de la extensión de la aplicación de Estándares de Calidad Ambiental para Agua, estos se encuentran agrupados en 4 categorías, según el Decreto Supremo N°004-2017-MINAM:

Categoría 1: Poblacional y recreacional

Categoría 2: Actividades marino costeros

Categoría 3: Riego de vegetales y Bebida de animales

Categoría 4: Conservación del Ambiente Acuático

Los ECA para Agua regulan 104 parámetros, entre los cuales se encuentran los elementos microbiológicos y físico-químicos. Estos parámetros típicos determinantes en cada caso son:

En el uso doméstico se considera: turbidez, sólidos disueltos, tóxicos, coliformes. Asimismo, en el uso industrial se consideran: sólidos disueltos y en suspensión. Por último, en el riego se consideran: sólidos disueltos, contenido de sodio (Instituto de la Calidad Ambiental, 2023).

Para fines de análisis de la presente investigación, se usaron los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, según la categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales, subcategorías D1 y D2, las cuales hacen referencia a las aguas destinadas para riego de vegetales y bebida de animales respectivamente, mismas que se detallan a continuación, según lo dispuesto en el Decreto Supremo N°004-2017-MINAM.

a) Subcategoría D1: Riego de vegetales

Entiéndase como aquellas aguas utilizadas para el riego de los cultivos vegetales, las cuales, dependiendo de factores como el tipo de riego empleado en los cultivos, la clase de consumo utilizado (crudo o cocido) y los posibles procesos industriales o de transformación a los que puedan ser sometidos los productos agrícolas:

- Agua para riego no restringido

Entiéndase como aquellas aguas cuya calidad permite su utilización en el riego de: cultivos alimenticios que se consumen crudos (Ej. hortalizas, plantas frutales de tallo bajo o similares); cultivos de árboles o arbustos frutales con sistema de riego por aspersion, donde el fruto o partes comestibles entran en contacto directo con el agua de riego, aun cuando estos sean de tallo alto; parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales; o cualquier otro tipo de cultivo.

- Agua para riego restringido

Entiéndase como aquellas aguas cuya calidad permite su utilización en el riego de: cultivos alimenticios que se consumen cocidos (Ej.: habas); cultivos de tallo alto en los que el agua de riego no entra en contacto con el fruto (Ej.: árboles frutales); cultivos a ser procesados, envasados y/o industrializados (Ej.: trigo, arroz, avena y quinua); cultivos industriales no comestibles (Ej.: algodón), y; cultivos forestales, forrajes, pastos o similares (Ej.: maíz forrajero y alfalfa).

b) Subcategoría D2: Bebida de animales

Entiéndase como aquellas aguas utilizadas para bebida de animales mayores como ganado vacuno, equino o camélido, y para animales menores como ganado porcino, ovino, caprino, cuyes, aves y conejos.

El Decreto Supremo N°004-2017-MINAM, clasifica la categoría 3 en parámetros tales como los Físico-Químicos, Inorgánicos, Orgánicos y Microbiológicos y parasitológicos, en tal sentido, con fines de estudio y análisis, en la presente investigación se usarán los parámetros inorgánicos, los cuales se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros inorgánicos en la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido(c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
INORGÁNICOS				
Aluminio	mg/L	5	5	
Arsénico	mg/L	0,1	0,2	
Bario	mg/L	0,7	**	
Berilio	mg/L	0,1	0,1	
Boro	mg/L	1	5	
Cadmio	mg/L	0,01	0,05	
Cobre	mg/L	0,2	0,5	
Cobalto	mg/L	0,05	1	
Cromo Total	mg/L	0,1	1	
Hierro	mg/L	5	**	
Litio	mg/L	2,5	2,5	
Magnesio	mg/L	**	250	
Manganeso	mg/L	0,2	0,2	
Mercurio	mg/L	0,001	0,01	
Níquel	mg/L	0,2	1	
Plomo	mg/L	0,05	0,05	
Selenio	mg/L	0,02	0,05	
Zinc	mg/L	2	24	

Nota: El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.

Fuente: D.S. N°004-2017-MINAM.

2.2.5 Metales Pesados

Chávez (2011), indica que el término “metal pesado”, no tiene una base científica rigurosa o una definición química. Aunque muchos de los elementos que se enlistan en el término “metal pesado” tienen una gravedad específica mayor que cinco, existen diversas excepciones a esta regla. Estrictamente, y desde el punto de vista químico, los metales pesados están constituidos por elementos de transición y post-transición incluyendo algunos metaloides como el arsénico y selenio.

Desde el punto de vista químico, Garcia et al. (2002), refieren que los metales pesados se definirían como aquellos elementos metálicos cuyo peso específico es mayor de 5 g/cm^3 o con un número atómico superior a 20. Pero estos autores proponen una definición más práctica del metal pesado que sería la de clasificar como tales a aquellos que por sus efectos tóxicos y persistencia son considerados como polucionantes ambientales.

Por otro lado, Cuellar (2018), menciona que de manera general se utiliza el término metal pesado para hacer referencia a los átomos que son tóxicos para la célula, por esta razón se agrupan, además de los elementos pesados, algunos metales ligeros y otros no metales. Debido a esto, elementos como As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Se, entre otros, son englobados en este grupo.

Lo mencionado por Cuellar (2018) coincide con lo que indican Neira et al. (2021), quienes definen a un metal pesado como metal o metaloide con importancia biológica, que puede ser peligroso al acumularse en animales o plantas. Son de gran importancia por su alto potencial tóxico, debido a su alta difusión. Los principales metales basados en su toxicidad son: mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), arsénico (As), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn), níquel (Ni), plata (Ag).

Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre. Estos se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas como por ejemplo las descargas industriales y los desechos mineros (Chávez,2011).

Según Cuellar (2018), los metales pesados se clasifican en dos grandes grupos: metales esenciales y metales no esenciales. Los metales o elementos esenciales, también conocidos como oligoelementos o micronutrientes, son necesarios en ciertas concentraciones para un buen desarrollo de la salud humana, tornándose tóxicos por encima de ciertos niveles. Dentro

de este grupo se pueden mencionar: As, B, Cr, Cu, Co, Fe, Mo, Ni, Se y Zn. El segundo grupo de metales no esenciales corresponde a los metales que no tienen funciones biológicas conocidas, éstos son altamente tóxicos en todas las concentraciones, algunos son: Ba, Cd, Hg, Pb, Sb, Bi.

Por su parte, Oyarzun e Higuera (2007), refieren que lo que hace tóxicos a los metales pesados no son en general sus características esenciales, sino las concentraciones en las que pueden presentarse, y casi más importante aún, el tipo de especie que forman en un determinado medio. A su vez, resalta que los seres vivos “necesitan” (en pequeñas concentraciones) a muchos de estos elementos para funcionar adecuadamente. Ejemplos de metales requeridos por el organismo incluyen el cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, vanadio, estroncio y zinc. El caso del hierro es notable entre estos, siendo vital para la formación de hemoglobina.

2.2.5.1 Contaminación por metales pesados

Actualmente uno de los mayores problemas a nivel ambiental es la contaminación de las fuentes hídricas del mundo por metales pesados, ya que es debido a la toxicidad que presentan los metales pesados en el agua de los ríos, que son considerados como un serio problema para los habitantes de las poblaciones que se abastecen de dichos ríos en especial si se considera que el incremento en la concentración de estos metales en las fuentes hídricas procede de las diversas actividades antropogénicas, elevando, además los efectos potencialmente nocivos sobre los diferentes sistemas ecológicos y el ambiente, los cuales son el soporte de la vida humana lo cual acarrea serios problemas a nivel económico tanto a nivel local como nacional debido al aumento en los costos de los tratamientos médicos y una disminución en la productividad de los habitantes de la zona (Pabón et al., 2020).

La contaminación por metales pesados puede llegar a afectar a todo tipo de ecosistemas acuáticos debido a su permanencia en el medio natural tras el vertido. Pueden alcanzar acuíferos por infiltración de estos compuestos, dependiendo en muchos casos de factores como el pH del medio o del propio vertido. Pueden alcanzar zonas húmedas o lagunas por escorrentía o incluso por la alimentación desde acuíferos o ríos. El transporte de estas sustancias a través del agua y su carácter recalcitrante, hace que se puedan arrastrar, alcanzando cualquier ecosistema acuático. La presencia de estos metales pesados en el agua

va a condicionar su uso. Entre estos elementos se pueden considerar como más tóxicos el cadmio, el mercurio, el estaño, el plomo, el talio, el arsénico, el zinc, el cobre, el cromo y el níquel, los cuales presentan efectos tóxicos derivados de su acción sobre grupos funcionales vitales, desplazamiento de elementos esenciales del lugar de coordinación, modificaciones estructurales de algunos lugares activos o la ruptura de biomembranas. Todos estos efectos nocivos afectan a los seres vivos (Vilchez, 2005).

A continuación, se detallan a los elementos pesados y sus efectos en el ambiente, analizados en la presente investigación y que son considerados como parámetros inorgánicos según los ECA para agua-categoría 3 establecidos en el D.S. N°004-2017-MINAM.

❖ **Aluminio (Al):**

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre y se encuentra extensamente distribuido. Es un elemento muy reactivo y nunca se encuentra en forma de metal libre en la naturaleza. Se encuentra combinado con otros elementos, generalmente oxígeno y sílice. Estos compuestos químicos se encuentran comúnmente en el suelo, en minerales (Ej.: zafiros, rubíes, turquesas), en rocas (especialmente rocas ígneas) y en arcillas. El aluminio no puede ser destruido en el ambiente, solo puede cambiar de forma o adherirse o separarse de partículas (ATSDR, 2008).

La toxicidad del aluminio es considerada el factor más importante que limita el crecimiento de las plantas. La presencia de este elemento en suelos ácidos significa la disminución de la producción agraria porque inhibe y afecta las estructuras de las raíces, haciéndolas ineficientes para la absorción del agua y de nutrientes esenciales como el calcio y el magnesio (Torrellas, 2013). Los pájaros y otros animales que se alimentan de peces contaminados sufren las secuelas de su toxicidad. La acumulación de aluminio en las plantas causa problemas de salud a los animales que las consumen, constituyendo la entrada de este elemento a las cadenas tróficas terrestres. La presencia de altas concentraciones de aluminio en los suelos, tanto de origen natural como antropogénico, representa un factor ecológicamente significativo (Zhang, 2010 citado por Torrellas, 2013).

❖ **Arsénico (As):**

El arsénico es un elemento natural ampliamente distribuido en la corteza terrestre. En el ambiente, el arsénico se combina con oxígeno, cloro y azufre para formar compuestos inorgánicos de arsénico. El arsénico ocurre naturalmente en el suelo y en minerales y, por lo tanto, puede entrar al aire, al agua y a suelos en otras áreas en polvo que levanta el viento y puede entrar al agua en efluente de lluvia o en agua que se filtra a través del suelo. El arsénico no puede ser destruido en el ambiente, solamente puede cambiar de forma (ATSDR, 2008).

El arsénico ocasiona un gran estrés a las plantas, lo que normalmente se manifiesta como una reducción significativa en la tasa fotosintética, y si la concentración es severa, puede ocasionar la muerte de las plantas. Cuando se utilizan aguas con arsénico es importante tener en cuenta como este elemento se acumula en las plantas, ya que prefiere acumularse en raíces en primer lugar, seguido de hojas como segundo lugar y en tercer lugar las semillas o frutos (Fertilab, 2021). En animales, la exposición a compuestos orgánicos de arsénico puede producir bajo peso de nacimiento, malformaciones y la muerte del feto. Las dosis que pueden producir estos efectos también producen efectos en las madres (ATSDR, 2008).

❖ **Bario (Ba):**

El bario es un metal blanco-plateado que existe en el ambiente solamente en minerales que contienen mezclas de elementos. Se combina con otras sustancias químicas, por ejemplo, azufre, carbono y oxígeno, para formar compuestos de bario. El tiempo que el bario permanecerá en el aire, el suelo, el agua o los sedimentos dependerá de la forma de bario que se ha liberado. Los compuestos de bario, por ejemplo, el sulfato o carbonato de bario, que no se disuelven muy bien en agua, pueden permanecer en el ambiente mucho tiempo (ATSDR, 2008).

En animales, la ingestión de cantidades muy altas de compuestos de bario que se disuelven fácilmente puede alterar el ritmo del corazón y producir parálisis y posiblemente la muerte. Algunos animales que ingirieron bario durante mucho tiempo sufrieron daño del riñón, pérdida de peso y algunos fallecieron (ATSDR, 2008). En cuanto al bario en las plantas, este metal generalmente se presenta como sulfatos y carbonatos relativamente insolubles o unidos firmemente a arcillas y materia orgánica, que limitan el potencial de la absorción de

las plantas. La absorción en frutas y verduras generalmente es baja, sin embargo, puede haber un poco de absorción en las raíces y hojas verdes. El pH bajo en el suelo incrementa la solubilidad del bario presente en el suelo y la absorción en las plantas comestibles puede ser mayor si el suelo es ácido (pH menor de 6.0) (Cornell University, 2015).

❖ **Berilio (Be):**

El berilio es un metal liviano que se encuentra de manera natural en las rocas, el carbón, la tierra y el polvo volcánico. Este metal no se degrada en el medioambiente y es más probable que se encuentre en el sedimento (capas de tierra) en cuerpos de agua que en el agua en sí. El berilio llega a cuerpos de agua cuando el clima degrada la tierra y las rocas y a su vez, el berilio que está en el aire cae al suelo o lo transporta la lluvia (ATSDR, 2008).

Los estudios de berilio en animales han demostrado que comer o beber este metal puede causar daño estomacal (ATSDR, 2008). El berilio no se acumula en los cuerpos de los peces, pero algunas frutas y vegetales como son los frijoles y las peras pueden contener niveles significantes de berilio. Estos niveles pueden entrar en los animales cuando esos alimentos son consumidos, pero por suerte la mayoría de los animales excretan el berilio rápidamente a través de los órganos excretores como el sistema urinario y fecal. Las pruebas de laboratorio han indicado que es posible que el berilio produzca cáncer y cambios en el ADN de los animales, aunque de momento no hay evidencia del estudio de campo que respalde estos descubrimientos (Lenntech, 2024).

❖ **Boro(B):**

El boro es un elemento ampliamente distribuido en minerales de la corteza terrestre. Ocupa el lugar 51 en la lista de los elementos más comunes en la corteza terrestre. El boro se encuentra en el ambiente combinado principalmente con oxígeno en compuestos llamados boratos y puede ser liberado al aire, al agua o al suelo como consecuencia de la erosión natural de suelos y rocas (ATSDR,2008).

Según GreenFacts (2005), en cuanto a los efectos del boro en las plantas, este puede causar síntomas de toxicidad en determinadas áreas provocando graves daños a las plantas debido, por ejemplo, al uso de agua de riego contaminada con una alta concentración de este

elemento, mientras que, en animales, el boro se distribuye ampliamente por todo el organismo y algo es incorporado a los huesos. Este es rápidamente excretado pero el boro que se incorpora a los huesos tarda más en ser eliminado.

❖ **Cadmio (Cd):**

Es un metal que se encuentra en la corteza terrestre, asociado con minerales de zinc, plomo y cobre. En el agua el cadmio existe en forma de ion hidratado o como complejo iónico asociado a otras sustancias inorgánicas u orgánicas. Las formas de cadmio solubles se movilizan en el agua. Las formas insolubles son inmóviles y se depositarán en el sedimento donde serán adsorbidas (ATSDR, 2008).

En cuanto a los efectos del cadmio en animales, este es un metal pesado no esencial, es decir, sin ninguna función biológica. Tiende a bioacumularse tanto en ecosistemas acuáticos como terrestres, especialmente en vertebrados, en concreto a través de órganos como el riñón y el hígado, pero también se acumula en invertebrados, algas y plantas. Sus efectos sobre las aves y los mamíferos suelen deberse a la presencia de daño renal (GreenFacts, 2015). Por el contrario, en plantas este metal se reconoce como uno de los más tóxicos e inhibitorios de los procesos fisiológicos de estas. Estudios en varios cultivos han evidenciado que reduce el crecimiento, la actividad fotosintética, la transpiración y el contenido de clorofila, también, provoca clorosis, estrés oxidativo, desequilibrios nutricionales y modifica la actividad de enzimas, involucradas en el metabolismo de los ácidos orgánicos y en el ciclo de Krebs (Hernández et al., 2019).

❖ **Cobre (Cu):**

El cobre es un metal que ocurre naturalmente en el ambiente en rocas, el suelo, el agua y el aire. El cobre es un elemento esencial para plantas y animales (incluso seres humanos), lo que significa que es necesario para la vida (ATSDR, 2008).

En cuanto a plantas, el cobre es un elemento tóxico para las raíces del suelo en altas concentraciones dentro de la solución del suelo. Una alta concentración en el subsuelo es causada cuando el pH del agua de este estrato está por debajo de 5.4. El Cu es más tóxico para las raíces en relación al Al en las mismas concentraciones, especialmente en plantas que son particularmente sensibles al Cu (Fertilab, 2012). Por otro lado, en animales, el cobre

metálico produce fuerte inflamación de la mucosa gastrointestinal, por lo que la intoxicación aguda está caracterizada por severa gastroenteritis, con lesiones hemorrágicas y necróticas en el tracto digestivo. Los animales afectados generalmente se observan letárgicos y presentan sed intensa y odontopraxis; la muerte se produce a las 24-48 horas por deshidratación y/o perforación intestinal (Poodts,2010).

❖ **Cobalto (Co):**

El cobalto es un elemento que ocurre naturalmente y que tiene propiedades similares al hierro y al níquel. El cobalto no puede ser destruido en el ambiente, solamente puede cambiar de forma o adherirse o separarse de partículas. Este metal liberado al agua puede adherirse a partículas en el agua o al sedimento del fondo de la masa de agua en la que se liberó o puede permanecer en el agua en forma iónica. El destino específico del cobalto dependerá de muchos factores como por ejemplo la composición química del agua y del sedimento en un sitio como también de la concentración del cobalto y de las características del flujo de agua (ATSDR, 2008).

El Departamento de Salud y Servicios para Personas Mayores de New Jersey (2005), refiere que los efectos de este metal en animales es que puede causar cáncer muscular en ellos, además de dañar al aparato reproductivo masculino y afectar la fertilidad de animales machos. Por otra parte, Intagri (2017) menciona que, en plantas, el papel del Co es aún poco comprendido. Algunos efectos de este elemento que se han observado son el retraso en la senescencia foliar, el aumento en la resistencia de las semillas a la sequía, regulación en la acumulación de alcaloides en plantas medicinales, y bloqueo de la síntesis de etileno.

❖ **Cromo (Cr):**

El cromo es un elemento que ocurre naturalmente en rocas, animales, plantas y en el suelo, en donde existe en combinación con otros elementos para formar varios compuestos, este metal puede cambiar de una forma a otra en el agua y el suelo, dependiendo de las condiciones presentes. Las formas más comunes son el cromo (0), cromo (III) y cromo (VI) (ATSDR, 2008).

Los componentes del cromo son altamente tóxicos a las plantas y son perjudiciales sobre su crecimiento y desarrollo. Los progresivos estados de necrosis y clorosis son síntomas de

toxicidad de cromo en plantas (González, 2016). Por otro lado, el efecto principal que se observa en animales que ingieren compuestos de cromo (VI) son irritación y úlceras en el estómago y el intestino delgado y anemia, mientras que los compuestos de cromo (III) son mucho menos tóxicos y no parecen causar estos problemas (ATSDR, 2008).

❖ Hierro (Fe):

Elemento químico con número atómico 26 y peso atómico 55.847. El hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre (5%). Los dos minerales principales son la hematita (Fe_2O_3), y la limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). La pirita (FeS_2), y la cromita ($\text{Fe}(\text{CrO}_2)_2$), se explotan como minerales de azufre y de cromo, respectivamente (Lenntech, 2024).

Heeren (2021), refiere que, como resultado de la toxicidad de Fe disponible, las plantas sufren cambios morfológicos y fisiológicos que podrían afectar su crecimiento. A nivel fisiológico, ocurre una reducción de la conductancia estomálica. Esto afectará el intercambio gaseoso y la fotosíntesis, lo que resultará en una disminución del crecimiento. Amatriain (2000), explica que, en animales, la probabilidad de que el exceso de hierro produzca un notable porcentaje de muerte por cáncer de estómago e intestino. Además, menciona que se ha probado que los compuestos de hierro pueden causar el desarrollo rápido del cáncer en animales experimentales a quienes se les da carcinógenos.

❖ Litio (Li):

El litio es el tercer elemento del sistema periódico, después del hidrogeno y del helio, y, además, el primero del grupo de metales alcalinos. Se trata de un material altamente reactivo, por lo que, en la naturaleza, existe únicamente combinado en la forma de minerales de litio en rocas pegmatíticas, rocas sedimentarias (hectorita) y especialmente en salmueras naturales continentales (Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM, 2021).

Según Piñero et al. (2017), bajos niveles de litio mejoran la productividad de los cultivos, aumentando el rendimiento, acelerando su maduración, y reforzando la resistencia a enfermedades fúngicas. Sin embargo, para otras especies el litio puede ser tóxico cuando se encuentra en concentraciones elevadas, inhibiendo ciertas enzimas y vías de señalización intracelular. El efecto tóxico del litio se potencia en suelos ácidos debido a una mayor absorción por incremento de la solubilidad. En cuanto a la toxicidad de Li en animales, se

ha reportado que exposición a altas concentraciones de litio en el agua durante el desarrollo embrionario temprano causa efectos teratogénicos pronunciados (malformaciones durante la gestación) (Piñero et al., 2017).

❖ **Magnesio (Mg):**

Este metal es un constituyente común de muchos minerales, llegando a comprender el 2% de la corteza terrestre, siendo un componente común del agua de mar (1300 ppm). El Mg está presente en forma divalente (Mg^{2+}) en la naturaleza, pero se lo puede procesar hasta obtener metal puro (Mikkelsen, 2010).

Una toxicidad por magnesio en las plantas, puede conllevar problemas relacionados con la absorción de otros nutrientes. Lo más común es que la planta pierda la oportunidad de tener los niveles correctos de calcio y potasio que son nutrientes de acción muy delicada (DF Grupo, 2021). Por otra parte, Villanueva (2005), menciona que los síntomas de intoxicación con Mg en animales son el bajo consumo de alimento, retraso del crecimiento, diarrea aguda, pérdida de reflejos y restricción cardiorrespiratoria, disminuye la tensión arterial, las concentraciones altas en suero afectan el electrocardiograma y pueden hacer que el corazón se detenga en diástole y si se combinan niveles sub tóxicos de Mg y de Flúor, se puede producir una deficiencia de fósforo y con ello raquitismo u osteomalacia.

❖ **Manganeso (Mn):**

El manganeso es una sustancia natural que se encuentra en diversos tipos de rocas. El manganeso se encuentra normalmente en el aire, el suelo, el agua y los alimentos. Cantidades adicionales de manganeso se pueden encontrar en el aire, el suelo y el agua como consecuencia de la liberación de manganeso durante la manufactura, uso o disposición de productos a base de manganeso (ATSDR, 2008).

Los síntomas de toxicidad por Mn en plantas incluyen clorosis marginal y necrosis de hojas y raíces café oscuras, sólo después de que el follaje ha sido afectado. El exceso de Mn interfiere con las enzimas, disminuye la respiración y está relacionado con la destrucción de auxinas (Casierra y Poveda, 2005). Por otro lado, ATSDR (2008) indica que la ingestión de cantidades muy altas de manganeso ha producido alteraciones del sistema nervioso en

animales, incluso alteraciones del comportamiento. En animales machos que recibieron cantidades altas de manganeso en la comida se observaron daño de los espermatozoides y alteraciones en la función reproductiva.

❖ **Níquel (Ni):**

El níquel puro es un metal duro, blanco-plateado, que tiene propiedades que lo hacen muy deseable para combinarse con otros metales y formar mezclas llamadas aleaciones. Algunos de los metales con los cuales se combina el níquel son el hierro, cobre, cromo y zinc. En el ambiente se encuentra principalmente combinado con oxígeno o azufre en forma de óxidos o sulfuros. La concentración de níquel en el agua de ríos y lagos es muy baja, con el promedio siendo generalmente menor de 10 partes de níquel por billón de partes de agua (ppb). A menudo el nivel de níquel en el agua es tan bajo que no se puede medir a menos que se usen instrumentos muy sensibles (ATSDR,2008).

El exceso de concentraciones del níquel es tóxico para la mayoría de las especies de plantas. Los síntomas más comunes de toxicidad de níquel en las plantas son la inhibición del desarrollo, clorosis, necrosis y marchitamientos y se ha atribuido su efecto negativo sobre la fotosíntesis, nutrición mineral, transporte de azúcares y relación con el agua (Gajewska et al., 2006 citado por Villegas et al., 2015). Por otro lado, en animales expuestos a compuestos de níquel se han observado inflamación del pulmón y daño de los senos nasales. La exposición a concentraciones más altas produce daño suficientemente grave como para afectar la función pulmonar, además, la exposición prolongada a niveles más bajos de compuestos de níquel solubles en agua no produce cáncer en animales (ATSDR,2008).

❖ **Plomo (Pb):**

El plomo es un metal pesado, de baja temperatura de fusión, de color gris-azulado que ocurre naturalmente en la corteza terrestre. Sin embargo, raramente se encuentra en la naturaleza en la forma de metal, puesto que generalmente se encuentra combinado con otros dos o más elementos formando compuestos de plomo (ATSDR,2008).

En estudios realizados por Guzmán (2013) sobre el efecto del plomo en los procesos de imbibición, germinación y crecimiento en el frijol y el maíz, concluye que la presencia de plomo afecta los procesos fisiológicos en estas plantas y sus efectos se reflejan en los

procesos de imbibición, germinación y crecimiento de órganos como las raíces, tallos y hojas. Por otra parte, los efectos del exceso de plomo en las vacas son la ceguera, los espasmos musculares, hiperirritabilidad, depresión, convulsiones, ataxia, torneo, edema cerebral, anorexia, estasis ruminal, alternancia de diarrea y constipación y abortos en la segunda mitad de la gestación, mientras que las exposiciones crónicas en ovejas y cabras preñadas pueden afectar a los fetos (ELIKA, 2013).

❖ Selenio (Se):

El selenio es un elemento mineral natural, ampliamente distribuido en la naturaleza en la mayoría de las rocas y suelos. En forma pura, existe como cristales hexagonales gris metálicos a negros, pero en la naturaleza generalmente está combinado con sulfuro o con minerales de plata, cobre, plomo y níquel. El selenio entra al agua desde las rocas y el suelo, y desde desperdicios agrícolas e industriales. Algunos compuestos de selenio se disolverán en el agua y algunos se depositarán en el fondo en forma de partículas (ATSDR,2008).

Villanueva (2011), sostiene que el nivel máximo tolerable de selenio es 2 ppm, y el nivel tóxico alrededor de 8 ppm. Existen plantas que son acumuladoras de Se, también en algunos lugares los suelos contienen cantidades muy considerables del mismo, las plantas lo absorben y los animales que las consumen pueden presentar síntomas de intoxicación, especialmente los jóvenes, como adelgazamiento, anemia, atrofia y cirrosis hepática, rigidez y parálisis.

Huang et al. (2008) citado por Roque (2018), consideran que concentraciones de 5 mg/kg en plantas, es considerado tóxico, por otra parte, González et al. (2022) refiere que el selenio es un elemento benéfico para las plantas en concentraciones bajas. Los beneficios fisiológicos que brinda son mayor resistencia contra el estrés oxidativo, tolerancia contra estrés biótico y abiótico, incremento en la síntesis de pigmentos fotosintéticos y actividad fotosintética, mayor crecimiento en plantas y rendimiento de los cultivos. Sin embargo, sostiene que, si las concentraciones de Se son altas, pueden provocar toxicidad debido al cambio de estructura y función de las proteínas, así como inducir estrés oxidativo, lo que conduce a la alteración de varios procesos metabólicos.

❖ **Zinc (Zn):**

ATSDR (2008) refiere que el zinc es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre. Se encuentra en el aire, el suelo y el agua, y está presente en todos los alimentos. Dependiendo del tipo de suelo, algunos compuestos de cinc pueden movilizarse al agua subterránea y a lagos, arroyos y ríos. La mayor parte del zinc en el suelo permanece adherido a partículas de suelo y no se disuelve en agua.

Casierra y Poveda (2005), sostienen que los síntomas de toxicidad por Zn en plantas incluyen clorosis y crecimiento reducido de la planta; actúa inhibiendo la fijación de CO₂, el transporte de los hidratos de carbono en el floema y altera la permeabilidad de la membrana celular. Si se administra durante más de dos semanas, la alta absorción de zinc puede conducir a fenómenos tóxicos en el organismo.

2.2.6 Pasivos Ambientales Mineros (PAM)

Por pasivo ambiental se entiende la suma de los daños no compensados producidos por una empresa al medio ambiente a lo largo de su historia, en su actividad normal o en caso de accidente. En otras palabras, se trata de sus deudas hacia la comunidad donde opera. Estas deudas a veces no son reconocidas como tales por la jurisdicción vigente, en otras oportunidades las leyes establecen límites y prohibiciones que no son respetados (Russi y Martínez, 2002).

Los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) son aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad (Art. 2° Ley N° 28271, Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera) (Red Muqui, 2015).

2.2.6.1 Tipos y subtipos de PAM

El Ministerio de Energía y Minas considera 3 tipos de PAM y más de 10 subtipos, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Tipos y subtipos de PAM

Tipo	Subtipo
Labor Minera	Bocaminas, chimeneas, piques, tajos comunicados, trincheras y tajos abiertos.
Residuo minero	Relaves, desmontes de mina, botaderos de lixiviación.
Infraestructura	Campamentos, oficinas, talleres, plantas de procesamiento y otras instalaciones relacionadas con el proyecto minero.

Fuente: Red Muqui, (2015)

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Geoambiental: Es la rama de la geología que analiza el sistema terrestre como fuente de recursos geológicos y como soporte de actividades que provocan riesgos/impactos. Estudia la estructura, evolución y dinámica de nuestro planeta, así como sus recursos naturales en todos los aspectos relacionados con su interacción con el medio ambiente y su influencia en la sociedad (Giordani y Lanzone, 2020).

Metal pesado: Un metal pesado se puede definir como metal o metaloide con importancia biológica, que puede ser peligroso al acumularse en animales o plantas. Estos son de gran importancia por su alto potencial tóxico, debido a su alta difusión (Neira et al.,2021).

DAM: Es el agua contaminada originada de la explotación minera, ya sea superficial o profunda, típicamente de alta acidez, rica en sulfato y con niveles elevados de metales pesados, principalmente hierro, manganeso y aluminio. Debido a la alta cantidad de hierro oxidado, el drenaje ácido de la mina es a menudo rojizo coloreado (Gamonal, 2013).

Estándares de la calidad ambiental (ECA): Es un instrumento de gestión ambiental que se establece para medir el estado de la calidad del ambiente en el territorio nacional. El ECA establece los niveles de concentración de elementos o sustancias presentes en el ambiente que no representan riesgos para la salud y el ambiente. En el Perú tenemos cinco tipos de Estándares de Calidad Ambiental que son para Agua, Aire, Suelo, Ruido y Radiaciones No Ionizantes (MINAM, 2019).

Pasivos ambientales mineros (PAM): Son aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, que en la actualidad están abandonadas o inactivas y constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad. Estos se pueden expresar en labores mineras, residuos, infraestructura y edificaciones y áreas de almacenamiento de productos químicos (Castillo, et al.,2021).

Calidad del agua: Se define como las condiciones en que se encuentra el agua respecto a características físicas, químicas y biológicas, en su estado natural o después de ser alteradas por el accionar humano (Baeza, 2016).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 Geográfica

Geográficamente, el área de investigación se encuentra ubicada en las propiedades que comprenden a la Comunidad Campesina de Michiquillay, en el cuadrángulo de San Marcos (15-g) de la Carta Geológica Nacional. Las coordenadas del sistema UTM-Datum WGS-84 que delimitan los vértices del área se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Vértices del área de investigación

Vértice	Coordenadas UTM	
	Este	Norte
V1	794025	9221160
V2	795695	9221160
V3	795695	9219532
V4	794025	9219532

3.1.2 Política

Políticamente, se ubica en la Comunidad Campesina de Michiquillay, en el sector de Michiquillay, ubicado en el distrito de La Encañada, en la región, provincia y departamento de Cajamarca (Ver Anexo II-Plano N° 01). En la Figura 2 se detalla la ubicación política del área de investigación.

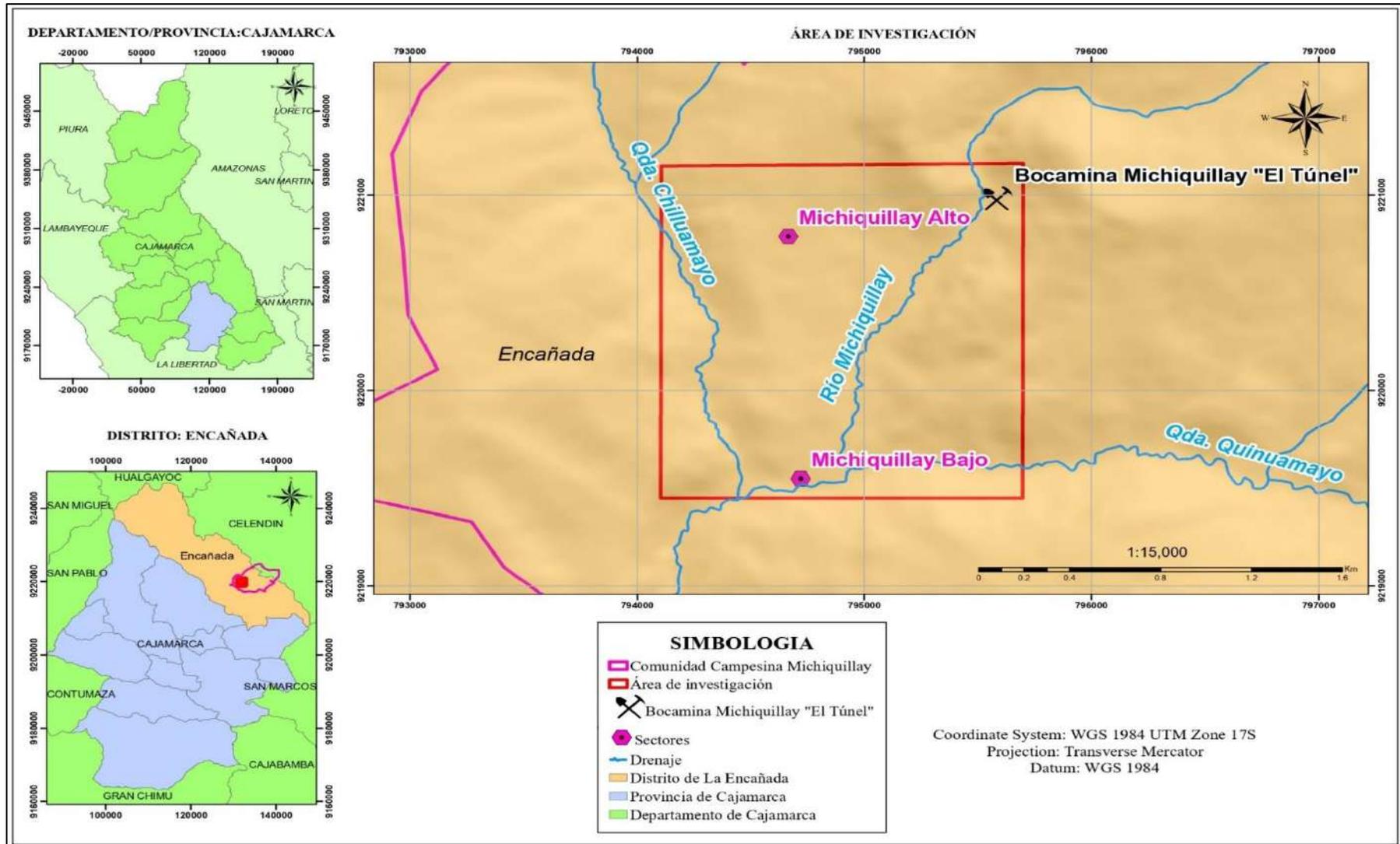


Figura 2: Ubicación del área de investigación

3.2 ACCESIBILIDAD

La accesibilidad se realiza por vía terrestre, mediante la carretera asfaltada Cajamarca-Distrito de La Encañada-Cruce a Michiquillay, y luego se toma el desvío por trocha carrozable hasta el sector de Michiquillay, con una distancia y tiempo total aproximados de 43.56 km. y 1 h. 15 min., respectivamente, tal como se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5: Accesibilidad al área de investigación

Ruta	Tipo de vía	Distancia (km)	Tiempo (h.)
Cajamarca-La Encañada	Asfaltada	33.8	00:53
La Encañada-Cruce a Michiquillay	Asfaltada	8.07	00:15
Cruce a Michiquillay-Sector de Michiquillay	Trocha carrozable	1.69	00:07
Total		43.56	1:15

En la Figura 3 se muestra la accesibilidad desde Cajamarca al sector de Michiquillay.



Figura 3: Accesibilidad desde Cajamarca a los sectores de Michiquillay Alto y Bajo.

3.3 CLIMA

En general, Cajamarca, por su altitud se encuentra en la región quechua (entre 2300-3500 msnm) lo que determina que su clima sea templado, seco, soleado durante el día, pero frío durante la noche (Moreno at. al.,2021).

En el distrito de La Encañada, los veranos son largos, frescos y nublados y los inviernos son cortos, muy frío, secos y parcialmente nublados. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 1 °C a 15 °C y rara vez baja a menos de -1 °C o sube a más de 18 °C. El mes con más lluvia en La Encañada es marzo, con un promedio de 60 mm. de lluvia, mientras que el mes menos lluvioso es Julio, con un promedio de 1 mm. de lluvia (Weather Spark, 2023).

3.4 VEGETACIÓN

Las partes más altas de la zona de investigación, presentan una típica vegetación de altura como el ichu, árboles de pino, cipreses, eucaliptos, bofedales, arbustos y vegetación de roquedal, que albergan una vegetación natural muy variada, y en las zonas más bajas predominan áreas de cultivos agrícolas como la papa, el maíz y el trigo y a su vez se observan grandes extensiones de pastos naturales y cultivados como el pasto “Rye Grass” y el Heno.



Foto 1: Vista de la vegetación como pinos, arbustos, eucaliptos y pastizales presentes en el sector de Michiquillay.

3.5 HIDROLOGÍA

Los sectores de Michiquillay Alto y Bajo se encuentran asentados dentro de la microcuenca del río La Encañada. Esta microcuenca se encuentra ubicada al Noreste de la ciudad de Cajamarca, y tiene como eje principal de drenaje el río La Encañada. La microcuenca La Encañada tiene forma alargada, con una longitud aproximada del cauce principal de 17,10 km. y una mediana densidad de cauces, conformada por varios torrentes menores que se van uniendo al cauce principal a medida que éste desciende de sus cabeceras. No obstante, debido a la variada conformación hidrográfica, la microcuenca La Encañada tiende a comportarse como una unidad torrencial de avenidas fluviales moderadas a fuertes durante la estación de lluvias (diciembre a abril) y reducidos caudales durante la prolongada estación seca (INRENA,1998).

Las quebradas Quinuamayo, Chulluamayo, Las Mellas, La Toma, Michiquillay, conforman la microcuenca del río La Encañada (Oviedo, 2021), de las cuales, las quebradas Chulluamayo, Quinuamayo y Michiquillay, conforman la red hidrográfica de la zona de investigación, tal como se muestra en la Figura 4.

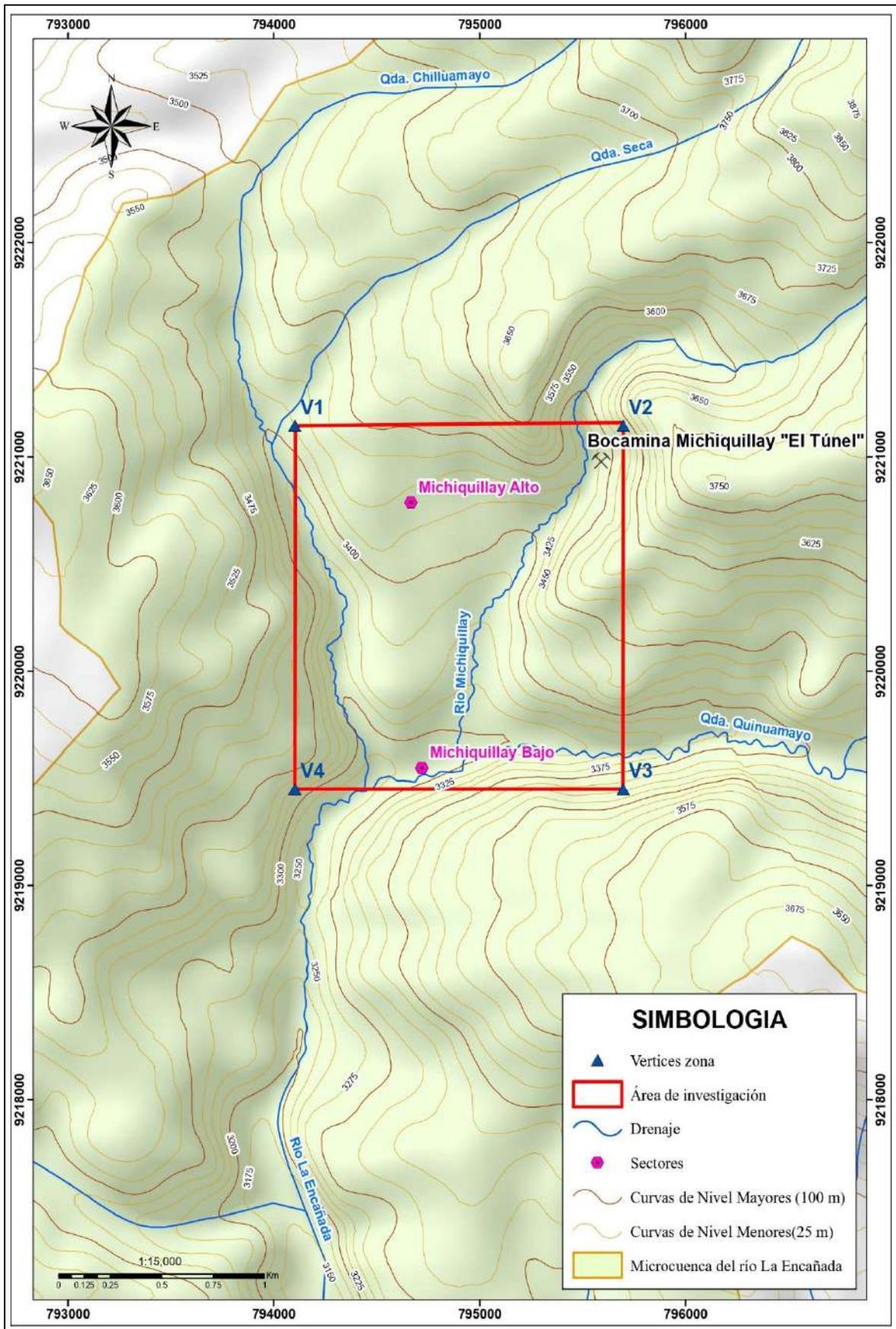


Figura 4: Microcuenca hidrográfica del río La Encañada

3.6 PROCEDIMIENTOS

3.6.1 Definición de variables

Para la investigación se han identificado las variables independientes y dependientes, las cuales, se nombran en la Tabla 6.

Tabla 6: Identificación de variables en la investigación

VARIABLES INDEPENDIENTES	VARIABLE DEPENDIENTE
Metales pesados	Evaluación geoambiental
Pasivo ambiental	
Litología, geomorfología	
Hidrología	

3.6.2 Metodología

3.6.2.1 Tipo, nivel, diseño y método de investigación

La presente investigación es descriptiva y explicativa, con un diseño no experimental, transversal en el tiempo, de naturaleza mixta y de finalidad aplicada.

Nivel (Explicativo-Descriptivo): La investigación se fundamenta en describir y explicar las características litológicas, mineralógicas y geomorfológicas de la zona de estudio, además de ello, se presentan resultados en base a parámetros ambientales en un determinado período de tiempo y espacio, con el fin de evaluarlos y compararlos con los ECA para agua.

Diseño (Documental-No experimental): Esto debido a que se recopilaron, analizaron y evaluaron las variables identificadas en la investigación tal como se observan en el medio natural sin realizar alguna modificación en ellas. Los estudios realizados en la investigación buscan precisar las características importantes de las causas que pueden originar la concentración de determinados metales pesados producto del DAM y de las características litológicas, mineralógicas y geomorfológicas presentes en la zona.

Período (transversal en el tiempo): De corte transversal en el tiempo, porque se ha realizado en un determinado período de tiempo (de enero a diciembre del 2023).

Naturaleza (Mixta): La investigación, según su naturaleza es cualitativa ya que se describieron las características litológicas, mineralógicas y geomorfológicas de la zona de estudio, como también cuantitativa, porque se determinaron las concentraciones de metales pesados en mg/L (valores numéricos) en las aguas del río Michiquillay y en las del DAM que se genera naturalmente dentro la bocamina principal de la zona, en base a los resultados obtenidos de laboratorio.

Finalidad (Aplicada): La presente investigación se centra en realizar una evaluación geoambiental del DAM de la bocamina principal de la zona de estudio “El Túnel”, mediante el estudio de los niveles de concentración de los metales pesados en el río Michiquillay y en las aguas del DAM en dos épocas distintas: lluvia y estiaje, analizando las posibles causas de origen geológico (litológico, mineralógico y geomorfológico) y antrópico (minería), que estarían originando niveles altos de estos metales, en base a los resultados que se obtienen de laboratorio, comparándolos con los ECA del agua según la categoría 3: Riego de vegetales y bebedero de animales.

Lo anteriormente mencionado, en cuanto a la metodología de la presente investigación, se sintetiza en la Tabla 7.

Tabla 7: Clasificación del tipo de investigación

CLASIFICACIÓN	TIPO DE INVESTIGACIÓN
Según el nivel	Descriptiva, explicativa
Según el diseño	Documental, no experimental
Según su naturaleza	Mixta
Según su finalidad	Aplicada
Según el período	Transversal en el tiempo

Fuente: Modificado de Supo, (2016).

3.6.2.2 Población de estudio

La población de estudio comprende los sectores de Michiquillay Alto y Michiquillay Bajo, área de $\pm 2 \text{ km}^2$.

3.6.2.3 Muestra

Muestras de agua con el volumen adecuado que permita analizar la concentración de los metales pesados del agua del río Michiquillay y la del DAM de la bocamina principal “El Túnel”.

3.6.2.4 Unidad de análisis

Metales pesados en las aguas superficiales del río Michiquillay y del DAM de la Bocamina Michiquillay “El Túnel” (Al, As, Ba, Be, B, Cd, Cu, Co, Cr, Fe, Li, Mg, Mn, Ni, Pb, Se, Zn).

3.6.3 Técnicas de recolección y análisis de datos

Los procedimientos de adquisición, tratado e interpretación de la información hechas a partir de técnicas, herramientas y criterios se encuentran comprendidos en tres etapas o fases de trabajo; de pre-campo, campo (in situ) y gabinete, los cuales se detallan a continuación:

3.6.3.1 Etapa de pre-campo

En esta etapa se realizó la compilación bibliográfica internacional, nacional y local y análisis de los planos satelitales y geológicos, boletines del INGEMMET y base de datos sobre la línea de investigación; necesarios para un reconocimiento preliminar de la zona a investigar y planificación para realizar salidas a campo.

3.6.3.2 Etapa de campo

Esta etapa comprende el reconocimiento del área de estudio y la ejecución in situ de la investigación, en donde se realizó la toma de datos de los aspectos geológicos como la litología, mineralogía y geomorfología, además de la recolección de las muestras de agua en los puntos previamente definidos, para su posterior análisis en laboratorio.

El procedimiento de recolección de muestras de agua se realizó bajo el siguiente procedimiento que se detalla a continuación:

1. Se establecieron los puntos de muestreo, considerando el lugar más adecuado según la red de drenaje y cercanos a la bocamina principal.
2. Se estableció el período de toma de muestras, considerando los meses del año según la época de lluvia y estiaje, ya que, la época en la que se tomen las muestras va a influir en los resultados que se obtengan de laboratorio. En los meses de lluvias los metales pesados van a hacer transportados debido a la cantidad de agua, mientras que en los meses de estiaje los metales pesados se van a depositar.
3. Se establecieron los parámetros a analizar, según la metodología normalizada de análisis del Laboratorio de Gobierno Regional del Agua en la ciudad de Cajamarca.
4. Se preparó el material y equipo necesario para el muestreo, teniendo en cuenta el equipo adecuado en base a lo dispuesto por el laboratorio, como son: Frascos de plástico, guantes, marcador de frascos, cooler, preservante (HNO_3), gel de hielo.
5. Se evaluaron las condiciones adecuadas para el transporte y la conservación de las muestras: Una vez tomada la muestra debe cerrarse herméticamente y etiquetarse correctamente, así como también la refrigeración tiene que ser menor a 6°C para su transporte y enviar a laboratorio para su análisis antes de las 24 horas de ser recolectadas.

Los datos son la base fundamental del estudio que servirán para procesar y luego interpretar resultados; para lo cual se debe tener un cuidado especial en la recopilación de información.

3.6.3.3 Etapa de gabinete

Esta etapa consiste en el procesamiento y análisis de la información recolectada en campo, a través de la elaboración de planos y registros, además de los resultados obtenidos en laboratorio, mediante análisis estadístico de los datos obtenidos, comparándolos con los ECA del agua según la categoría 3, dispuestos en el D.S. N°004 – 2017 del MINAM.

3.6.4 Instrumentos y equipos de recolección de datos

Los instrumentos y equipos utilizados durante la realización de la investigación, se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8: Recursos materiales usados durante la investigación

Recursos materiales de la investigación	Uso en la investigación
<i>Recursos de campo</i>	
Brújula tipo Brunton	Para medir rumbo y buzamientos
Picota Geológica	Para extraer muestras de rocas
GPS	Para determinar las coordenadas en el sistema UTM-WGS84
Lupa de geólogo 20X	Para el reconocimiento de minerales en las rocas
Protactor	Para realizar mediciones en los planos
Rayador	Para determinar la dureza de los minerales de las rocas
Libreta de campo	Para tomar apuntes de los principales y necesarios datos de la zona de investigación
Plano satelital, topográfico, geológico	Para realizar el cartografiado a escala 1/5000
Útiles de escritorio	Necesarios durante todas las etapas de la investigación como son: colores, lápices, lapiceros, marcador para frascos.
Cámara fotográfica de 15 Mpx.	Para fotografiar las actividades en campo, como las geoformas, los afloramientos, los puntos de muestreo, etc.
<i>Recursos de laboratorio</i>	
Guantes quirúrgicos	Para realizar la toma de las muestras de agua y evitar su contaminación
Mascarillas quirúrgicas	Para taparse la boca y nariz y así evitar contaminar las muestras
Frascos de plástico esterilizados	Para recepcionar las muestras de agua y enviarlas al laboratorio
Preservante (Ácido Nítrico)	Para conservar la muestra hasta el momento de su análisis.
Cooler	Para conservar refrigeradas las muestras de agua y transportarlas
Gel de hielo	Para mantener las muestras de agua refrigeradas.

3.7 MARCO GEOLÓGICO

3.7.1 Geología Local

A nivel local, en la zona de investigación se pueden apreciar las formaciones geológicas pertenecientes a los grupos Puillucana (Formación Yumagual) del cretáceo superior, además de las Formaciones Farrat (Grupo Goyllarisquizga), Chúlec y Pariatambo (Grupo Crisnejas) del Cretácico inferior. A su vez, se han logrado identificar rocas intrusivas como dacitas, representado por el stock Michiquillay, y depósitos cuaternarios fluviales y coluvio-aluviales (Ver Anexo II-Plano N° 06), las cuales se detallan a continuación:

3.7.1.1 Grupo Goyllarisquizga

3.7.1.1.1 Formación Farrat

Esta Formación representa el nivel superior del Grupo Goyllarisquizga dentro del Cretácico Inferior, suprayace a la Formación Carhuaz y subyace a la Formación Inca.

En el área de investigación esta formación se la identificó en el margen izquierdo del río Michiquillay, específicamente en el sector de Michiquillay Alto, presentando un grosor promedio de 500 m., conformada por areniscas cuarzosas blanquecinas de grano medio a grueso con una gran cantidad de óxidos de hierro como hematita y jarosita, tal como se muestra en la Foto 2.

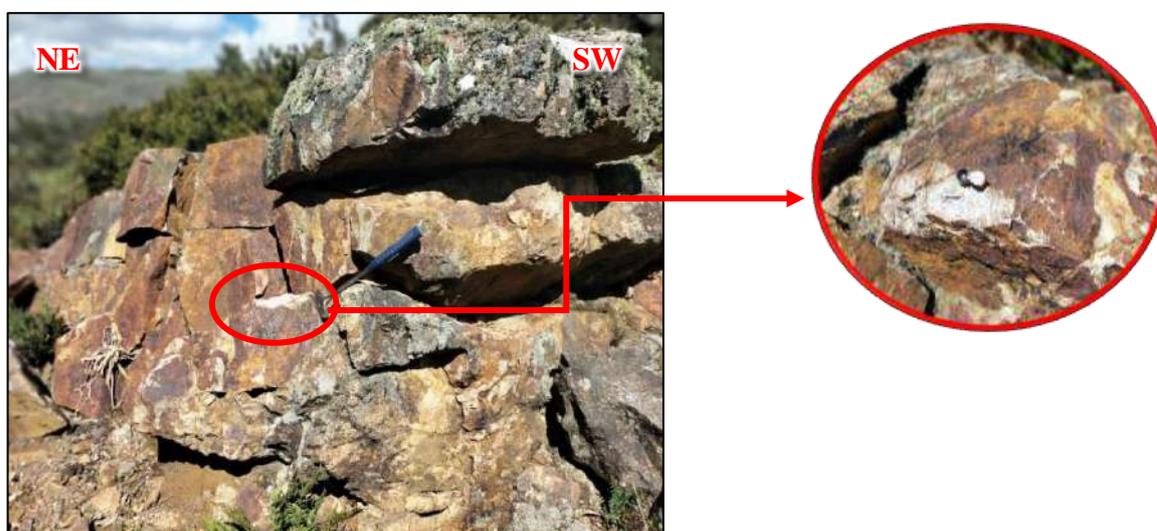


Foto 2: Afloramiento rocoso de la Formación Farrat, señalando las areniscas cuarzosas blanquecinas características. Coordenadas: E:795464; N: 9220794; Cota: 3468 m.s.n.m

3.7.1.2 Grupo Crisnejas

3.7.1.2.1 Formación Chúlec

Esta Formación se encuentra dentro del Cretácico inferior suprayaciendo concordantemente a la Formación Inca e infrayaciendo a la Formación Pariatambo, con espesores que varían de 200 a 250 m.

Localmente, la Formación Chúlec aflora restringidamente ya que su mayoría se encuentra cubierto por depósitos cuaternarios de tipo aluvial, en la cual se han encontrado en su mayoría calizas de coloración pardo-gris que según la clasificación de Dunham (1962) su textura reconocible es la de una caliza mudstone ya que presenta menos de un 10% de grano; y margas, las que por intemperismo han adquirido un color crema amarillento. Esta formación se la ha identificado en el margen izquierdo del río Michiquillay.



Foto 3: a. Afloramiento de calizas grises de la Formación Chúlec. b. Margas de coloración amarillentas características. Coordenadas: E:795200; N: 9220415; Cota: 3395 m.s.n.m.

3.7.1.2.2 Formación Pariatambo

Esta Formación corresponde al nivel superior de Cretácico inferior, yace concordantemente sobre la Formación Chúlec e infrayace a la Formación Yumagual, con un espesor entre los 150 a 200 m.

Localmente, en la Formación Pariatambo se observó una alternancia de lutitas con delgados estratos de calizas bituminosas que según la clasificación de Dunham (1962) son del tipo mudstone. En la zona de investigación aflora restringidamente, ya que al igual que la Formación Chúlec se encuentra cubierta por depósitos cuaternarios de tipo aluvial, localizada en el margen derecho de la Quebrada Chilluamayo.



Foto 4: Afloramiento de la Formación Pariatambo. Coordenadas: E:794159; N: 9220807; Cota: 3400 m.s.n.m.

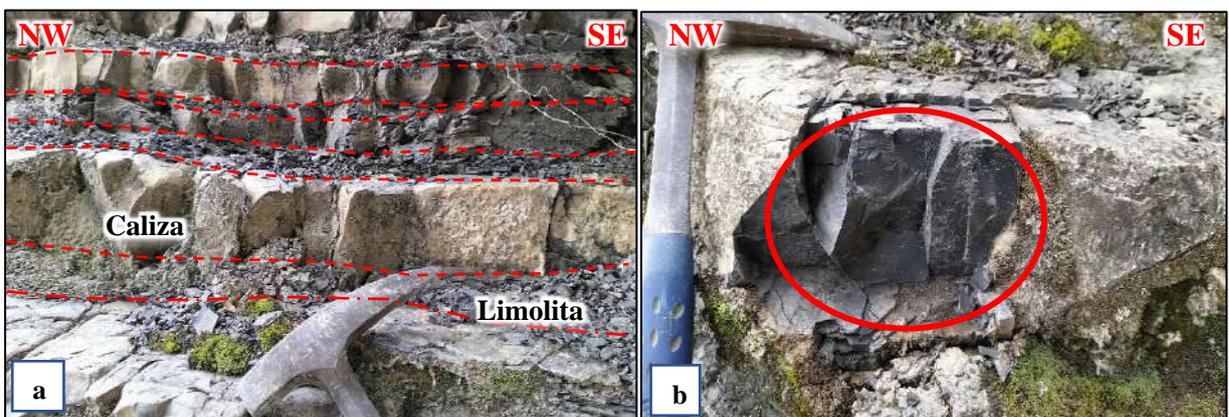


Foto 5: a. Intercalación de calizas bituminosas con limolitas. b. Caliza bituminosa señalada con círculo rojo.

3.7.1.3 Grupo Pulluicana

3.7.1.3.1 Formación Yumagual

La Formación Yumagual pertenece al Cretácico superior y suprayace a la Formación Pariatambo e infrayace a la Formación Mujarrún y Grupo Quilquiñan, con un espesor aproximado de 700 m.

Localmente la Formación Yumagual está compuesta por estratos potentes de calizas gris parduzcas y margas amarillentas con presencia de exogyras (Fósil característico de esta Formación). Los afloramientos rocosos se encuentran en su mayoría, cubiertos por una capa de calcita de aproximadamente de 2 cm. de espesor, producto de la descarbonatación consecuencia de la percolación de las aguas superficiales. En la zona de investigación se la identificó en el margen izquierdo del río Michiquillay.

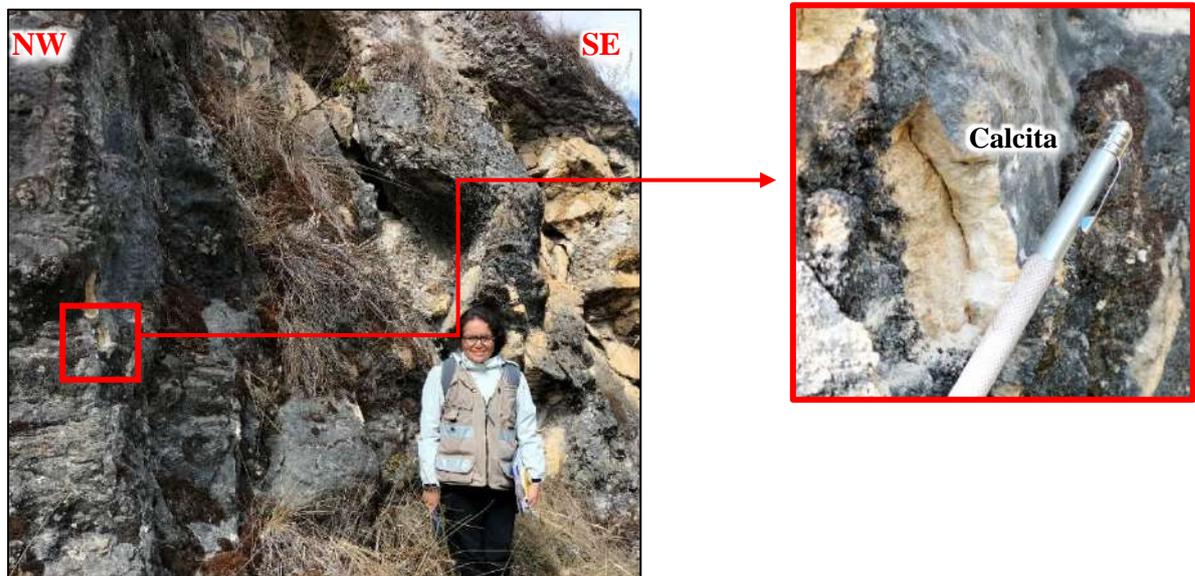


Foto 6: Afloramiento de la Formación Yumagual, señalando la capa de calcita. Coordenadas: E:794735; N: 9212456; Cota: 3288 m.s.n.m.



Foto 7: a. Caliza mudstone grade compacta gris-parduzca. b. Marga amarillenta con contenido fosilífero de Exogyras.

3.7.1.4 Rocas Intrusivas

3.7.1.4.1 Pórfido Dacítico

En la zona de estudio se observa la presencia de un cuerpo ígneo de composición dacítica correspondiente al pórfido Michiquillay, fuertemente meteorizado con textura porfirítica, el cual se encuentra emplazado en la las rocas sedimentarias aflorantes en el área de investigación.

En cuanto a sus alteraciones, se ha podido identificar la alteración argílica con vetillas de stockworks rellenas de cuarzo con óxidos de hierro y pirita. También se observa la presencia de calcantita por la coloración azul verdosa. Este pórfido se ha identificado en el margen izquierdo del río Michiquillay.

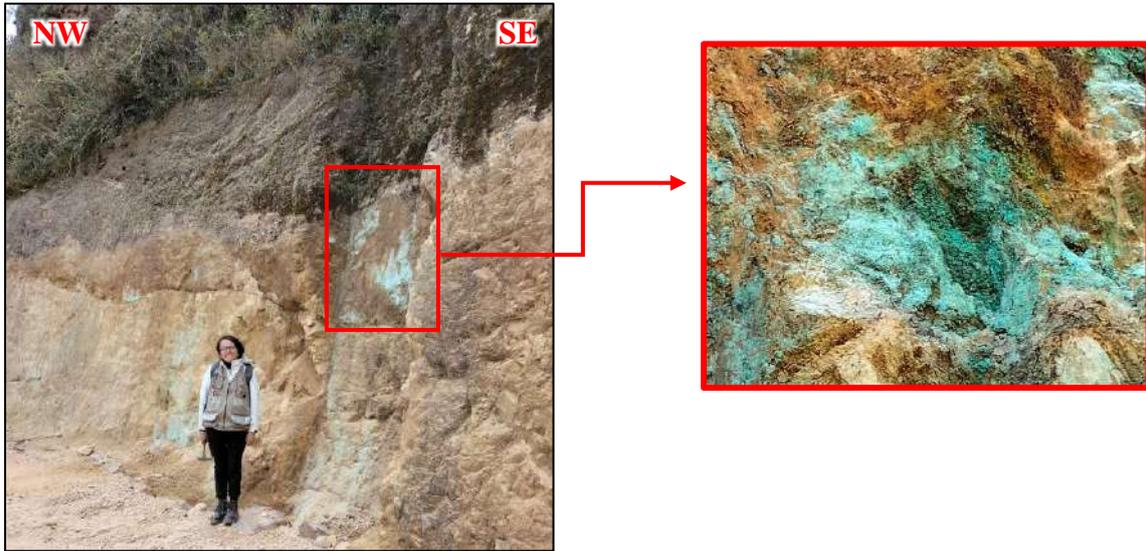


Foto 8: Cuerpo ígneo dacítico, señalando la presencia de calcantita (color azul-verdosa).
 Coordenadas: E:795678; N: 9221070; Cota: 3498 m.s.n.m.

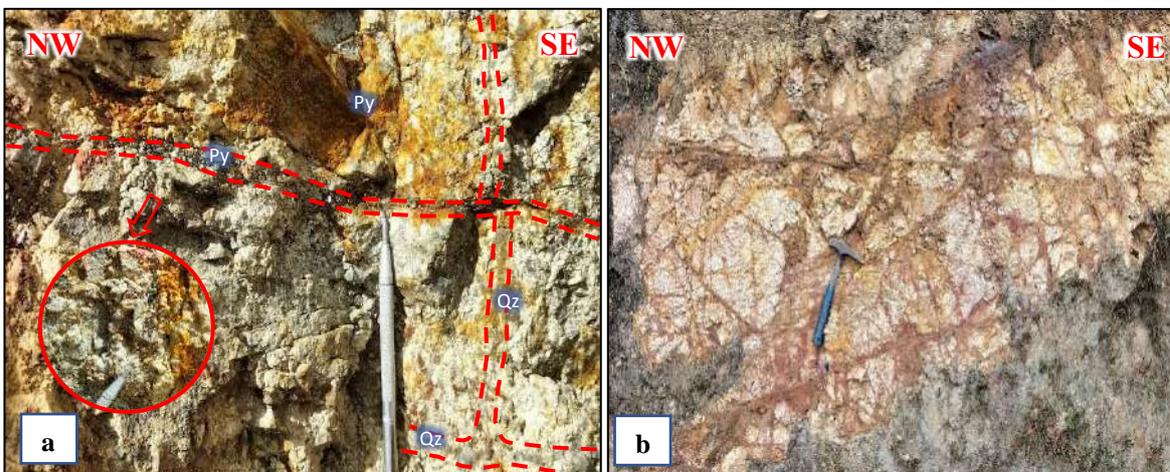


Foto 9: a. Venillas con contenido de cuarzo, pirita y óxidos de hierro. b. Venillas de stockwork rellenas con óxidos de Fe en roca Dacita alterada por procesos supérgenos.

A. Descripción macroscópica de la roca ígnea

La roca aflorante es de color gris blanquecina, de textura porfirítica, con un grado de cristalinidad hipocristalina, compuesta por cristales de plagioclasa (50%), menor contenido cuarzo (10%), a su vez se observa también la presencia de minerales secundarios como biotita (5%) y piroxeno (35%), tal como se muestra en la Figura 5.

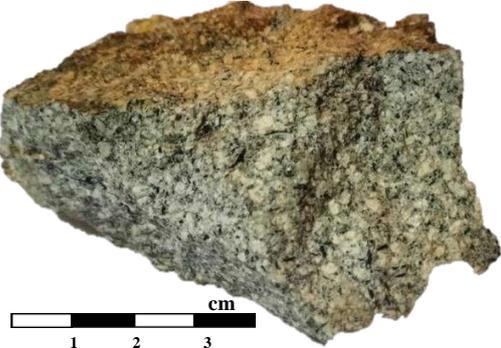
FORMATO DE PETROGRAFÍA MACROSCÓPICA ÍGNEA		
TESIS: EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DEL DAM DE METALES PESADOS ENTRE LOS SECTORES DE MICHICUILLAY ALTO Y BAJO, DISTRITO DE LA ENCAÑADA, 2023.		
N° DE MUESTRA: 01		
I. LOCALIZACIÓN	Coordenadas	N:9221070 E:795678
Región: Cajamarca		
Provincia/Distrito: Cajamarca/La Encañada	DATUM: WGS-84	
Localidad: Michiquillay Alto	Unidad Geológica: Pórfido	
II. ASPECTOS GENERALES		
- Color de superficie intemperizada: Pardo amarillento		
- Color de superficie Fresca: Blanco a gris claro		
- Brillo: Vitreo		
- Dureza: 5-6		
- Reacción con HCL: No		
III. ELEMENTOS TEXTURALES		
- Grado de cristalización: Hipocristalina		
- Grado de visibilidad: Fanerítica		
- Tamaño absoluto de los cristales: Grano medio		
- Tamaño relativo de los cristales: Inequigranular-Porfirítica		
- Geometría de los cristales: Subhedral		
IV. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA		
-Minerales esenciales (%):	-Minerales accesorios (%):	-Minerales secundarios:
Cuarzo 10% Plagioclasas 50%	Piroxenos 35% Biotita 5%	Óxidos de hierro
V. CLASIFICACIÓN		
Por el contenido de sílice: Intermedia		
Por el índice de color: Mesocrática		
Modo de ocurrencia geológica: Roca hipoabisal		
NOMBRE DE LA ROCA: Dacita		

Figura 5: Formato de petrografía macroscópica ígnea.

Fuente: Adaptado de Arapa, (2019).

3.7.1.5 Depósitos Cuaternarios

3.7.1.5.1 Depósito Coluvial (Q-co)

Estos depósitos se caracterizan por contener gravas angulosas a subangulosas distribuidas de forma caótica, sin selección ni estratificación definida y con poca consolidación, producto de la alteración y desprendimiento in situ de los macizos rocosos a lo largo de las laderas.

En la zona de investigación se han identificado este tipo de depósitos conformados por gravas angulosas de tamaño variado, con matriz areno-limosa y con contenido de óxidos de

hierro como jarosita. Asu vez, estos depósitos se encuentran conformando la mayor parte de la zona de investigación, caracterizados por albergar vegetación en su mayoría.

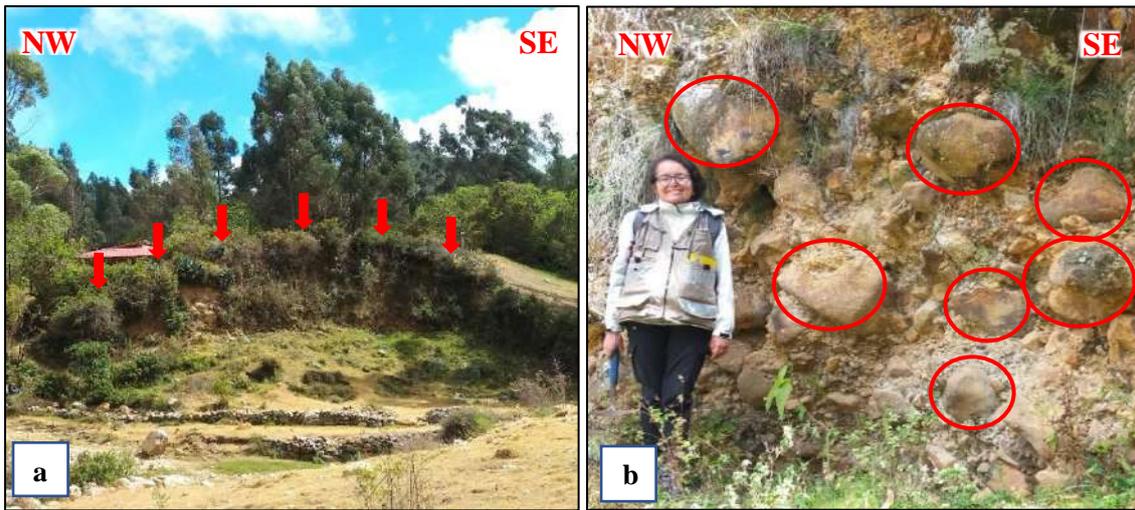


Foto 10: a. Depósito coluvial en la intersección de la Quebrada Quinuamayo con el río Michiquillay. b. Gravas angulosas (círculos amarillos) con matriz arenosa con contenido de óxidos de Fe. Coordenadas: E:795000; N: 9219581; Cota: 3274 m.s.n.m.

3.7.1.5.2 Depósito fluvial (Q-fl)

Este tipo de depósitos están constituidos por sedimentos que se acumulan producto de la actividad de los ríos, depositándose materiales de diferente granulometría, ya que su tamaño varío desde arcillas hasta las gravas, cantos y bloques.

En la zona de estudio se los encuentran en los márgenes del río Michiquillay, conformados por gravas, bloques, arena y arcilla, tal como se muestra en la Foto 11.

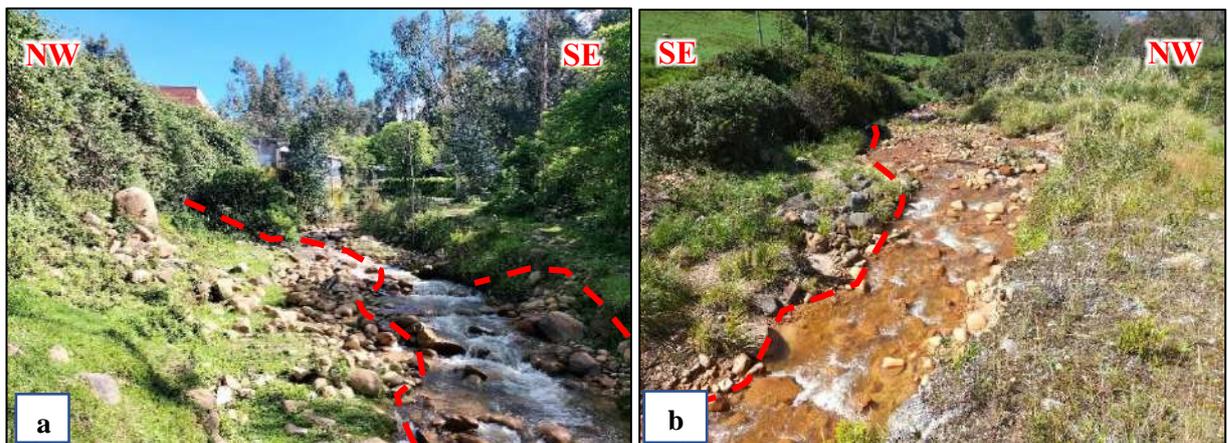


Foto 11: En a y b se observan los depósitos fluviales generados por las aguas del río Michiquillay

3.7.1.5.3 Depósito aluvial (Q-al)

Estos depósitos se encuentran generalmente al pie de los escarpes y laderas prominentes como material de escombros. En la zona de investigación, se han identificado estos depósitos a los márgenes de los ríos y quebradas, constituidos por poseer una matriz areno limosa que ha sufrido poco transporte, formando geoformas como laderas, planicies y abanicos aluviales en su mayoría.



Foto 12: Depósito aluvial al margen izquierdo del río Michiquillay en el sector de Michiquillay Alto.

3.8 MARCO GEOMORFOLÓGICO

3.8.1 Unidades Geomorfológicas

Las unidades morfogenéticas observadas en el área de investigación, se clasificaron en base a las geoformas originadas producto de la meteorización, erosión y pendiente. Cabe resaltar que se han establecido unidades morfogenéticas variadas según los ambientes geomorfológicos predominantes, pero que en conjunto se resumen teniendo en cuenta la distribución espacial de las pendientes a fin de tener una mejor caracterización de las distintas formas de relieve de la zona de investigación, representándolas al final en un plano de pendientes (Ver anexo II-Plano N°5), en función a los índices de inclinación de laderas que propone Carvajal (2012), los cuales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Índices de inclinación de laderas

Inclinación	Descripción
<5°	Plana o suavemente inclinada
6°-10°	Inclinada
11-15	Muy inclinada
16-20	Abrupta
21-30	Muy abrupta
31-45	Escarpada
>45	Muy escarpada

Fuente: Carvajal, (2012)

Según lo mencionado anteriormente, para un mayor detalle de las unidades geomorfológicas identificadas en la zona de investigación, estas se describen teniendo en cuenta el ambiente morfogenético, que según Carvajal (2012), alude a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas en las cuales se generaron las geoformas, mismas que se detallan a continuación.

3.8.1.1 Unidades geomorfológicas por ambiente Denudacional

En este ambiente se incluyen geoformas que dependen a procesos exógenos degradacionales y está definida por la acción combinada de procesos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que han remodelado y dejado remanentes de las geoformas morfoestructurales preexistentes y además crean nuevas geoformas por acumulación de sedimentos (Acevedo y Buitrago, 2014).

3.8.1.1.1 Colinas

Una colina es una elevación natural del terreno con desnivel inferior a 300 m., con valores superiores a 16% de pendiente (Alcántara, 2011). Suelen ser redondeadas, resultado de procesos erosivos y sedimentarios.

En la zona de investigación se han observado colinas que varían sus pendientes entre 16% a 20%, en función a los lugares donde se estén formando producto de la erosión existente, identificando estas geoformas en su mayoría sobre rocas sedimentarias, como las calizas de la Formación Chúlec, tal como se muestra en la Foto 13.



Foto 13: Colina identificada en la zona de investigación. Coordenadas: E:795166; N: 9220370; Cota: 3427 m.s.n.m.

3.8.1.1.2 Lomadas

Son elevaciones del terreno de similar altura que las colinas, pero con cimas más amplias, redondeadas y alargadas, y gradientes entre 8% y 16% (Alcántara, 2011).

Litológicamente, en el área de estudio en su mayoría se encuentran en los depósitos cuaternarios de origen aluvial, con pendientes suaves que pueden estar indicando la etapa final del ciclo erosivo.



Foto 14: Lomas con el relieve y pendientes características. Coordenadas: E:795166; N: 9220370; Cota: 3427 m.s.n.m.

3.8.1.1.3 Laderas

Estas geoformas se definen como un declive, a favor del sentido de la pendiente causada por la fuerza de la gravedad constituidos por numerosas superficies de erosión bordeando al dominio de las montañas, colinas y depresiones (quebradas-barrancos) según lo indica Quispe (2015). En la zona de investigación se han determinado un gran número de laderas generalmente a los bordes del río Michiquillay, emplazadas en depósitos cuaternarios producto de declive de las montañas o colinas con afloramientos de rocas sedimentarias con gran pendiente.

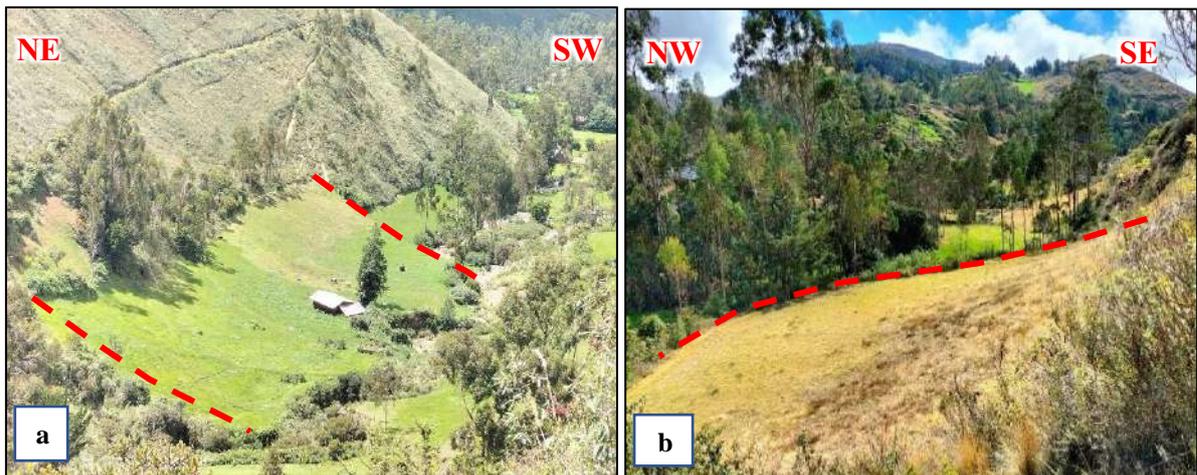


Foto 15: a. Ladera en Michiquillay Alto, margen izquierdo del río Michiquillay. Coordenadas: E:795317; N: 9220643; Cota: 3425 m.s.n.m. b. Ladera identificada en Michiquillay Bajo, margen izquierdo del río Michiquillay. Coordenadas: E:794790; N: 9219536; Cota: 3298 m.s.n.m.

3.8.1.1.4 Planicies

Corresponde a extensiones grandes de terreno con una superficie plana y bastante homogénea, poco cambiante en su morfología y con una superficie topográfica uniforme. En el área de estudio se han identificado planicies de tipo aluviales ya que la mayoría de ellas se encuentran junto al río Michiquillay y las quebradas existentes en la zona de investigación, utilizadas para el cultivo de pastos y crianza de animales.

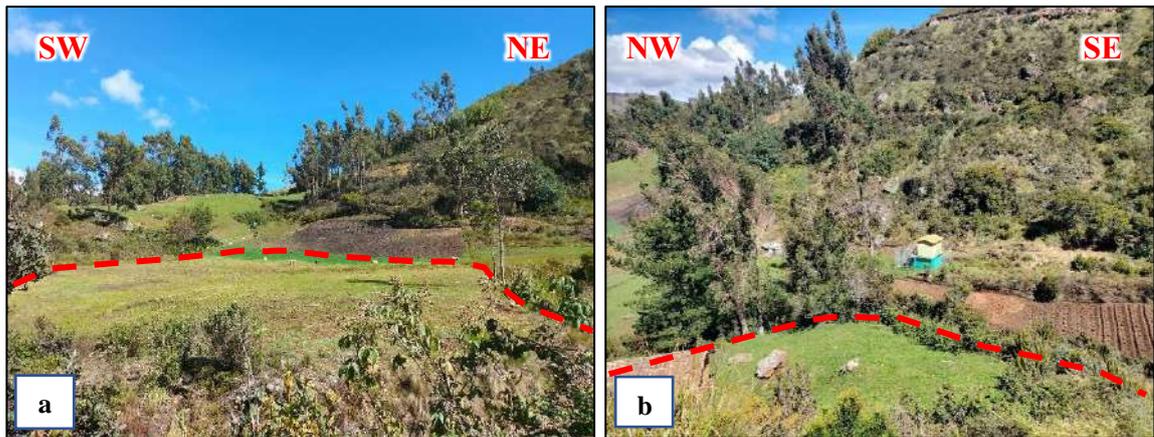


Foto 16: En a y b se aprecian planicies identificadas aguas abajo del río Michiquillay, sector de Michiquillay Alto. Coordenadas: E:795119; N: 9220638; Cota: 3420 m.s.n.m. y E:794790; N: 9219536; Cota: 3298 m.s.n.m. respectivamente.



Foto 17: Planicie identificada en el margen derecho del río Michiquillay, en el sector de Michiquillay Alto. Coordenadas: E:794883; N: 9220824; Cota: 3457 m.s.n.m.

3.8.1.1.5 Deslizamiento

Se define un deslizamiento como un movimiento ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie reconocible de ruptura. En la zona de investigación se observaron deslizamientos generalmente producto de factores como la presencia del agua, la litología y permeabilidad del terreno. El deslizamiento que se muestra en la Foto 18 se encuentra sostenido con gaviones a fin de controlar la erosión y contener los derrumbes.



Foto 18: Deslizamiento ubicado en Michiquillay Alto. Coordenadas: E:795550; N: 9220806; Cota: 3500 m.s.n.m.

3.8.1.2 Unidades geomorfológicas por ambiente Fluvial

Estas unidades geomorfológicas corresponden a las geoformas generadas por los procesos relacionados con la actividad fluvial, dominado por la acción de las corrientes de agua y el transporte de sedimentos sobre la superficie terrestre (Paredes,2023).

3.8.1.2.1 Cono de deyección o abanico aluvial

Un abanico o cono aluvial o cono de deyección es un depósito de sedimentos-gravas-arena y sedimentos más finos que se acumulan en la base más llana de un frente montañoso o en el interior de un área montañosa, donde el relieve se amplía y disminuye la pendiente de un torrente (Gómez, 1996).

En la zona de investigación esta geoforma tiene un aspecto de cono recostado pendiente abajo con una ligera inclinación, identificada en la intersección de la quebrada Quinuamayo con el río Michiquillay en el margen izquierdo.



Foto 19: Abanico aluvial identificado en la intersección de la quebrada Quinuamayo y el río Michiquillay. Coordenadas: E:794952; N: 9219597; Cota: 3314 m.s.n.m.

3.8.1.2.2 Valle en “V”

Estos valles se caracterizan por presentar un perfil transversal en “V” cerrada; los cuales están ubicados en las colinas y laderas por flancos fuertemente empinados mayores a 47% e incluso verticales, hasta formar taludes estables en función a su litología, pendiente y clima con marcada irregularidad teniendo un control litoestructural (Quispe, 2015).

En la zona de investigación estos valles están determinados por factores erosivos, tectónicos y litológicos y la acción principal del río Michiquillay.



Foto 20: Forma típica de la geoforma Valle en “V”, identificado en el sector de Michiquillay Alto. Coordenadas: E:795511; N: 9221050; Cota: 3498 m.s.n.m.

3.8.1.2.3 Terrazas

Son plataformas que se forman en orillas de los valles producto de sedimentos de un río que se depositan a los lados del cauce en las zonas donde la pendiente es ligeramente inclinada (Quispe, 2015).

En la zona de investigación, esta geoforma se ha originado debido a la acción erosiva de la red hídrica principalmente del río Michiquillay.



Foto 21: Terrazas formadas por el curso del río Michiquillay, en el sector de Michiquillay Bajo. Coordenadas: E:794927; N: 9219599; Cota: 3306 m.s.n.m.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS

4.1.1 Ubicación de los puntos de muestreo

La ubicación de los puntos de monitoreo de agua se determinó en base a la bocamina Michiquillay “El Túnel” localizada en Michiquillay Alto. Debido a que Michiquillay Alto es la zona de influencia del proyecto minero, se determinó recolectar tres muestras de agua en los meses de mayo (lluvia) y agosto (estiaje), con el fin de obtener una mejor evaluación y análisis de los metales pesados y sus concentraciones (Ver Anexo II-Plano N° 02). Por otro lado, Michiquillay Bajo es la zona con menor influencia por la mineralización del pórfido, por tanto, se ha considerado evaluar el punto M-04*, cuya información ha sido obtenida del Informe de la Evaluación Ambiental de la Calidad del Agua en el área de influencia de la Minera Anglo American-Proyecto Michiquillay realizado por la OEFA en el año 2013, un año antes de que la empresa en mención se retire del proyecto, según lo indicó Rumbo Minero en el 2014. Las estaciones de muestreo se detallan en la Tabla 10 y Figura 6.

Tabla 10: Ubicación de los puntos de muestreo

Estación de muestreo	Descripción de la ubicación	Coordenadas UTM -WGS-84		
		Este	Norte	Cota (m.s.n.m.)
M-01	Parte alta del río Michiquillay, a 130 m. aguas arriba, pasando la bocamina Michiquillay “El Túnel”	795493	9221097	3471
M-02	Aguas del DAM de la bocamina Michiquillay “El Túnel”	795623	9220971	3500
M-03	A 10 m. del punto de confluencia del agua de descarga de la bocamina al río Michiquillay	795375	9220734	3450
M-04*	Río Michiquillay parte baja, antes de la confluencia con la Qda. Quinuamayo*	794903	9219635	3310

*Punto de muestreo tomado de la OEFA (2013)

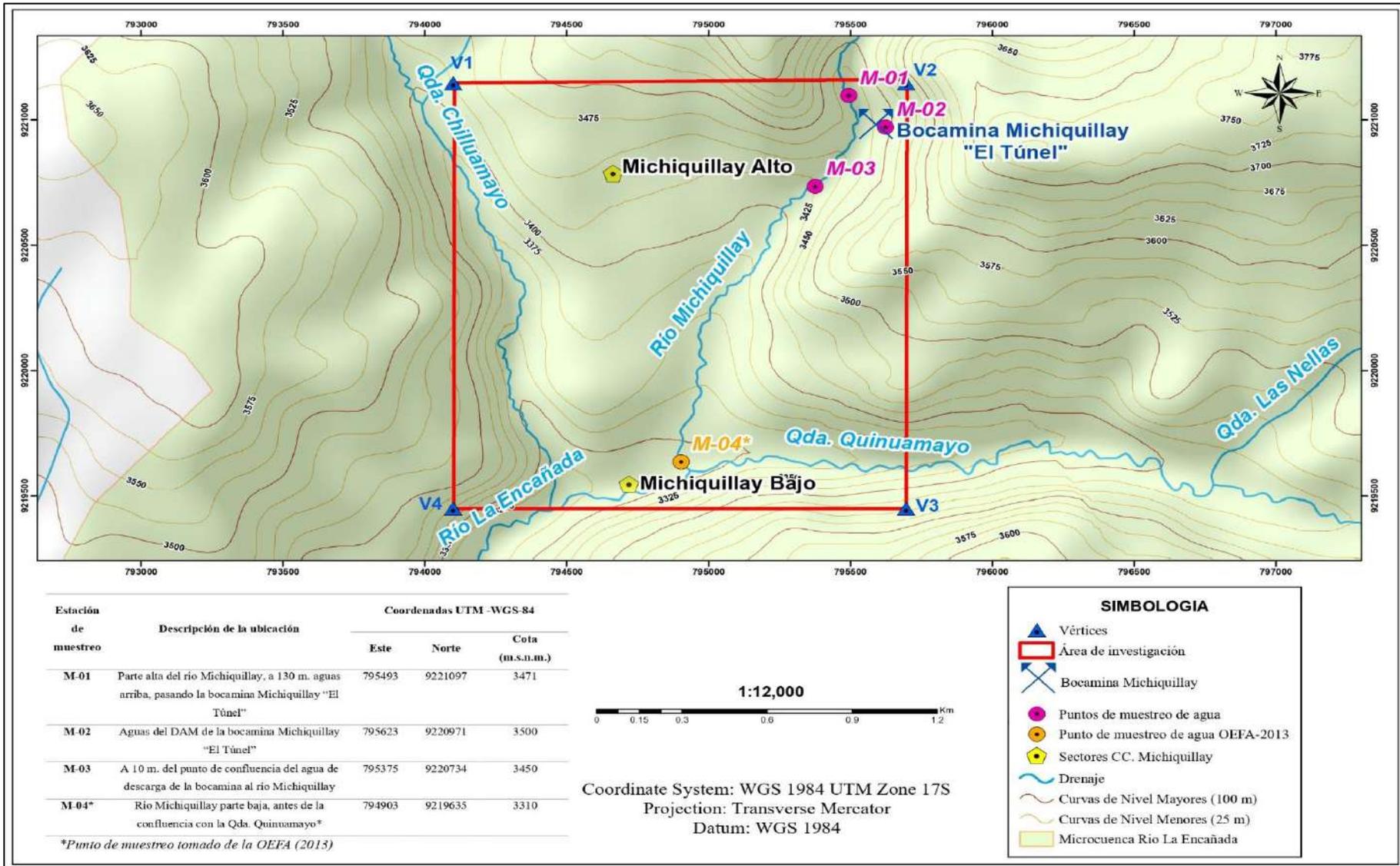


Figura 6: Ubicación de los puntos de muestreo de agua

A continuación, se describen cada uno de los puntos de monitoreo, según las épocas correspondientes:

4.1.1.1 Punto de muestreo 1 (M-01)

Este punto se encuentra ubicado en la parte alta del río Michiquillay, a aproximadamente 130 m. aguas arriba de la bocamina Michiquillay.



Foto 22: Ubicación del punto de muestreo 1 (M-01), río Michiquillay, aguas arriba de la bocamina Michiquillay” El Túnel”.

El primer monitoreo en este punto (M-01), se realizó durante el mes de mayo (época de lluvia), presenciándose un gran caudal del río Michiquillay, producto de las continuas precipitaciones, el cual se encuentra fluyendo con gran velocidad a través de los diferentes tipos de rocas que lo constituyen, tal como se muestra en las fotos 23 y 24.



Foto 23: a. Toma de muestra M-01 en época de lluvia. b. Preservación de la muestra M-01 en época de lluvia.



Foto 24: Sellado y etiquetado de la muestra M-01 para envío a laboratorio en época de lluvia.

El segundo monitoreo en este punto (M-01), se realizó durante el mes de agosto (época de estiaje). La muestra de agua fue tomada presenciándose un leve flujo con baja velocidad de las aguas del río Michiquillay, observándose que el agua tiene mayor contacto con los sedimentos depositados en el fondo, tal como se muestra en las fotos 25 y 26.



Foto 25: a. Toma de muestra M-01 en época de estiaje. b. Preservación de la muestra M-01 en época de estiaje.



Foto 26: Sellado y etiquetado de la muestra M-01 para envío a laboratorio en época de estiaje.

4.1.1.2 Punto de muestreo 2 (M-02)

Este punto se encuentra ubicado en la bocamina Michiquillay “El Túnel”. La muestra fue tomada en las aguas del drenaje ácido de mina (DAM), que se infiltra y discurre de este pasivo ambiental, la misma que ha sido encapsulada en tubos para luego hacerla desembocar por una pendiente pronunciada con excesiva vegetación al río Michiquillay.

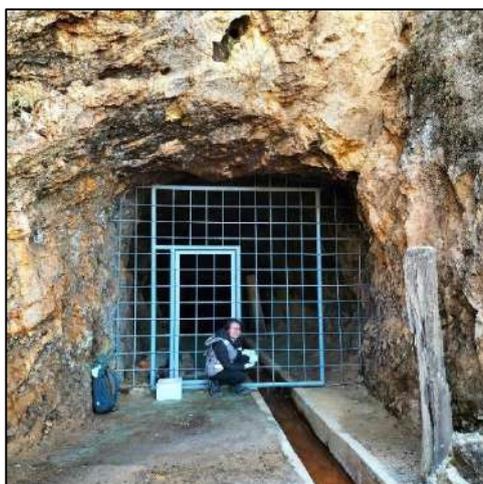


Foto 27: Ubicación del punto de muestreo 2 (M-02) en la Bocamina Michiquillay “El Túnel”.

El primer monitoreo en este punto (M-02), se realizó durante el mes de mayo, que corresponde a la época de lluvia en el distrito de La Encañada. La muestra de agua fue tomada en el efluente que sale de la bocamina producto del agua que se infiltra por las rocas con minerales de Cu como la calcantita y abundancia de óxidos de Fe, presenciándose un aumento en la corriente del agua, tal como se muestra en las fotos 28 y 29.



Foto 28: a. Toma de muestra M-02 en época de lluvia. b. Preservación de la muestra M-02 en época de lluvia.



Foto 29: Sellado y etiquetado de la muestra M-02 para envío a laboratorio en época de lluvia.

El segundo monitoreo en este punto (M-02), se realizó durante el mes de agosto, que corresponde a la época de estiaje en el distrito de La Encañada. La muestra de agua fue tomada del efluente que sale de la bocamina producto del agua que se infiltra por las rocas de este pasivo ambiental, observándose un menor flujo de agua, en comparación a la muestra tomada durante el mes de mayo.



Foto 30: a. Toma de muestra M-02 en época de estiaje. b. Preservación de la muestra M-02 en época de estiaje.



Foto 31: Sellado y etiquetado de la muestra M-02 para envío a laboratorio en época de estiaje.

4.1.1.3 Punto de muestreo 3 (M-03)

Este punto de muestreo se encuentra ubicado a aproximadamente 10 m. de la confluencia del río Michiquillay con el agua del drenaje ácido que desemboca de la bocamina Michiquillay por una pendiente abrupta con abundante vegetación oriunda de la zona, como se observa en las fotos 32 y 33



Foto 32: Desembocadura del agua del DAM de la bocamina Michiquillay “El Túnel”.



Foto 33: Ubicación del punto de muestreo 3 (M-03), en la descarga de la bocamina “El Túnel” al río Michiquillay.

Al igual que las dos muestras anteriores, el primer monitoreo en este punto (M-03), se realizó durante el mes de mayo. La muestra de agua fue tomada a aprox. 10 m. del punto de confluencia de las aguas del DAM de la bocamina que desemboca al río Michiquillay por una ladera de gran pendiente y abundante vegetación, tal como se muestra en la foto 34.



Foto 34: a. Recolección y preservación de la muestra M-03 en época de lluvia. b. Sellado y etiquetado de la muestra M-03 para envío a laboratorio en época de lluvia.

El segundo monitoreo en este punto (M-03), se realizó durante el mes de agosto, correspondiente a la época de estiaje en el distrito de La Encañada, presenciándose un flujo menor de estas aguas, debido a las escasas precipitaciones, tal como se observa en las fotos 35 y 36.



Foto 35: a. Toma de muestra M-03 en época de estiaje. b. Preservación de la muestra M-03 en época de estiaje.



Foto 36: Etiquetado de la muestra M-03 para envío a laboratorio en época de estiaje (menor caudal del río Michiquillay).

4.1.1.4 Punto de muestreo 4 (M-04*)

La información de este punto de muestreo ha sido tomada del Informe de la Evaluación Ambiental de la calidad del agua, en el área de influencia de la Minera Anglo American, ahora Southern Perú-Proyecto Michiquillay, realizado por la OEFA en el año 2013 durante el mes de marzo de ese mismo año.

Esta muestra está ubicada en el río Michiquillay, en la zona que corresponde a Michiquillay Bajo, antes de la confluencia con la Quebrada Quinuamayo.

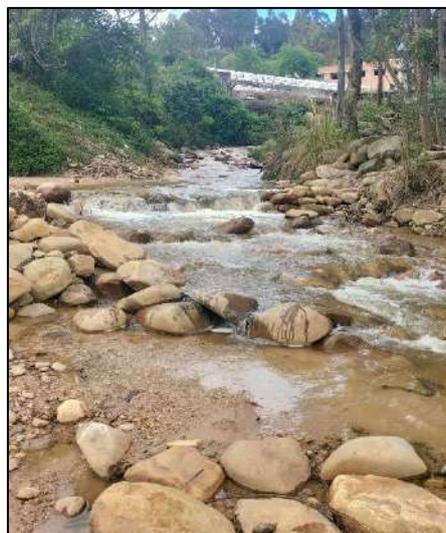


Foto 37: Ubicación de la muestra M-04* en el río Michiquillay, zona que corresponde a Michiquillay Bajo.

4.1.2 Presentación y análisis de resultados de laboratorio

Los recipientes con las muestras de agua obtenidas en época de estiaje y lluvia (M-01, M-02 y M-03), correspondientes a la zona de Michiquillay Alto, se enviaron al Laboratorio Regional de Agua, en la ciudad de Cajamarca, en donde se realizó el análisis en función a todos los metales disueltos y totales. De toda esta corrida de metales, en la presente investigación se consideró analizar únicamente los metales pesados que se encuentran determinados como parámetros inorgánicos en los ECA del agua de la categoría 3 según el MINAM (2017), siendo estos un total de 17 metales totales (Al, As, B, Ba, Be, Cd, Cu, Co, Cr, Fe, Li, Mg, Mn, Ni, Pb, Se, Zn).

Por otro lado, según la información obtenida del Informe de la Evaluación Ambiental de la calidad del agua, en el área de influencia de la Minera Anglo American-Proyecto Michiquillay, realizado por la OEFA en el año 2013, el análisis de metales totales en el punto de muestreo M-04* fueron realizados por el Laboratorio Inspectorate Services Peru SAC, obteniendo valores de concentraciones de los siguientes metales: Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn.

Resulta importante resaltar que la determinación de la presencia de los metales pesados estudiados en las muestras M-01, M-02 y M-03, depende de los Límites de Cuantificación del Método (LCM) utilizado por el Laboratorio Regional del Agua de Cajamarca. Si las concentraciones de metales pesados estudiados están por debajo del LCM(<LCM), es porque no existe la presencia de estos, puesto que no es posible determinar su concentración exacta.

La Tabla 11 resume los valores obtenidos para cada uno de los metales a estudiar en las muestras de agua analizadas.

Tabla 11: Resultados de los valores de la concentración de los metales pesados en las muestras de agua analizadas.

Parámetro Inorgánico	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo						
		M-01		M-02		M-03		M-04*
		Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	
Aluminio	mg/L	0.369	0.130	1.067	0.805	1.308	2.139	1.375
Arsénico	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	0.0032
Bario	mg/L	0.013	0.021	0.018	0.015	0.021	0.020	-
Boro	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-
Berilio	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-
Cadmio	mg/L	<LCM	<LCM	0.002	<LCM	<LCM	<LCM	0.0005
Cobre	mg/L	0.056	0.028	1.148	0.416	0.558	0.919	0.2048
Cobalto	mg/L	<LCM	0.002	0.004	0.004	<LCM	0.008	0.0014
Cromo	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	0.0077
Hierro	mg/L	0.719	0.309	15.87	9.828	2.905	1.814	1.68
Litio	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-
Magnesio	mg/L	0.543	1.084	2.242	2.102	1.064	1.965	-
Manganeso	mg/L	0.043	0.207	0.085	0.078	0.070	0.117	-
Níquel	mg/L	<LCM	0.009	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	0.0038
Plomo	mg/L	<LCM	<LCM	0.020	0.005	0.011	<LCM	0.0056
Selenio	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	-
Zinc	mg/L	0.020	0.046	0.048	0.038	0.041	0.056	0.0886

Para fines de análisis se tomarán cada uno de los metales pesados por separado y se estudiará el comportamiento de los niveles de concentración según el punto de muestreo en base a los resultados obtenidos en el laboratorio, para luego compararlos con los ECA del agua-categoría 3, la cual se divide en dos subcategorías: D1 (Vegetales de Tallo Bajo y Alto) y D2 (Bebida de Animales) establecidos en el D.S. N°004-2017-MINAM, y de esta manera determinar el punto de muestreo que presentó mayor concentración de estos metales y en que época ya sea de lluvia o estiaje, empleando tablas y gráficos, para finalmente brindar

una explicación en base a las causas litológicas, mineralógicas, geomorfológicas y antrópicas, que estarían dando lugar a las altas o bajas concentraciones de los metales a estudiar.

4.1.2.1 Aluminio (Al)

Los resultados obtenidos para este metal pesado se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Resultados de la concentración de Aluminio

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo				LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03	M-04*		D1	D2
Mayo	Al total	mg/L	0.369	1.067	1.308	-	0.023	5	5
Agosto	Al total	mg/L	0.13	0.805	2.139	-	0.023	5	5
Marzo (OEFA-2013)	Al total	mg/L	-	-	-	1.375	0.023	5	5

Los resultados que se muestran en la Tabla 12 comparados con los valores de los ECA del agua según la categoría 3 para este metal se representan en el Gráfico 1, para facilitar su comprensión.

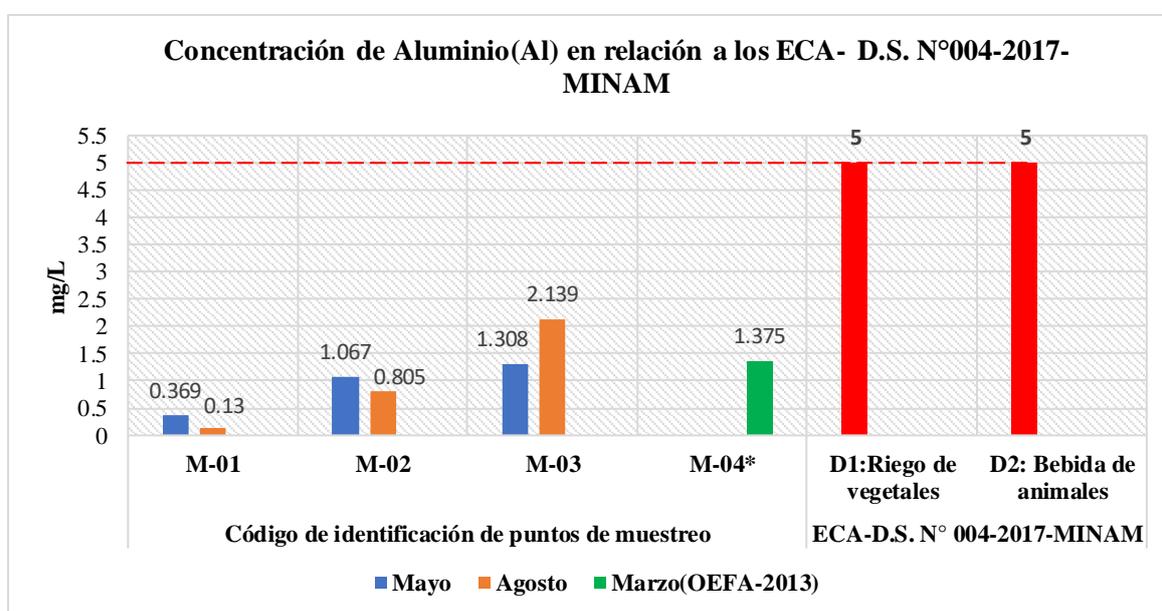


Gráfico 1: Comparación de resultados de Aluminio con los ECA del agua-categoría 3

De acuerdo a las concentraciones de Aluminio (Al) obtenidas en los cuatro puntos de muestreo, como se muestra en la Tabla 12 y Gráfico 1, los valores son menores a los estándares establecidos por el D.S. N° 004-2017-MINAM en ambas subcategorías: D1 (Vegetales de Tallo Bajo y Alto): 5 mg/L y D2 (Bebida de Animales): 5 mg/L, por lo tanto, estas aguas superficiales no se consideran contaminadas por este metal.

Las concentraciones de Al durante el mes de mayo en el primer punto de muestreo (M-01) son bajas: 0.369 mg/L, a comparación de los puntos de muestreo M-02: 1.067 mg/L y M-03: 1.308 g/L, siendo este último el que presenta la mayor concentración de Al.

Por otra parte, durante el mes de agosto, también existe la presencia de este metal en los puntos de muestreo M-01:0.13 mg/L, M-02: 0.805 mg/L y M-03: 2.139 mg/L, siendo también el tercer punto de muestreo el que presenta la mayor concentración de Al en comparación con los otros dos.

Según lo mencionado, en ambas épocas la concentración de Al en el primer punto es baja en comparación con los otros dos puntos de muestreo(M-02 y M-03), esto debido a que según lo que indica Mesa et al. (2020), el Aluminio se asocia a rocas enriquecidas en feldespatos y minerales tipo filosilicatos como arcillas y micas y a su vez es el principal componente de minerales de arcilla y tiende de a correlacionarse con elementos como el Fe, Cr y V en rocas alteradas, es así que a partir de esto, se deduce que el aumento de los niveles de concentración en estos puntos de muestreo, se debe a que las aguas están en mayor contacto con el pórfido dacítico, con contenido de feldespatos como plagioclasas, biotitas y piroxenos, alterado con óxidos de hierro, siendo la muestra del tercer punto la que presenta mayores concentraciones puesto que al caer con una pendiente pronunciada y elevado caudal hasta llegar al río, tiene contacto con rocas del pórfido oxidado y las va lavando, mientras que el segundo punto el agua tiene contacto con las rocas del pórfido por infiltración pero discurre lentamente, lo que permite el asentamiento de este metal en el suelo. Los valores obtenidos en el punto M-04*, no sobrepasan las concentraciones de Al pero si se presentan concentraciones casi similares a las de los puntos M-02 y M-03, esto puede deberse a que, en las partes bajas de un río, al ser zonas de poca pendiente y menor velocidad del agua, el aluminio tiende a sedimentarse y a esto se suman los aportes humanos como el uso de fertilizantes y pesticidas usados en la variedad de cultivos que existen en Michiquillay Bajo.

4.1.2.2 Arsénico (As)

Los resultados obtenidos para este metal pesado se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13: Resultados de la concentración de Arsénico

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo				LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03	M-04*		D1	D2
			Mayo	As total	mg/L	<LCM		<LCM	<LCM
Agosto	As total	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	0.005	0.1	0.2	
Marzo (OEFA-2013)	As total	mg/L	-	-	-	0.0032	0.1	0.2	

En el Gráfico 2 se muestran los resultados que se detallan en la Tabla 13, comparados con los valores de los ECA del agua según la categoría 3 para este metal.

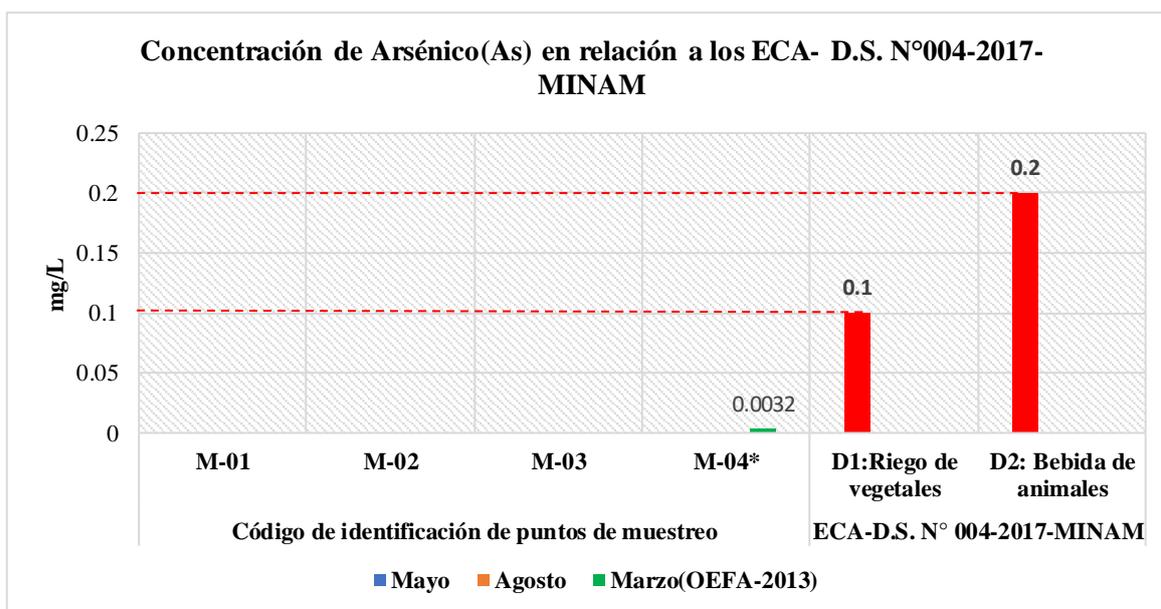


Gráfico 2: Comparación de resultados de Arsénico con los ECA del agua-categoría 3.

Las concentraciones de Arsénico (As) obtenidas en los cuatro puntos de muestreo, como se muestra en la Tabla 13 y Gráfico 2, muestran valores menores a los estándares establecidos

por el D.S. N° 004-2017-MINAM en ambas subcategorías: D1 (Vegetales de Tallo Bajo y Alto) y D2 (Bebida de Animales), por lo tanto, estas aguas superficiales no se consideran contaminadas por este metal.

Según los valores obtenidos de la concentración de As, se puede observar que los tres puntos de muestreo tanto en mayo como en agosto, no presentan concentraciones de este metal, lo que significa que no estarían presentando impactos negativos al ambiente por este metal. Según Höll y Litter (2010) citado por Garcés (2015), el arsénico puede ser adsorbido en la superficie de varios adsorbentes como lo es la alúmina activada, los adsorbentes basados en hierro y otros óxidos además de otros medios como la bauxita, la hematita, el feldespato, la laterita, los minerales arcillosos, entre otros. Dentro de los materiales usados como adsorbentes naturales se tienen; los minerales, los cuales se han utilizado para la remoción de arsénico presente en agua, ricos en Fe, Mn y Al y las arcillas incluidos en los mismos. Los materiales más utilizados en las barreras reactivas pasivas son aquellos que contienen óxidos de hierro y/o aluminio en altas concentraciones.

En base a lo mencionado, es que se podría explicar el porqué de que no existan concentraciones de este metal en las muestras de agua analizadas, puesto que estas se encuentran en contacto directo con rocas dacíticas compuestas por una serie de feldespatos con alteración argílica por la presencia de arcillas y de un gran contenido de óxidos de Fe (jarosita y hematita), lo cuales estarían adsorbiendo el arsénico en el agua.

4.1.2.3 Bario (Ba)

Los resultados obtenidos de las concentraciones para este metal pesado en los tres puntos de muestreo en los meses de mayo y agosto, se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14: Resultados de la concentración de Bario

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo			LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03		D1	D2
			Mayo	Ba total	mg/L		0.013	0.018
Agosto	Ba total	mg/L	0.021	0.015	0.02	0.004	0.7	**

Los valores que se muestran en la Tabla 14 comparados con los valores de los ECA del agua según la categoría 3 para este metal se representan en el Gráfico 3 para una mejor interpretación y comprensión.

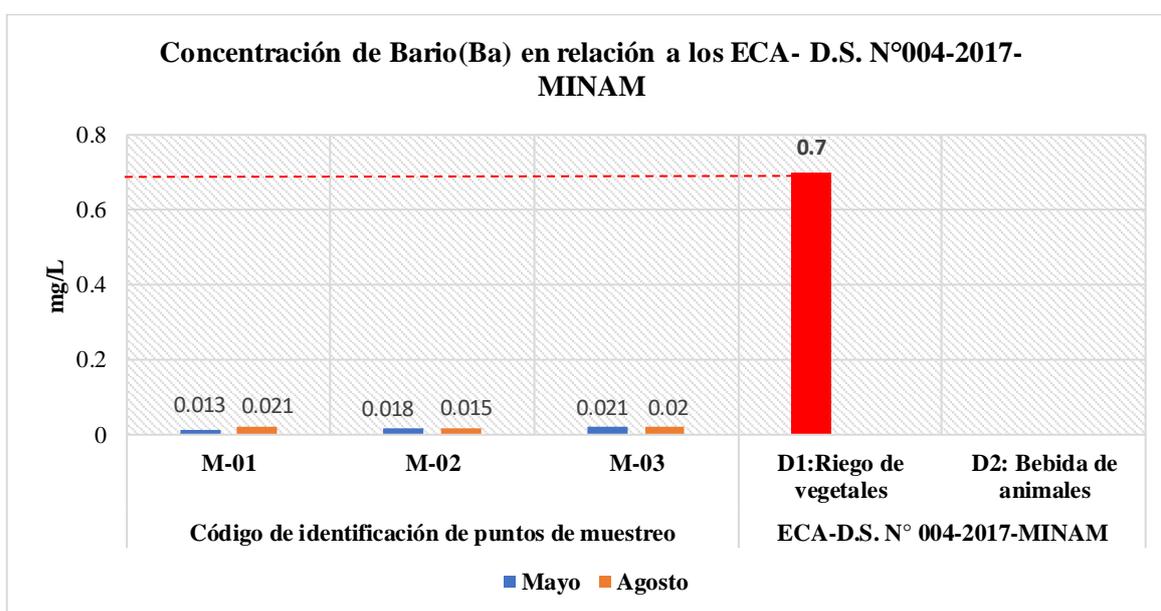


Gráfico 3: Comparación de resultados de Bario con los ECA del agua-categoría 3

Las concentraciones de Bario (Ba) obtenidas en los tres puntos de muestreo en ambas épocas, como se muestra en la Tabla 14 y Gráfico 3, muestran valores menores a los estándares establecidos por el D.S. N° 004-2017-MINAM únicamente para la subcategoría D1 (Vegetales de Tallo Bajo y Alto): 0.7 mg/L, puesto que este metal no aplica para la subcategoría D2 (Bebida de Animales), por lo tanto, estas aguas superficiales no se consideran contaminadas por este metal.

Según los valores obtenidos, en el mes de mayo se ha detectado la presencia de Bario, pero en pocas cantidades en los tres puntos de muestreo M-01: 0.013 mg/L, M-02: 0.018 mg/L y M-03: 0.021 mg/L, asimismo, en el mes de agosto, también se han detectado bajas concentraciones de este metal en los tres puntos de muestreo M-01:0.021 mg/L, M-02:0.015 mg/L y M-03: 0.02 mg/L.

El bario se encuentra en la naturaleza en muchas formas diferentes llamadas compuestos de bario. Hay dos formas del bario, el sulfato de bario y el carbonato de bario, que se encuentran a menudo en la naturaleza en forma de depósitos minerales subterráneos. Debido a que algunos compuestos de bario (sulfato de bario y carbonato de bario) no se mezclan muy bien con agua, la cantidad de bario que se encuentra generalmente en el agua es baja (Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, 2008). Por otro lado, según la Dirección General de Desarrollo Minero (2020), el bario generalmente está asociada con minerales de plomo, cobre, hierro, zinc, plata, níquel, cobalto, manganeso, entre otros. También se encuentra asociado con la fluorita, el cuarzo, la calcita, la dolomita, y la siderita.

De esta manera, según lo mencionado anteriormente, es que se puede explicar los niveles bajos de concentración de este metal, ya que Michiquillay es conocido por ser un depósito mineral de tipo pórfido, cuya explotación se ha dado anteriormente de forma subterránea, además de esto, presenta minerales de cobre al ser un pórfido de Cu y óxidos de Fe y cuarzo, los cuales podrían estar conteniendo compuestos de bario que no se disuelven con facilidad en el agua.

4.1.2.4 Berilio (Be)

Las concentraciones de Berilio (Be) en las tres muestras de agua analizadas que se han obtenido para este metal pesado se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15: Resultados de la concentración de Berilio

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo			LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03		D1	D2
Mayo	Be total	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	0.003	0.1	0.1
Agosto	Be total	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	0.003	0.1	0.1

Los resultados que se muestran en la Tabla 15 comparados con los valores de los ECA del agua según la categoría 3 para este metal se representan en el Gráfico 4.

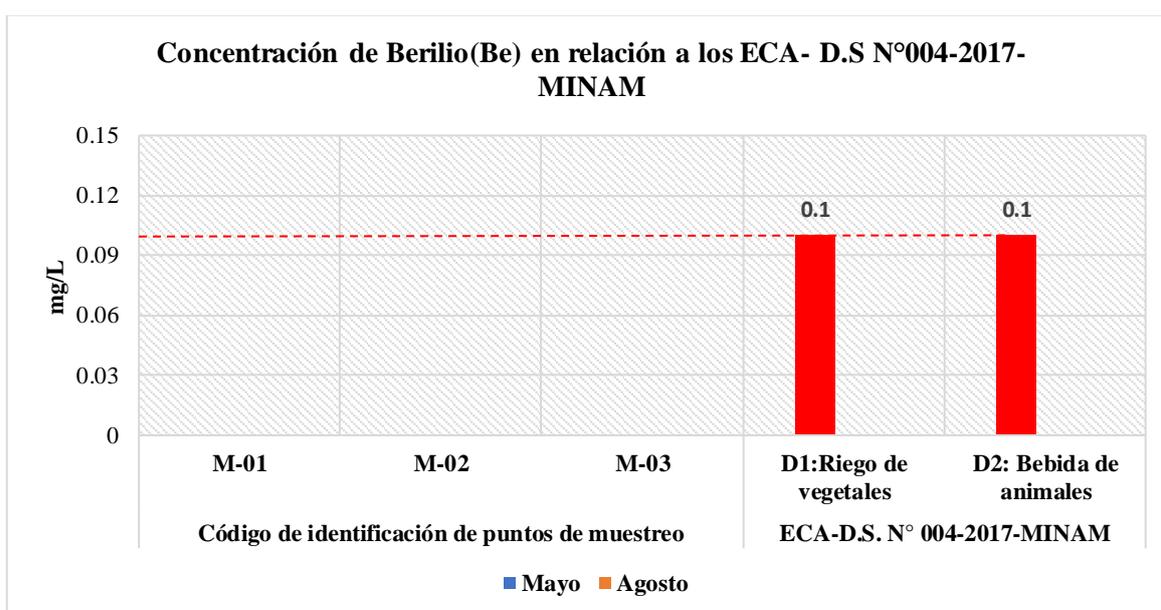


Gráfico 4: Comparación de resultados de Berilio con los ECA del agua-categoría 3

De acuerdo a los valores detallados en el Gráfico 4, no se tienen concentraciones de este metal en las muestras de agua de los tres puntos de monitoreo en ambos meses, ya que los resultados obtenidos son menores al LCM (Límite de cuantificación del método) de 0.1 mg/L para ambas subcategorías (D1 y D2).

Según Locutura et al. (2012), citado por Mesa et al. (2020), la movilidad del Berilio en el medio superficial es casi nula en ambientes reductores y baja en todas las condiciones de pH, aunque puede aumentar de manera significativa a pH ácido. Además de esto, menciona que sus barreras geoquímicas son la adsorción en materia orgánica, minerales de arcilla y óxidos de Fe-Mn.

En base a lo mencionado anteriormente, es que se explica en cierta parte las nulas concentraciones de este metal en los tres puntos de muestreo en ambos meses, puesto que estas aguas tienen contacto directo con gran cantidad de óxidos de Fe y minerales de arcilla producto de la alteración del pórfido dacítico.

4.1.2.5 Boro (B)

Los resultados obtenidos para este metal pesado se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16: Resultados de la concentración de Boro

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo			LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03		D1	D2
Mayo	B total	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	0.026	1	5
Agosto	B total	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	0.026	1	5

Los valores de las concentraciones de este metal que se muestran en la Tabla 16 comparados con los valores de los ECA del agua según la categoría 3 para este metal se representan en el Gráfico 5.

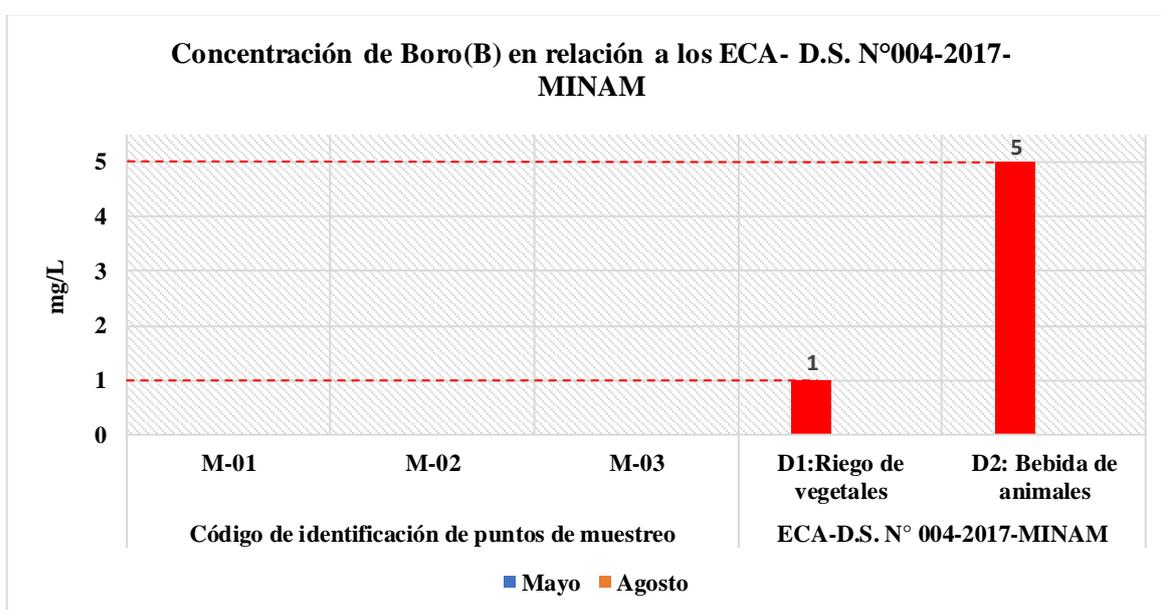


Gráfico 5: Comparación de resultados de Boro con los ECA del agua-categoría 3

Las concentraciones de Boro obtenidas en los tres puntos de muestreo en ambas épocas, son nulas tal como se muestra en el Gráfico 5, puesto que, según el análisis de laboratorio, los resultados son menores al LCM(<LCM) de 1 mg/L para la subcategoría D1 y 5 mg/L para la subcategoría D2, por lo tanto, estas aguas superficiales se consideran no presentan impactos negativos producto de la contaminación por este metal.

Según Ravelo (2012), el boro es insoluble en agua, alcoholes y soluciones de álcalis; es soluble en ácido nítrico y sulfúrico y en muchos metales fundidos como el aluminio, el calcio, el cobre, el hierro y el magnesio, además menciona que la concentración aproximada de boro en la corteza terrestre es de 10 ppm y es mucho más abundante en rocas sedimentarias (300 ppm) que en rocas ígneas (3 ppm), consecuencia de tres características: el boro es sublimable, la no preferencia del boro por las fases fundidas (elemento incompatible), su alta movilidad en la fase acuosa y su fuerte afinidad por minerales arcillosos (elemento litófilo).

En la zona de investigación existe una gran cantidad de minerales de Cu ya que es un pórfido característico de Cu, además de ello, este yacimiento presenta grandes cantidades de óxidos de Fe, además de arcillas producto de la alteración argílica del pórfido, la cual genera arcillas como la montmorillonita, a partir de esto es que se explicaría el porqué de las nulas concentraciones de boro en los tres puntos de muestreo analizados, ya que este se estaría diluyendo en los minerales de cobre.

4.1.2.6 Cadmio (Cd)

Los resultados obtenidos para este metal pesado se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17: Resultados de la concentración de Cadmio

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo				LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03	M-04*		D1	D2
Mayo	Cd total	mg/L	<LCM	0.002	<LCM	-	0.002	0.01	0.05
Agosto	Cd total	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	-	0.002	0.01	0.05
Marzo (OEFA-2013)	Cd total	mg/L	-	-	-	0.0005	0.002	0.01	0.05

Los resultados que se muestran en la Tabla 17 comparados con los valores de los ECA del agua según la categoría 3 para este metal se representan en el Gráfico 6 para su mejor comprensión.

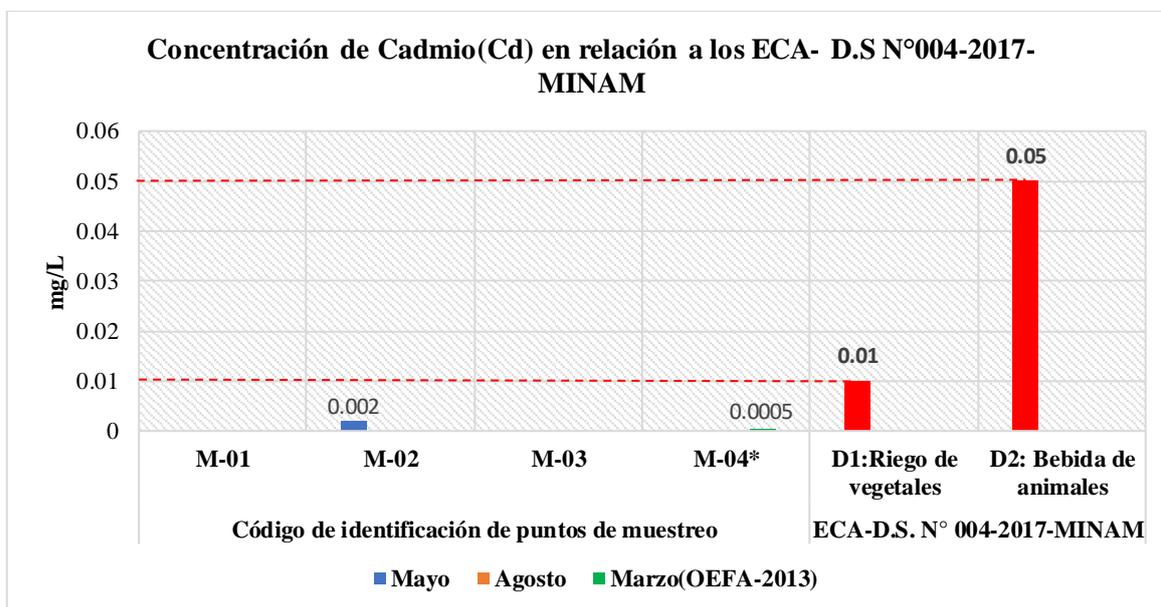


Gráfico 6: Comparación de resultados de Cadmio con los ECA del agua-categoría 3

Las concentraciones de Cadmio (Cd) obtenidas en los cuatro puntos de muestreo, como se muestra en la Tabla 17 y Gráfico 6, muestran valores casi nulos menores a los estándares establecidos por el D.S. N° 004-2017-MINAM en ambas subcategorías: D1 (Vegetales de Tallo Bajo y Alto): 0.01 mg/L y D2 (Bebida de Animales): 0.05 mg/L, por lo tanto, estas aguas superficiales no se consideran contaminadas por este metal.

Según el Gráfico 6, en el segundo punto de muestreo (M-02) durante el mes de mayo se obtuvieron concentraciones de Cd de 0.002 mg/L, mientras que en los otros dos puntos (M-01 y M-03) los valores son menores al LCM(<LCM). Por otra parte, durante el mes de agosto, las concentraciones de este metal en los tres puntos de muestreo los valores son nulos ya que son menores al LCM del laboratorio(<LCM).

El cadmio es un metal pesado naturalmente encontrado en la corteza terrestre en forma de óxidos complejos, sulfuros y asociado a carbonatos de zinc, plomo y cobre (Ruiz y Castellanos,2022). Por su parte, He et al. (2015) citado por Huaraca et al. (2020), afirman que la capacidad de intercambio catiónico es un factor importante que influye en la movilidad de Cd en el suelo y que este elemento está fuertemente ligado a las superficies de minerales de arcilla, óxidos de Fe, Al y humus, disminuyendo así su movilidad en suelos arcillosos (Mero et al., 2018).

En la zona de investigación existen minerales de arcilla, óxidos de hierro en la parte de Michiquillay Alto y cultivos con abonos en Michiquillay Bajo, por lo que esto indicaría la presencia mínima de este metal en los puntos de muestreo M-02 y M-04*, pero según lo que menciona Mero et al. (2018), el Cd liberado al ambiente tiende a acumularse en los suelos haciéndose disponible para las plantas, entrando así a la cadena alimenticia, lo que también explicaría las bajas o nulas concentraciones de Cd en los puntos de muestreo.

4.1.2.7 Cobre (Cu)

Los resultados obtenidos para este metal pesado, comparados con los ECA del agua de la categoría 3, se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18: Resultados de la concentración de Cobre

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo				LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03	M-04*		D1	D2
			Mayo	Cu total	mg/L	0.056		1.148	0.558
Agosto	Cu total	mg/L	0.028	0.416	0.919	-	0.018	0.2	0.5
Marzo (OEFA-2013)	Cu total	mg/L	-	-	-	0.204	0.018	0.2	0.5

Las concentraciones de Cu obtenidas en los tres puntos de muestreo (M-01, M-02 y M-03) en los meses de mayo y agosto, además del punto M-04*, que se muestran en la Tabla 18, comparados con los valores de los ECA del agua según la categoría 3 para este metal se representan en el Gráfico 7, para una mejor interpretación y comprensión.

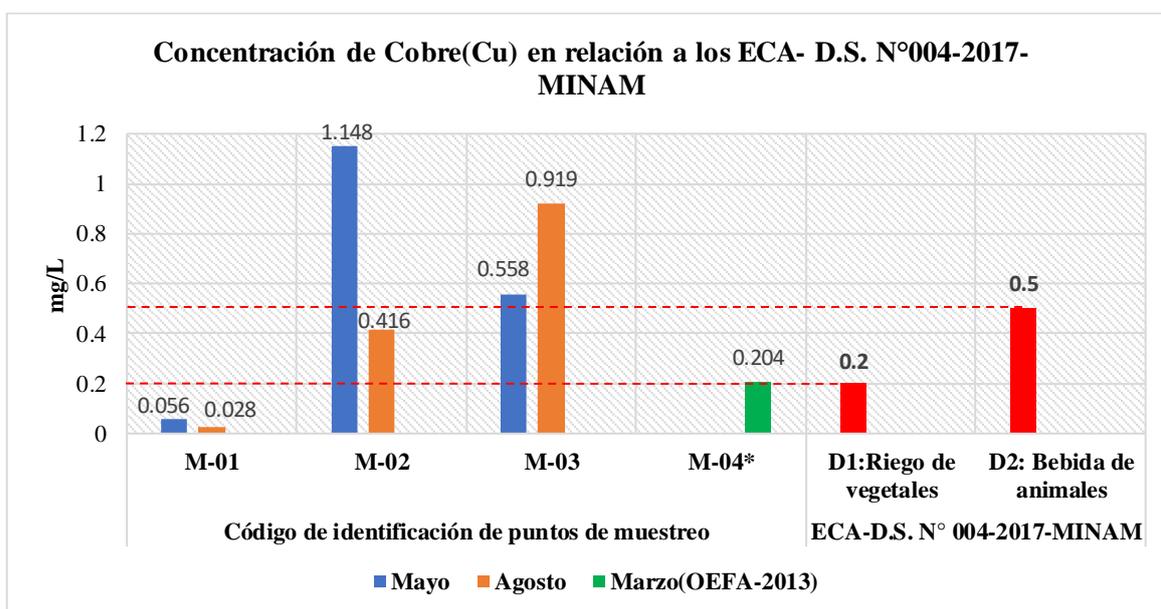


Gráfico 7: Comparación de resultados de Cobre con los ECA del agua-categoría 3

Los valores de las concentraciones de Cu que se muestran en el Gráfico 7, indican que:

En el primer punto de muestreo (M-01) en ambas épocas, los valores de las concentraciones son menores a los estándares establecidos, mientras que en el punto M-04*, los valores se encuentran coincidiendo, pero no sobrepasan a los establecidos en la subcategoría D1, ni

tampoco a los de la subcategoría D2, por lo que se considera que en ambos puntos el agua estaría siendo apta para el riego de vegetales y bebida de animales. En el segundo punto de muestreo (M-02), durante el mes de agosto, los valores se encuentran por encima de los ECA establecidos para las dos subcategorías D1: 1.148 mg/L y D2:0.416 mg/L, lo que quiere decir que las aguas en este punto no serían aptas ni para riego ni bebida de animales, pero en época de estiaje se muestran valores de 0.416 mg/L, que se encuentran por encima de la subcategoría D1 pero por debajo de la subcategoría D2, lo que indicaría que en tiempo de estiaje el agua es apta para riego de vegetales, pero no para la bebida de animales. En el tercer punto (M-03), durante los meses de mayo y agosto (0.558 mg/L y 0.919 mg/L respectivamente), los valores se encuentran por encima de las dos subcategorías, lo cual indica que estas aguas traerían problemas tanto para la vegetación como para el consumo de animales.

Según los valores reportados, el punto M-03 presenta mayor concentración de Cu en época de estiaje en comparación con la del punto M-02. Esto se explica en base a lo que menciona Herrera et al. (2012), que la llegada del cobre al medio acuático, y posteriormente a los depósitos sedimentarios del río, va ligada a usos diversos en la agricultura y la industria. Por tanto, si bien es cierto esto puede deberse al agua del DAM de la bocamina Michiquillay que desemboca en el río Michiquillay, también estaría contribuyendo la lixiviación de los minerales presentes en las rocas ya que al momento de que el agua cae tiene contacto con los minerales característicos del pórfido Michiquillay, como son la pirita, calcopirita y los óxidos de Fe, quienes según la metalurgia del cobre estos se encuentran asociados a este metal, además de esto, tal como lo mencionan estos autores, las concentraciones de Cu puede deberse al empleo de fertilizantes y fungicidas formulados a partir de este metal en las áreas de cultivo, partiendo de esto, en la zona de investigación existen áreas de cultivos cercanos al río y al punto de muestreo (M-03), además de ello, según ATSDR (2008), la vegetación en descomposición también es una fuente de Cu, porque es su momento fueron plantas bioacumuladoras de este metal, por lo que el agua al caer por una pendiente con abundante vegetación, esto estaría aportando concentraciones de la dispersión de este metal este metal. Los valores altos en época de sequía se deberían a las escasas precipitaciones durante esta época, lo que permite que según lo que consideran Barba et al. (2017) los componentes no se disuelvan y por ende sus concentraciones sean mayores.

Por otro lado, en época de lluvia, en el punto M-02 se observan mayores concentraciones de Cu que en el punto M-03, esto puede deberse a la gran velocidad con la que cae el agua por la pendiente por donde desemboca el agua de la bocamina al río ya que según lo menciona Robalino y López (2011), el poder de la escorrentía superficial en las laderas, se acrecienta con la inclinación del terreno, especialmente en zonas de pendientes largas y pronunciadas donde la velocidad y energía de la corriente es fuerte; a todo esto se suman las fuertes y continuas precipitaciones que se dan durante esta época, por lo que se estaría generando una gran velocidad y energía del agua que desemboca, las cuales estarían disolviendo a este metal según lo que indican Barba et al. (2017), pese a que según lo mencionado anteriormente existen varias fuentes de Cu que podrían originar elevadas concentraciones de este metal.

4.1.2.8 Cobalto (Co)

Los resultados obtenidos para este metal pesado, comparados con los ECA del agua según la categoría 3, se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19: Resultados de la concentración de Cobalto

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo				LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03	M-04*		D1	D2
Mayo	Co total	mg/L	<LCM	0.004	<LCM	-	0.002	0.05	1
Agosto	Co total	mg/L	0.002	0.004	0.008	-	0.002	0.05	1
Marzo (OEFA-2013)	Co total	mg/L	-	-	-	0.0014	0.002	0.05	1

Los resultados que se muestran en la Tabla 19 comparados con los valores de los ECA del agua según la categoría 3 para este metal se representan en el Gráfico 8, a fin de tener una mejor comprensión.

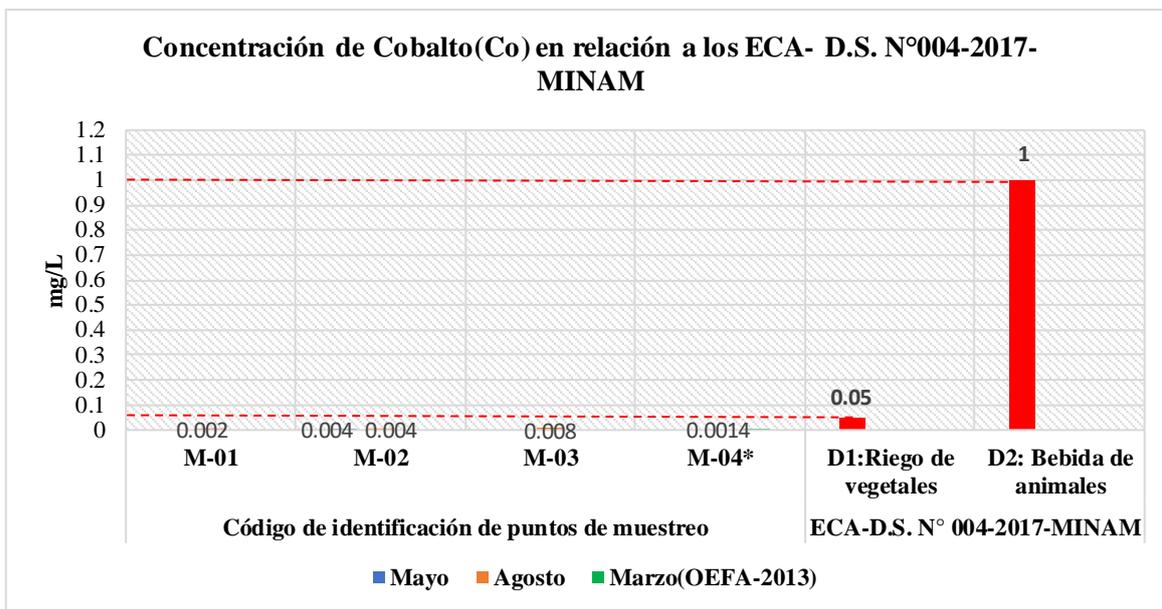


Gráfico 8: Comparación de resultados de Cobalto con los ECA del agua-categoría 3

Las concentraciones de Cobalto (Co) obtenidas en los cuatro puntos de muestreo, como se muestra en la Tabla 19 y Gráfico 8, muestran valores casi nulos menores a los estándares establecidos por el D.S. N° 004-2017-MINAM en ambas subcategorías: D1 (Vegetales de Tallo Bajo y Alto): 0.05 mg/L y D2 (Bebida de Animales): 1 mg/L, por lo tanto, estas aguas superficiales no se consideran contaminadas por este metal.

Según Chong-Hu (2012) citado por Chepillo (2019), el cobalto es un elemento metálico que no existe como mineral puro en la naturaleza. Por lo general está asociado a minerales de otros metales (por ejemplo, Cu, Ni, Fe, Pb, Zn, etc.) y minerales de cobalto sin otros metales, pero en cantidades inferiores. Por lo tanto, es producido por lo general como subproducto de la minería del cobre o níquel. Generalmente es recuperado por el procesamiento de sulfuros o óxidos de cobre-cobalto o sulfuros de níquel o de laterita, además según la clasificación de Goldsmith, el cobalto pertenece a los elementos siderófilos gracias a su afinidad geoquímica con el Fe, Ni, Au, Mo, As, Os, Ir, Pt, Ru.

El cobalto es un elemento que ocurre de forma natural en el medio ambiente en el aire, agua, suelo, rocas, plantas y animales. Este puede también entrar en la superficie del agua a través de la escorrentía cuando el agua de lluvia corre a través del suelo y rocas que contienen Cobalto. Este metal no puede ser destruido una vez que este ha entrado en el medioambiente

y puede reaccionar con otras partículas o ser absorbido por las partículas del suelo o el agua. (Lenntech,2024).

Por todo esto, es que se explicarían las bajas concentraciones de este metal en los puntos de muestreo, ya que en estos, las aguas discurren sobre rocas con gran cantidad de minerales de cobre y fierro al ser un depósito mineral tipo pórfido de Cu, además de ello según Lenntech (2024), el cobalto se mueve sólo bajo condiciones ácidas, pero al final la mayoría del cobalto terminará en el suelo y sedimentos por lo que al momento de tomar las muestras de agua es posible que la mayoría de este metal haya estado concentrado en el suelo.

4.1.2.9 Cromo (Cr)

Las concentraciones de Cromo obtenidas a partir del análisis de laboratorio en los cuatro puntos de muestreo, comparados con los ECA del agua establecidos por el D.S. N° 004-2017-MINAM se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20: Resultados de la concentración de Cromo

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo				LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03	M-04*		D1	D2
			Mayo	Cr total	mg/L	<LCM		<LCM	<LCM
Agosto	Cr total	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	-	0.003	0.1	1
Marzo (OEFA-2013)	Cr total	mg/L	-	-	-	0.0077	0.003	0.1	1

Los valores de las concentraciones de las muestras de agua en los puntos de monitoreo que se muestran en la Tabla 20 comparados con los valores de los ECA del agua-categoría 3 según el MINAM (2017) se representan en el Gráfico 9 para una mejor interpretación y análisis.

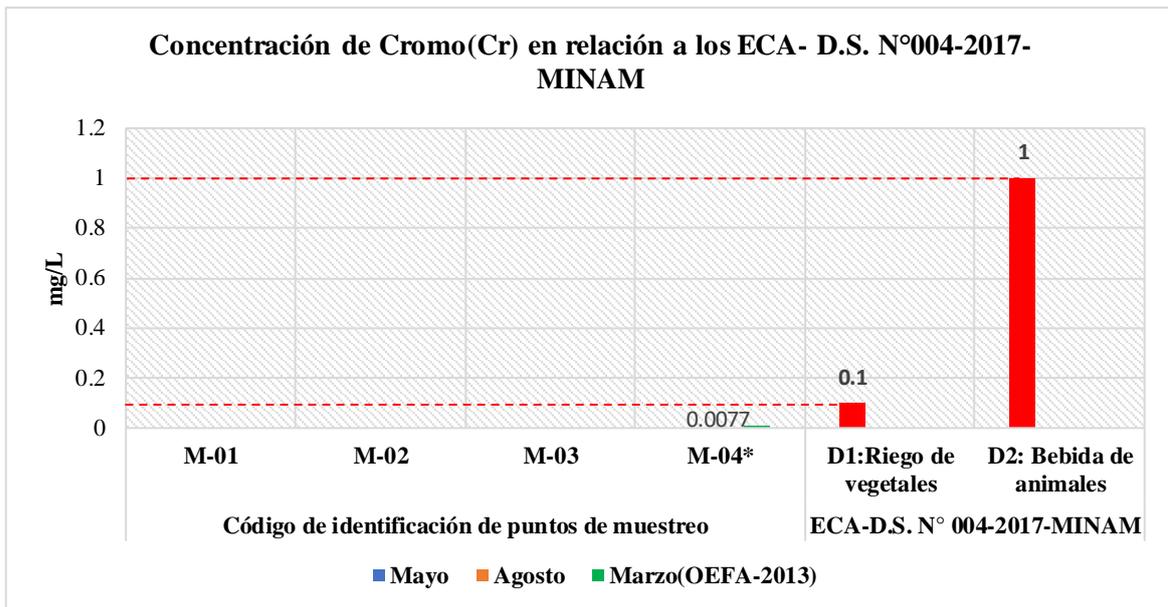


Gráfico 9: Comparación de resultados de Cromo con los ECA del agua-categoría 3

Según lo que se muestra en el Gráfico 9, en los puntos de muestreo M-01, M-02 y M-03 no se encontró la presencia de este metal, ya que los valores son menores al LCM (<LCM): 0.003 mg/L, mientras que en el punto M-04* las concentraciones fueron mínimas casi nulas, por lo tanto, estas aguas no se consideran contaminadas por este metal.

Las fuentes de Cr en el ambiente son tanto naturales como antropogénicas. El Cr, en la naturaleza, se presenta como cromita, en rocas serpentinas o ultramáficas (Cuéllar, 2018).

En base a lo mencionado anteriormente es que se puede decir que no se presentan concentraciones de este metal ya que la mineralogía de la zona de investigación en su mayoría no se asocia con el Cr, además de ello según Cuéllar (2018), el Cr puede persistir en minerales originales, coprecipitado con óxidos e hidróxidos de manganeso, aluminio y/o hierro, que generalmente se adsorben en las partículas del suelo y se complejan con compuestos orgánicos del suelo. Así mismo Benezam y Pujol (2000) citado por Izquierdo y Verástegui (2017) mencionan que, si las concentraciones de Cr en el agua son bajas, se debe a la distribución del metal y su capacidad de bioacumulación.

4.1.2.10 Hierro (Fe)

Los resultados obtenidos para este metal pesado, comparados con los ECA del agua para la categoría 3 según el MINAM (2017) se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21: Resultados de la concentración de Hierro

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo				LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03	M-04*		D1	D2
Mayo	Fe total	mg/L	0.719	15.87	2.905	-	0.023	5	**
Agosto	Fe total	mg/L	0.309	9.828	1.814	-	0.023	5	**
Marzo (OEFA-2013)	Fe total	mg/L	-	-	-	1.68		5	**

Según lo que se muestra en la Tabla 21, el Fe no aplica para la subcategoría D2: bebida de animales: **, por lo que los resultados solamente se compararán en base a los ECA del agua según la categoría 3 de la subcategoría D1(Riego de vegetales): 5mg/L. Para una mejor comprensión e interpretación de los resultados obtenidos, estos se representan en el Gráfico 10.

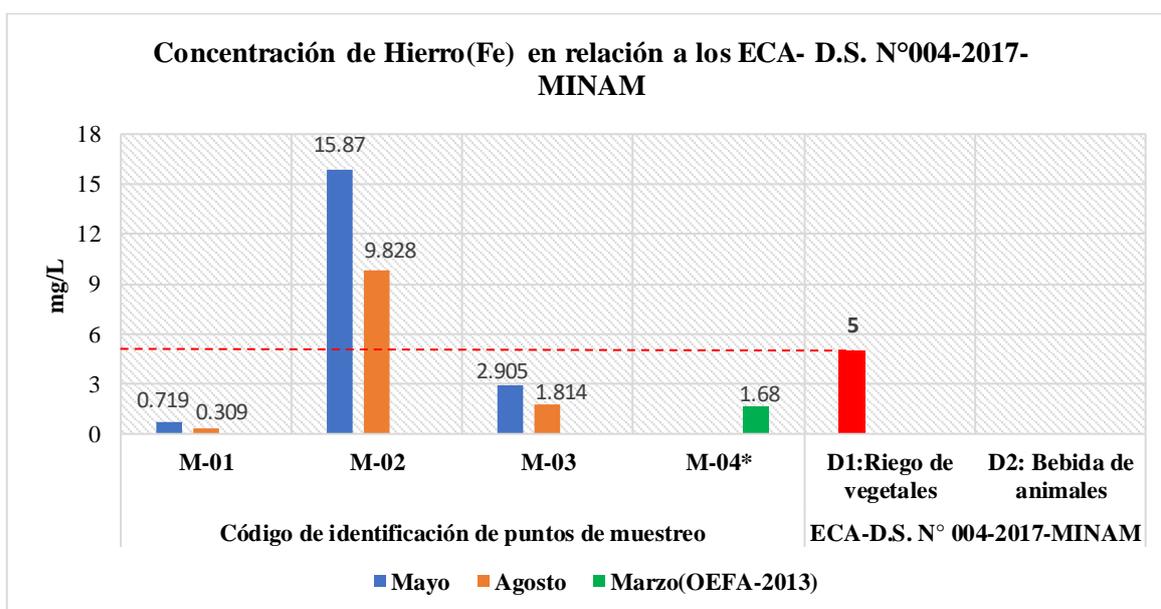


Gráfico 10: Comparación de resultados de Hierro con los ECA del agua-categoría 3

Las concentraciones de Fe, obtenidas en los cuatro puntos de muestreo, tal como se muestra en el Gráfico 10, indican que:

En el primer punto de muestreo (M-01) en los meses de mayo (0.719 mg/L) y agosto (0.309 mg/L), las concentraciones de este metal son menores a los estándares establecidos, por lo que el agua sería apta para el riego de vegetales. El segundo punto de muestreo (M-02), en los meses de mayo y agosto presenta concentraciones de 15.87 mg/L y 9.828 mg/L, los cuales se encuentran por encima de los ECA del agua establecidos para la subcategoría D1, lo que quiere decir que no sería apta para el riego de vegetales. En el tercer punto (M-03), tanto en época de lluvia (2.905 mg/L) como de estiaje (1.814 mg/L), los valores se encuentran por debajo de los establecidos para subcategoría D1, al igual que en el punto M-04*, lo cual indica que estas aguas se encuentran libre de contaminantes por este metal y por ende podrían ser utilizadas para el riego de vegetales.

Además, en el punto M-02, se observan valores altos en las concentraciones de Fe, ya que el agua muestreada es del DAM que se infiltra y discurre de la bocamina Michiquillay “El Túnel” el cual es un pasivo ambiental producto de la actividad minera donde existen rocas con un gran contenido de óxidos de Fe.

El agua superficial y el agua subterránea poco profunda por lo general tienen suficiente oxígeno disuelto para mantener el hierro en un estado sin disolver. En las aguas superficiales, el hierro es más susceptible de ser atrapado dentro de partículas de materia orgánica en suspensión. El oxígeno disuelto generalmente disminuye con la profundidad, y a su vez las condiciones pobres de oxígeno también pueden ocurrir en pozos relativamente poco profundos que tienen agua estancada o un movimiento muy lento. La cantidad de hierro disuelto en agua a menudo sigue una tendencia de menor a mayor y se reduce a medida que la profundidad del pozo aumenta. Las aguas que no están en contacto regular con el ambiente tienden a ser bajas en oxígeno (pobres en oxígeno) y el hierro en un ambiente pobre de oxígeno es relativamente soluble y puede causar altos niveles de hierro disuelto, por otro lado, el agua oxigenada tendrá bajos niveles de hierro (Pure Water, 2019).

Lo indicado anteriormente, sería una explicación del porqué en el punto M-03 (confluencia del río Michiquillay con el efluente de la bocamina Michiquillay) se observan concentraciones menores de Fe en comparación con las del punto M-02, puesto que el

efluente que sale de la bocamina es encapsulada en tuberías para al final desembocar al río Michiquillay por una quebrada con pronunciada pendiente y abundante vegetación, lo que significa que esta agua al caer queda expuesta a la superficie, lo que estaría originando que estas aguas se enriquezcan en oxígeno y por ende los niveles de hierro disuelto sean bajos, además de ello la abundante vegetación presente a lo largo de su caída encapsulan las partículas de hierro en el suelo, llegando de esta manera con concentraciones bajas al río Michiquillay.

4.1.2.11 Litio (Li)

Los resultados obtenidos para este metal pesado comparados con los ECA del agua-categoría 3 establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM, se muestran en la Tabla 22 y representan en el Gráfico 11.

Tabla 22: Resultados de la concentración de Litio

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo			LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03		D1	D2
Mayo	Li total	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	0.005	2.5	2.5
Agosto	Li total	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	0.005	2.5	2.5

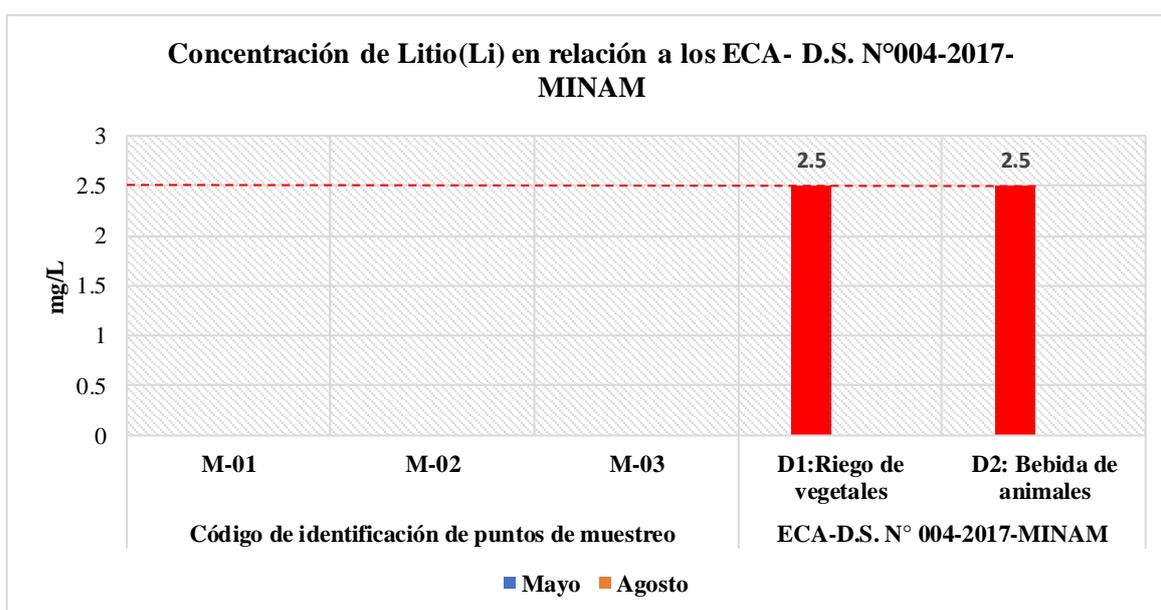


Gráfico 11: Comparación de resultados de Litio con los ECA del agua-categoría 3

Tal como se muestra en el Gráfico 11, en los tres puntos de muestreo durante los meses de mayo y agosto no se presentaron concentraciones de Litio (Li) ya que los valores son menores al LCM: 0.005 mg/L, por lo tanto, estas aguas no se consideran contaminadas por este metal.

Según Witker (2021), el litio es el tercer elemento del sistema periódico, después del hidrogeno y del helio, y, además, el primero del grupo de metales alcalinos. Se trata de un material altamente reactivo, por lo que, en la naturaleza, existe únicamente combinado en la forma de minerales de litio en rocas pegmatíticas, rocas sedimentarias y especialmente en salmueras naturales continentales.

Lo que se menciona anteriormente explica la causa por la que en las muestras de agua no existen concentraciones de este metal ya que Michiquillay es un depósito tipo pórfido de Cu que no tiene relación directa con la formación de pegmatitas, de salmueras y de pozos petrolíferos (Dirección General de Desarrollo Minero, 2018).

4.1.2.12 Magnesio (Mg)

La comparación de los resultados obtenidos para este metal pesado con los ECA del agua - categoría 3 del MINAM (2017), se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23: Resultados de la concentración de Magnesio

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo			LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03		D1	D2
Mayo	Mg total	mg/L	0.543	2.242	1.064	0.019	**	250
Agosto	Mg total	mg/L	1.084	2.102	1.965	0.019	**	250

Para una mejor comprensión e interpretación, en el Gráfico 12 se muestran los resultados de los valores de las concentraciones de este metal comparados con los valores de los ECA del agua según la categoría 3 establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM.

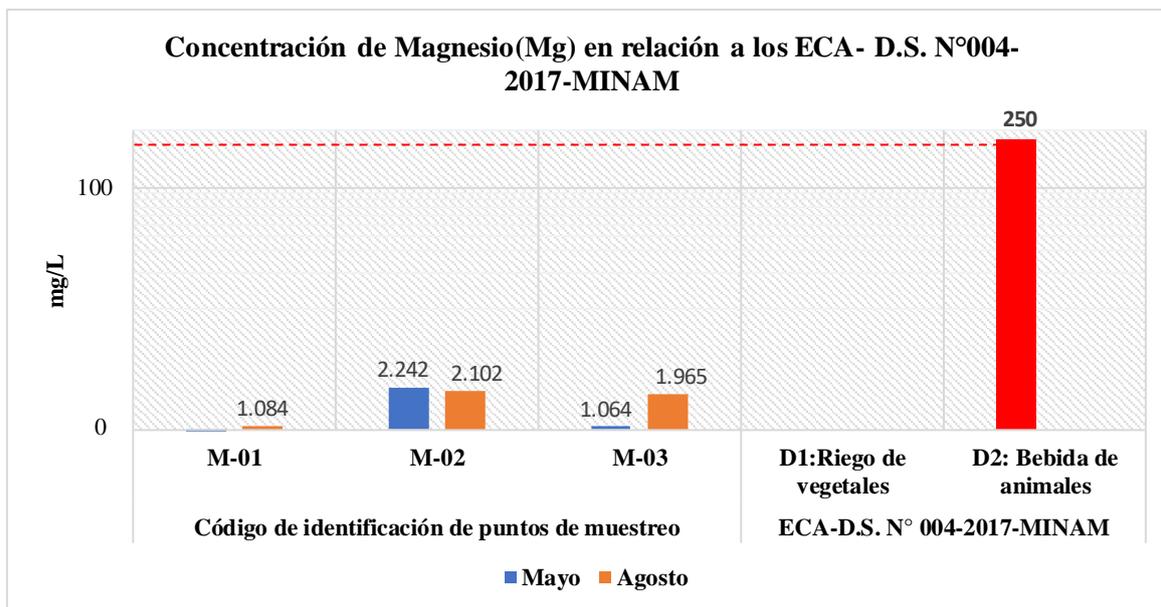


Gráfico 12: Comparación de resultados de Magnesio con los ECA del agua-categoría 3

Las concentraciones de Magnesio (Mg) obtenidas en los tres puntos de muestreo en ambas épocas, como se representa en el Gráfico 12, muestran valores menores a los estándares establecidos por el D.S. N° 004-2017-MINAM solo para la subcategoría D2 (Bebida de Animales): 250 mg/L, puesto que el parámetro del Mg no aplica para la subcategoría D1: **, por lo tanto, estas aguas superficiales no se consideran contaminadas por este metal.

Según los resultados obtenidos se observa que el segundo punto de muestreo (M-02) en los meses de mayo y agosto, presenta las concentraciones más altas de Mg en relación a los otros dos puntos (M-01 y M-03), esto se explica por el contacto directo que estas aguas obtenidas de la bocamina Michiquillay “El Túnel” tienen con el pórfido dacítico con alteración argílica caracterizada por presentar minerales arcillosos como la montmorillonita, puesto que según Mikkelsen (2010), el Mg se localiza dentro de los minerales arcillosos del suelo o está asociado con el intercambio de cationes en la superficie de las arcillas como la clorita, vermiculita y montmorillonita, las cuales han pasado por una etapa intermedia de meteorización y todavía contienen cierta cantidad de Mg como parte de la estructura interna del cristal y a su vez indica que la tasa de liberación de Mg de estas arcillas es generalmente baja.

4.1.2.13 Manganeso (Mn)

Los valores obtenidos de la concentración de Mn en relación a los ECA del agua establecidos en el D.S N° 004-2017-MINAM se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24: Resultados de la concentración de Manganeso

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo			LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03		D1	D2
Mayo	Mn total	mg/L	0.043	0.085	0.07	0.003	0.2	0.2
Agosto	Mn total	mg/L	0.207	0.078	0.117	0.003	0.2	0.2

Los resultados que se muestran en la Tabla 24 comparados con los valores de los ECA del agua según la categoría 3 para este metal se representan en el Gráfico 13.

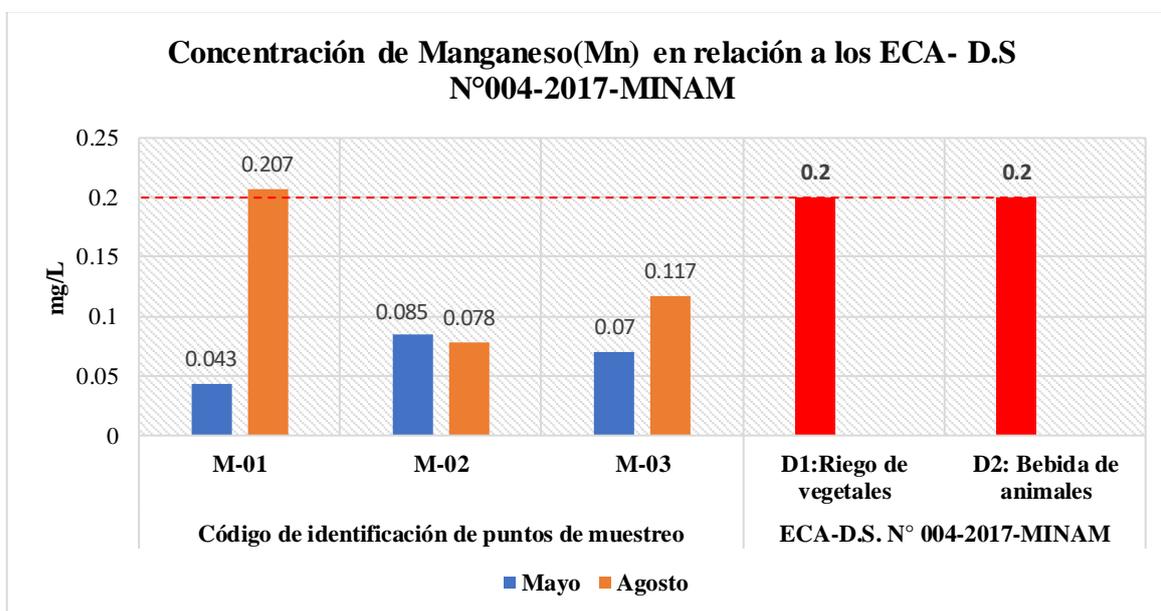


Gráfico 13: Comparación de resultados de Manganeso con los ECA del agua-categoría 3

Las concentraciones de Mn, obtenidas en los tres puntos de muestreo, tal como se muestra en la Tabla 24 y Gráfico 13, indican que: En el primer punto de muestreo (M-01) durante los meses de mayo y agosto, se obtuvieron concentraciones de 0.043 mg/L y 0.207 mg/L respectivamente, siendo estas menores a los estándares establecidos para las subcategorías D1: 0.2 mg/L y D2: 0.2 mg/L, por lo que el agua sería apta para la bebida de animales y a su vez para el riego de vegetales. En el segundo punto de muestreo (M-02), en ambos meses

los valores se encuentran por debajo de los ECA del agua para ambas categorías, ya que las concentraciones que se obtuvieron son de 0.085 mg/L y 0.078 mg/L respectivamente, lo que quiere decir que esta agua es apta para el riego de vegetales y bebida de animales. En el tercer punto de muestreo (M-03), en ambos meses, se obtuvieron concentraciones de Mn de 0.07 mg/L y 0.117 mg/L respectivamente, siendo estos menores a los ECA del agua según la categoría 3, lo que indica que si se podría usar para el riego de vegetales y también para bebida de animales ya que se encuentra libre de contaminación por este metal.

El Mn se comporta análogamente al hierro, en su forma primaria está ligado a magmas básicos y de acidez media, y puede ser fraccionado y transportado mediante soluciones acuosas (hidrotermales). Por intemperismo se logra la separación y posterior migración del elemento hasta su sedimentación química, ya que el Mn es fácilmente soluble en aguas que contengan CO₂ (Roy, 1992).

4.1.2.14 Níquel (Ni)

La Tabla 25, muestra las concentraciones de Ni comparados con los ECA del agua según la categoría 3 del MINAM (2017).

Tabla 25: Resultados de la concentración de Níquel

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo				LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03	M-04*		D1	D2
			Mayo	Ni total	mg/L	<LCM		<LCM	<LCM
Agosto	Ni total	mg/L	0.009	<LCM	<LCM	-	0.006	0.2	1
Marzo (OEFA-2013)	Ni total	mg/L	-	-	-	0.0038	0.006	0.2	1

Los resultados que se muestran en la Tabla 25 se representan en el Gráfico 14 a fin de tener un mejor entendimiento.

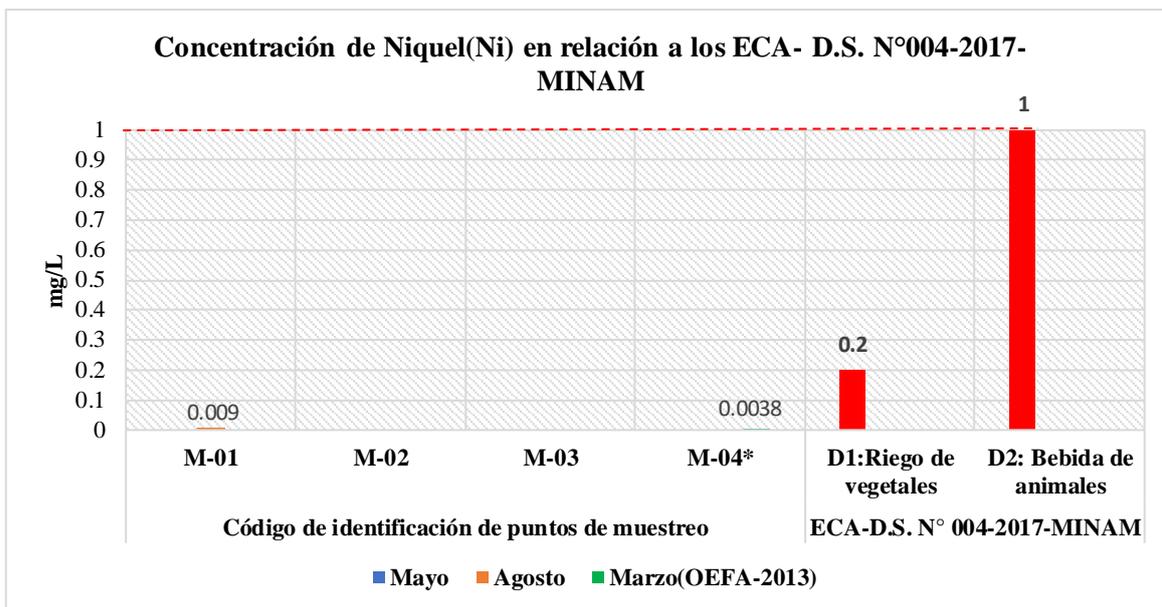


Gráfico 14: Comparación de resultados de Níquel con los ECA del agua-categoría 3

En el Gráfico 14 se muestra que las concentraciones de Ni en el primer punto de muestreo (M-01) durante el mes de agosto (0.009 mg/L) y en el punto M-04* son mínimas, por lo que no superan a los ECA del agua categoría 3 establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM en ambas subcategorías D1: 0.2 mg/L y D2: 1 mg/L, mientras que en el mes de mayo no se han presentado concentraciones de este metal. Por otra parte, en los puntos de muestreo M-02 y M-03 no se tienen concentraciones de este metal durante los meses de mayo y agosto ya que sus valores fueron menores al LCM (<LCM) que es de 0.006 mg/L. Por todo esto se consideran a estas aguas aptas para el riego de vegetales y bebida de animales ya que se encuentran libres de contaminación por este metal.

Según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2008), el níquel es muy fácil de combinarse con algunos metales como el hierro, cobre, cromo y zinc. A su vez, indica que la concentración de níquel en el agua de ríos y lagos es muy baja, siendo generalmente menor de 10 partes de níquel por billón de partes de agua (ppb). A menudo el nivel de níquel en el agua es tan bajo que no se puede medir a menos que se usen instrumentos muy sensibles. Esto explicaría la razón por la que existen mínimas o nulas concentraciones de Ni en las aguas de los puntos de muestreo, puesto que a las rocas con grandes cantidades de óxidos de Fe y de Cu que presenta la zona de investigación, se estarían adhiriendo mínimas partículas de Ni que no se estarían debido a las bajas concentraciones que este presenta en el agua de los ríos.

4.1.2.15 Plomo (Pb)

Los resultados obtenidos para este metal pesado se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26: Resultados de la concentración de Plomo

Mes	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo				LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03	M-04		D1	D2
Mayo	Pb total	mg/L	<LCM	0.02	0.011	-	0.004	0.05	0.05
Agosto	Pb total	mg/L	<LCM	0.005	<LCM	-	0.004	0.05	0.05
Marzo (OEFA-2013)	Pb total	mg/L	-	-	-	0.0056	0.004	0.05	0.05

Los resultados que se muestran en la Tabla 26 comparados con los valores de los ECA del agua de la categoría 3, establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM para este metal, se representan en el Gráfico 15.

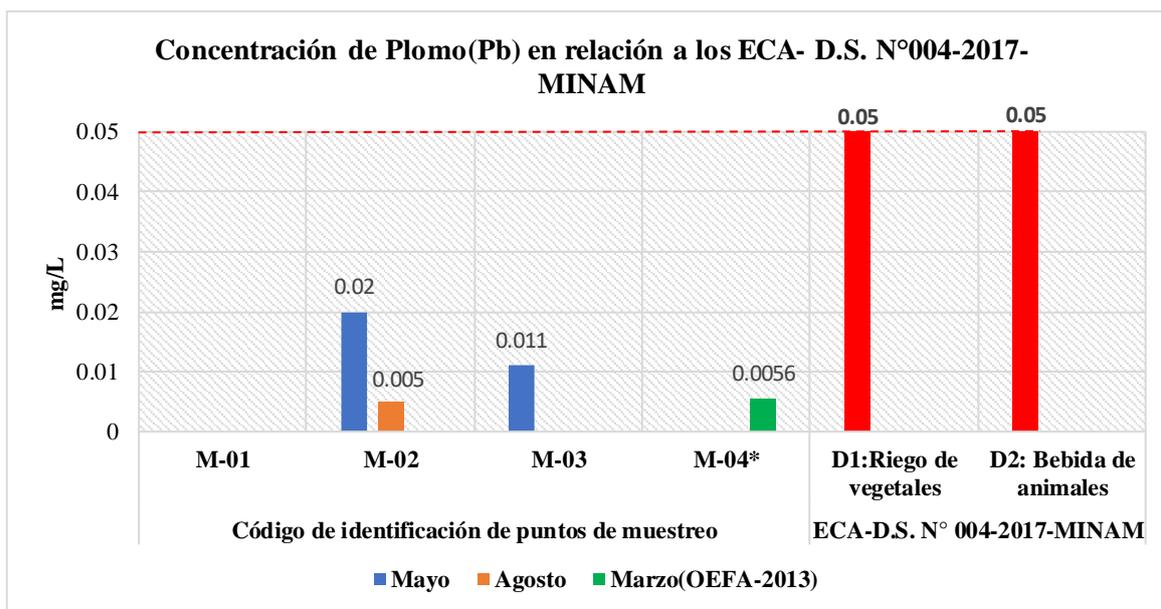


Gráfico 15: Comparación de resultados de Plomo con los ECA del agua-categoría 3

Según el Gráfico 15, las concentraciones de Plomo (Pb) obtenidas en los cuatro puntos de muestreo, no superan los estándares establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM en ambas

subcategorías: D1 (Vegetales de Tallo Bajo y Alto): 0.05 mg/L y D2 (Bebida de Animales): 0.05 mg/L, por lo tanto, estas aguas superficiales no se consideran contaminadas por este metal y son aptas para el riego de vegetales y para la bebida de animales.

En el primer punto de muestreo (M-01) durante los meses de mayo y agosto, no se presentan concentraciones de este metal durante, ya que los valores son menores del LCM que es de 0.004 mg/L. Por otro lado, en el segundo punto de muestreo (M-02), si se presentan concentraciones mínimas de este metal durante los meses de mayo y agosto (0.02 mg/L y 0.005 mg/L respectivamente), mientras que en el tercer punto (M-03), solo se presentan valores de concentraciones durante el mes de mayo de 0.011 mg/L.

Según Ferrer (2003), el plomo es un metal pesado, cuya forma más abundante es el sulfuro (PbS), formando las menas de galena y con frecuencia está asociado a otros metales, como plata, cobre, zinc y antimonio, por lo que a partir de esto, se puede decir que el primer punto de muestreo no presenta concentraciones de cobre ya que no existe un contacto directo con rocas contenidas con minerales de cobre, mientras que en la bocamina Michiquillay (M-02) las aguas que infiltran si se encuentran en contacto directo con minerales de cobre al ser este un pórfido con mineralización de Cu.

Mora (2002), menciona que el plomo es liberado durante la alteración de los minerales y está presente en el suelo, agua y aire y a su vez, es adsorbido por las plantas desde el suelo y así entra en la cadena alimenticia, sin embargo, ya que el plomo es tóxico para la mayoría de las plantas, sus concentraciones en plantas son generalmente bajas y el agua superficial y subterránea tiene bajas concentraciones de Pb, debido a que la mayoría de los componentes del plomo tiene bajas solubilidades. Además, indica que el transporte de metales pesados como el plomo en el agua subterránea, está sujeto a diferentes procesos a través de los cuales pueden ser removidos del agua subterránea, pueden ser adsorbidos por las superficies de los granos minerales del acuífero, adsorbidos por carbón orgánico que podría estar presente en el acuífero, sufrir precipitación química y participar en reacciones de oxidación-reducción. Como resultado de estos procesos de adsorción, algunos solutos se moverán mucho más despacio a través del acuífero, que el agua subterránea que los transporta; ocurriendo una retardación del soluto, esto es debido a que se lleva a cabo una distribución de los componentes traza entre soluciones y sólidos. Todo esto explicaría las bajas o nulas concentraciones de este metal en los puntos de muestreo.

4.1.2.16 Selenio (Se)

Las concentraciones de Se obtenidas, comparadas con los ECA del agua-categoría 3 según lo dispuesto por el MINAM (2017), se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27: Resultados de la concentración de Selenio

Época	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo			LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03		D1	D2
Lluvia	Se total	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	0.007	0.02	0.05
Estiaje	Se total	mg/L	<LCM	<LCM	<LCM	0.007	0.02	0.05

En el Gráfico 16 se representan los resultados que se muestran en la Tabla 27 con el fin de tener una mejor comprensión de los datos obtenidos.

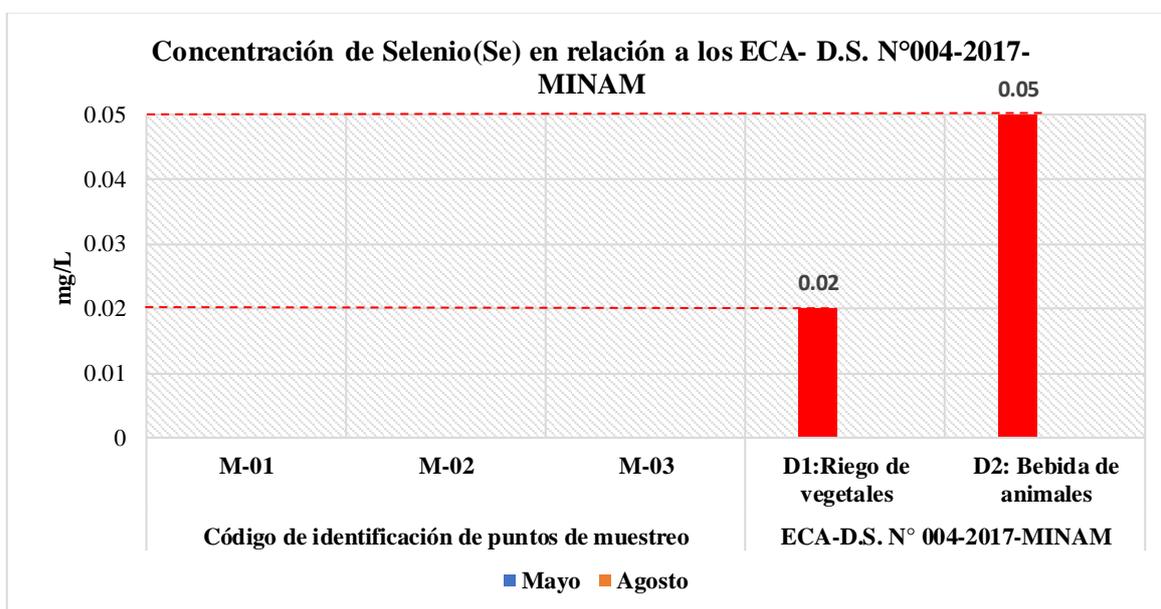


Gráfico 16: Comparación de resultados de Selenio con los ECA del agua-categoría 3

Según el Gráfico 16, durante los meses de mayo y agosto no se obtuvieron concentraciones de Se en ningunos de los puntos de muestreo, lo que indica que los valores de concentración de este metal pesado fueron menores al LCM de 0.007 mg/L.

Los valores de concentración nulos del Selenio podrían explicarse a partir de lo que menciona ATSDR (2008), que algunos compuestos de selenio se disolverán en el agua y algunos se depositarán en el fondo en forma de partículas, siendo las formas de selenio insolubles las que permanecerán en el suelo, pero las formas solubles serán más móviles y podrían entrar al agua superficial desde el suelo. Además de esto, Lenntech (2024) menciona que bajos niveles de selenio pueden terminar en suelos o agua a través de la erosión de las rocas. Este será tomado por las plantas o acabará en el aire cuando es absorbido en finas partículas de polvo. Cuando el selenio en los suelos no reacciona con el oxígeno permanece bastante inmóvil y representa menor riesgo para los organismos. Todo esto hace concluir que en la zona de estudio existen mínimas cantidades de Se inmóvil que durante su recorrido o infiltración se asientan en el fondo o son absorbidas por la vegetación característica de la zona.

4.1.2.17 Zinc (Zn)

Los resultados obtenidos para este metal pesado se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28: Resultados de la concentración de Zinc

Época	Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Código de identificación de puntos de muestreo				LCM	ECA-D.S. N° 004-2017-MINAM	
			M-01	M-02	M-03	M-04*		D1	D2
			Mayo	Zn total	mg/L	0.02		0.048	0.041
Agosto	Zn total	mg/L	0.046	0.038	0.056	-	0.018	2	24
Marzo (OEFA-2013)	Zn total	mg/L	-	-	-	0.0886	0.018	2	24

Los resultados de las concentraciones de Zinc comparados con los ECA del agua-categoría 3 establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM se representan en el Gráfico 17.

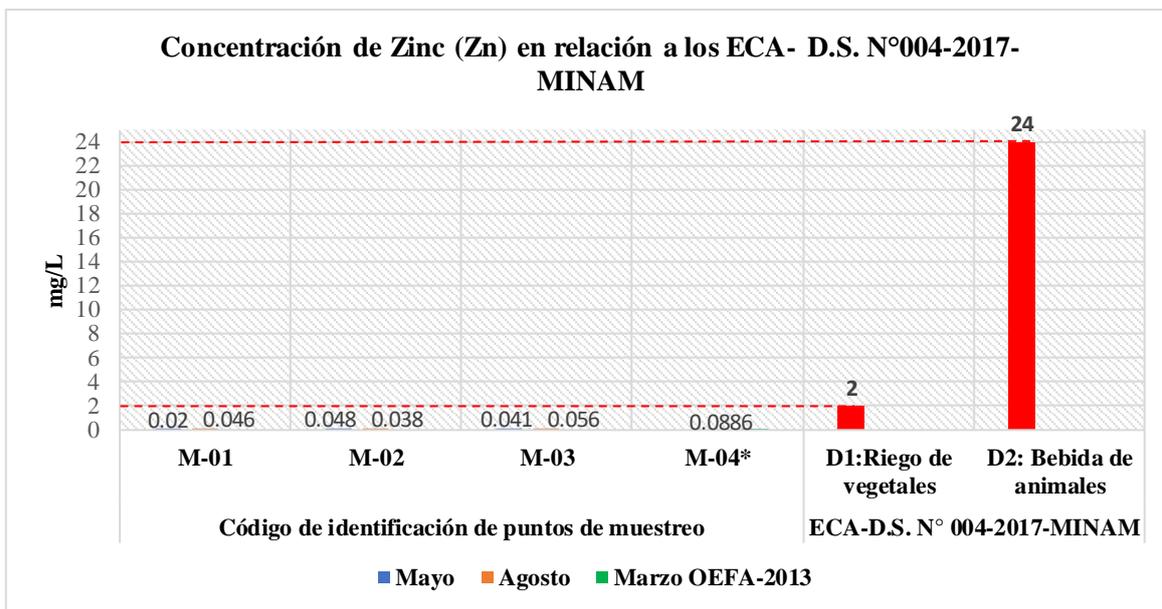


Gráfico 17: Comparación de resultados de Zinc con los ECA del agua-categoría 3

Las concentraciones de Zn, obtenidas en los cuatro puntos de muestreo, tal como se muestra en la Tabla 28 y Gráfico 17, indican valores menores a los ECA del agua de la categoría 3 establecidos en el D.S N° 004-2017-MINAM, para las subcategorías D1(Riego de vegetales):2 mg/L y D2(Bebida de animales): 24 mg/L, por lo que estas aguas se consideran libres de contaminación por este metal y son aptas para el riego de vegetales y bebida de animales.

Los valores de las concentraciones de Zn en el punto M-04* y en los tres puntos de muestreo(M-01, M-02 y M-03) en ambas épocas son bajos, cuya explicación se fundamenta en lo que indica ATSDR (2008), que el zinc es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre, por lo que se lo encuentra en el aire, el suelo y el agua y dependiendo del tipo de suelo, algunos compuestos de zinc pueden movilizarse al agua subterránea y a lagos, arroyos y ríos, pero la mayor parte del zinc en el suelo permanece adherido a partículas de suelo y no se disuelve en agua. Por otro lado, Choque (2020), menciona que la solubilidad del Zinc en el agua, depende de la temperatura y del pH del agua, es decir cuando el pH es casi neutro, el Zinc es insoluble en el agua, mientras que la solubilidad del zinc en el agua aumenta con la acidez y pH superiores a 11 y esto se confirma ya que el pH medido en los tres puntos de muestreo va de 5 a 6.

4.2 RESULTADOS GEOAMBIENTALES

4.2.1 Identificación de pasivos ambientales

En la presente investigación se han identificado a los Pasivos Ambientales Mineros existentes en la zona, producto de las actividades mineras remotas que se han venido ejecutando en Michiquillay. Es así que, a continuación, se mencionan y describen los principales pasivos ambientales mineros observados, a fin de conocer su estado actual y de esta manera poder analizar su relación directa con los resultados de los valores de las concentraciones de los metales pesados obtenidos en cada uno de los puntos muestreados y su influencia geológica y ambiental (Ver Figura 8).

4.2.1.1 Planta Piloto

Este pasivo ambiental minero se encuentra ubicado en Michiquillay Alto a unos 600 m de la bocamina principal “El Túnel” en el margen derecho del río Michiquillay. Actualmente se observan vestigios de bases de concreto de los molinos de bolas y de remolienda, celdas de flotación y espesadores. A este pasivo ambiental minero se lo conoce como planta piloto ya que por el tamaño se intuye que fue una planta a pequeña escala operada con la finalidad de evaluar si un proceso de recuperación de mineral es técnica y económicamente viable. El área mínima que ocupa es de 0.0081 km², abarcando un 0.30% del área total de la zona de investigación.

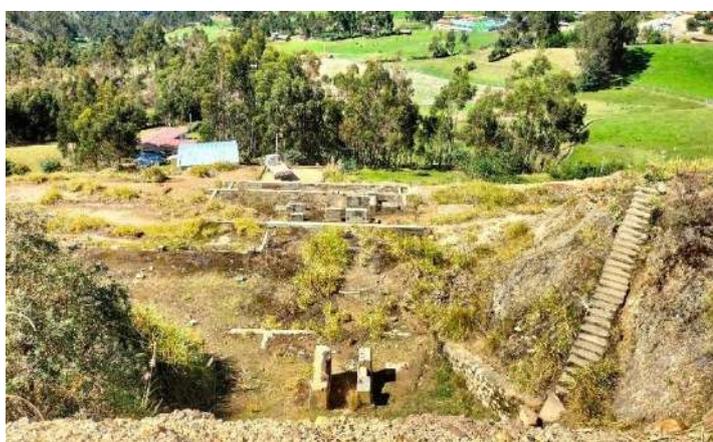


Foto 38: Vestigios de la Planta Piloto ubicada en Michiquillay Alto. Coordenadas: E:795091; N:9220918; Cota: 3486 m.s.n.m.

4.2.1.2 Depósito de relaves

Este pasivo ambiental minero se encuentra ubicado en Michiquillay Alto, en el margen derecho del río Michiquillay, a unos 150 m. al sur de la Planta Piloto. Actualmente se observa cubierto con material de top soil del lugar (tierra, materia orgánica y especies vegetales de la zona), evidenciándose que ha sido revegetado debido a que la vegetación no guarda relación con el entorno por la coloración, asimismo, a su alrededor se observan canales de coronación, construidos con el fin de manejar el agua de escorrentía superficial, tal como se observa en la Foto 39. Este pasivo ocupa alrededor del 0.31% del total del área de estudio.



Foto 39: Depósito de relaves revegetado, ubicado en Michiquillay Alto, al margen derecho del río Michiquillay. Coordenadas: E:794979; N:9220731; Cota: 3439 m.s.n.m.

4.2.1.3 Bocamina principal “El Túnel”

Este pasivo ambiental minero es una bocamina con galería de aproximadamente 3 km. Se encuentra ubicada en Michiquillay Alto, en el margen izquierdo del río Michiquillay. Actualmente se observa un drenaje ácido de mina (DAM) que sale de su interior, lixiviando a la roca in situ, compuesta por minerales de cobre como la calcantita y la pirita, además de óxidos de hierro como la hematita y jarosita, tal como se muestra en la Foto 40.



Foto 40: Bocamina principal “El Túnel” con el drenaje ácido de mina que efluye de su interior. Coordenadas: E:795623; N:9220971; Cota: 3500 m.s.n.m.

Asimismo, se ha podido observar que al drenaje que sale del interior del pasivo se le realiza la sedimentación de sólidos en una poza de sedimentación, ubicada en lado izquierdo saliendo de la bocamina, que luego es conducido a través de un canal de tierra para su posterior descarga al río Michiquillay, tal como se muestra en la Foto 41.



Foto 41: Poza de sedimentación del drenaje que efluye de la bocamina principal. Coordenadas: E:795628; N:9220952; Cota: 3500 m.s.n.m.

4.2.1.4 Depósito de desmonte-bocamina

Este pasivo ambiental minero se encuentra ubicado adyacente a la bocamina principal “El Túnel”, en el margen izquierdo del río Michiquillay. Actualmente se visualiza que el material de desmonte se encuentra compactado en bancos de 8 m. a 10 m., con un ángulo de inclinación aproximado de 75°. Al pie de este se observan cunetas en su perímetro, diseñado para conducir el flujo del agua. Este pasivo se encuentra ocupando el 0.18 % del área total de la zona de estudio.



Foto 42: Depósito de desmonte adyacente a la bocamina Michiquillay ubicado en Michiquillay Alto. Coordenadas: E:795620; N:9221004; Cota: 3500 m.s.n.m.

4.2.1.5 Ex campamento minero

Este pasivo ambiental se encuentra ubicado en Michiquillay Alto, en el cual, actualmente aún se observan restos de estructuras antiguas y a su vez la construcción de una infraestructura reciente utilizada para reuniones de la comunidad u otras actividades. Este ocupa un 0.37% del total del área de estudio.



Figura 7: Ex Campamento minero ubicado en Michiquillay Alto. Coordenadas: E:794659; N:9220710; Cota: 3447 m.s.n.m.

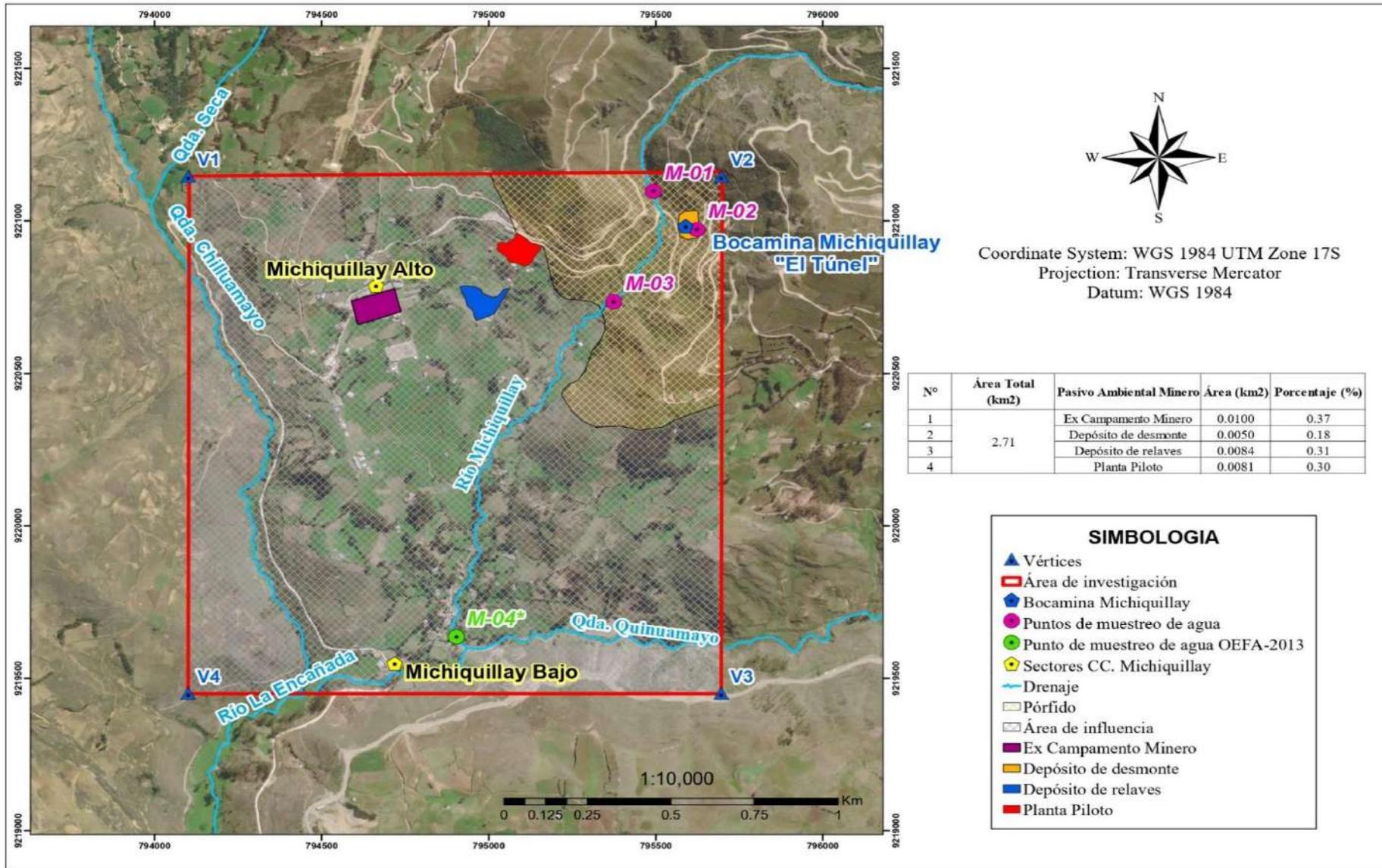


Figura 8: Delimitación y ubicación de los Pasivos Ambientales Mineros

4.3 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El desarrollo de la presente investigación se basó en la toma de 6 muestras de agua en 3 puntos de monitoreo (M-01, M-02 y M-03) ubicados en el sector de Michiquillay Alto, lugar donde se encuentra la bocamina Michiquillay “El Túnel”, tanto en época de lluvia como de estiaje, correspondientes a los meses de mayo y agosto respectivamente. Se evaluaron las concentraciones de los metales pesados comparándolos con los ECA del agua según la categoría 3 establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM y a su vez se incluyó la información de un punto de muestreo M-04* en Michiquillay Bajo, obtenida de un informe previo realizado por la OEFA en el 2013, y esto debido a la poca influencia de la mineralización del pórfido en este sector que se presencié en campo.

Según los resultados obtenidos de la concentración de metales pesados en los puntos de muestreo M-01, M-02, M-03 y la información obtenida del punto M-04*, estos cumplen con los valores establecidos según los ECA del agua en las subcategorías D1: riego de vegetales y D2: bebida de animales, a excepción de los metales de Cu cuyos valores exceden en el punto M-02 y M-03, y Fe en el punto M-02.

En el punto M-02 en época de lluvia el valor para el Cu es de 1.148 mg/L y en estiaje es de 0.416 mg/L, lo que indica que el agua de este punto no es apta ni para consumo de animales ni riego de vegetales, y esto debido a que es el agua que se infiltra y sale directamente de la bocamina Michiquillay tiene una exposición directa a los minerales de Cu del pórfido, como la calcantita, y sulfuros como la calcopirita, mientras que, en el punto M-03, en épocas de lluvia y estiaje, el Cu muestra valores de 0.558 mg/L y 0.919 mg/L respectivamente, concordando con los resultados obtenidos por Guevara y Marín (2020), quienes determinaron que en este punto el Cu se encuentra excediendo el valor de los ECA para agua.

Por otro lado, el Fe excedió a los ECA del agua en el punto de muestreo M-02, obteniendo valores de 15.87 mg/L y 9.828 mg/L en épocas de lluvia y estiaje respectivamente, esto dado que el agua analizada en este punto corresponde a la que efluye de la bocamina Michiquillay, la cual tal como se mencionó anteriormente se encuentra en contacto directo con la zona oxidada y lixiviada con minerales de hierro como la hematita y jarosita y sulfuros de hierro como la pirita y calcopirita.

Es importante resaltar que esto estaría representando un problema medioambiental, por lo que resulta relevante establecer las posibles causas que estarían originando estas elevadas concentraciones. En primer lugar, según lo refieren Herrera et al. (2012), la llegada del cobre a medios acuáticos están ligados a usos diversos en la agricultura e industria, por lo que de aquí se deduce que estos altos valores se estarían originando del pasivo ambiental que representa la bocamina Michiquillay con minerales de cobre expuestos en la superficie, pero a esto se estarían sumando, según lo observado en el área de investigación, la lixiviación de los minerales de cobre y asociaciones mineralógicas características de la zona, ya que esta agua desemboca por una pendiente con gran inclinación y abundante vegetación, recorriendo las zonas de mineralización del depósito mineral, además de esto la vegetación y las áreas de cultivo cercanas a este punto, también estarían influyendo según lo referido por los autores mencionados.

En cada uno de los resultados analizados por cada metal, considerados como tóxicos por los ECA del agua según la categoría 3, se han observado variaciones de los valores en los puntos de muestreo en relación a las épocas en que se tomaron las muestras, ya que en algunos de ellos se presentan valores mayores en épocas de lluvia y menores en estiaje, mientras que en otros los valores en estiaje son mayores que en los de lluvia, lo que estaría contradiciendo a lo dispuesto por estos autores. Todo esto concuerda con lo que menciona Sandoval y Vallejo (2020), quienes asocian las altas velocidades de flujo en el sistema con reducciones en el desprendimiento y concentraciones. Este efecto puede estar relacionado con el tiempo de retención, ya que, al tener mayores velocidades dentro del sistema, el tiempo de retención se reduce y por lo tanto el desprendimiento de metales en el agua disminuye. Sin embargo, este autor menciona que otro número de autores también relacionan los incrementos de velocidad con aumentos en concentraciones de metales, es decir, con un mayor desprendimiento y así mismo sugieren que a bajos flujos se presentan menores niveles de metales. De esta manera, concluyen que, los efectos de condiciones como la velocidad de flujo, caudal y régimen hidráulico son variables y dependientes de mecanismos químicos y biológicos que también promueven el desprendimiento de metales pesados.

Según lo referido por Aguirre et al. (2021), la presencia de metales en ecosistemas acuáticos se debe a factores naturales como la geología y las características fisicoquímicas del medio, así como a actividades humanas. Metales como Pb, Cd, Cr, Cu, Zn y Ni se acumulan en el suelo, pero pueden reducirse y ser absorbidos por plantas o transportados al agua. Allí se

adhieren a sedimentos y materia orgánica, pero cambios ambientales como pH, potencial redox, salinidad, carbonatos y temperatura pueden liberarlos y hacerlos biodisponibles. La toxicidad de los metales depende de su concentración, movilidad y las interacciones con otros factores del entorno. Por otra parte, Alfaro (2021), menciona que los metales llegan a las cuencas y fuentes de aguas naturales a través de la disolución de las rocas y depósitos naturales en el suelo y minerales provenientes de afluentes industriales y por deposición atmosférica, lo que explicaría las concentraciones nulas, mínimas y altas que presentan algunos de los metales analizados.

Según la información obtenida de la OEFA (2013), el punto M-04* no presenta concentraciones que sobrepasen a los ECA del agua, esto debido a que en la parte que corresponde a Michiquillay Bajo, no se observa la presencia de macizos rocosos con mineralización característica del pórfido, ya que la mayor parte se encuentra cubierto por depósitos cuaternarios de tipo aluvial y coluvial, además de esto, en ciertos tramos por donde fluye el río, se ha evidenciado la presencia de rocas calcáreas como las calizas de la Formación Chúlec (Ver Anexo II-Plano N° 06), las cuales, al ser una fuente de calcio y carbonato de calcio pueden neutralizar algunos metales pesados. A todo esto, se suman las pendientes relativamente planas y poco inclinadas en este punto (Ver Anexo II-Plano N° 05), ya que según lo explican Villanueva et al. (2023), a medida que va transcurriendo el flujo de agua aguas abajo (pendiente suave), tiende a disminuir las concentraciones de metales pesados, puesto que, el peso específico de dichos metales es superior al del agua, y, por ende, a medida que van recorriendo las aguas, estos tienden a sedimentarse.

Resulta importante resaltar que el metal mercurio en la presente investigación no se ha analizado puesto que según lo referido por el Laboratorio Regional del Agua en la ciudad de Cajamarca, donde se han analizado las muestras, el Límite de Cuantificación del Método (LCM) para mercurio es de 0.03 mg/L, mientras que los ECA del agua para la categoría 3 en las subcategorías D1 y D2 establecen valores de 0.001 mg/L y 0.01 mg/L respectivamente, los cuales están bajo el LCM del laboratorio mencionado, por lo tanto este no ha emitido valores en los reportes dado que estaría dando valores poco confiables en relación a este metal.

Según lo analizado y observado en la zona de investigación, esta comprende una parte del pórfido Michiquillay del sector NE y en relación a los Pasivos Ambientales Mineros, estos

ocupan un 1.16 % del área total, por lo que también, se ha tratado de cuantificar la incidencia sobre el entorno, determinando que estos no tienen influencia relevante en la zona de investigación, sobre todo en el punto M-04* ubicado en Michiquillay Bajo, y esto se comprueba con los valores de las concentraciones obtenidos ya que estos no sobrepasan a los ECA del agua.

4.4 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Los resultados del análisis de agua en los puntos M-01, M-02, M-03 y M-04*, demuestran que las aguas del DAM de la bocamina Michiquillay “El Túnel” si presentan concentraciones de metales pesados, al igual que las aguas del río Michiquillay, pero en su mayoría las concentraciones son menores a los ECA del agua establecidos según la categoría 3 por el MINAM (2017), a excepción de los metales de Cu(en las aguas del DAM y puntos de confluencia entre el río Michiquillay y el agua que desemboca de la bocamina Michiquillay) y Fe (En el agua del DAM de la bocamina Michiquillay) comprobando de esta manera que la calidad de las aguas superficiales es regular pero que además las altas concentraciones de Cu en el punto M-02 se deben a la gran cantidad de minerales de cobre y hierro expuestos en superficie, mientras que el exceso de Cu en el M-03(punto de confluencia) estaría ligado al pasivo ambiental minero pero a esto, estaría sumándose la litología y geomorfología de la zona por donde desemboca el agua ya que las rocas en su mayoría se encuentran mineralizadas con Cu y Fe al ser un pórfido de Cu y la pendiente estaría influyendo en la velocidad y energía del agua, a esto se agrega la excesiva vegetación presente y las actividades agrícolas alrededor de este punto de muestreo, lo que estaría también enriqueciendo los niveles de concentración de Cu en este punto.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se analizaron las concentraciones de 17 metales pesados comparándolos con los ECA para agua-categoría 3 establecidos en el D.S N° 004-2017-MINAM, tanto en lluvia como en estiaje, en tres puntos de monitoreo ubicados en Michiquillay Alto: aguas arriba del río Michiquillay(M-01), el DAM de la bocamina “El Túnel” (M-02) y su descarga en el río (M-03), lo que permitió generar información detallada sobre la calidad de las aguas superficiales.

Se incluyó en el análisis un punto referencial M-04* en Michiquillay Bajo, cuya información se obtuvo del Informe de la Evaluación Ambiental de la calidad del agua, en el área de influencia de la Minera Anglo American-Proyecto Michiquillay, realizado por la OEFA en el año 2013, cuyos resultados muestran concentraciones que no sobrepasan los ECA del agua.

El Cu superó a los ECA para agua-categoría 3, en los puntos de muestreo M-02 en época de lluvia: 1.148 mg/L y M-03 en época de lluvia y estiaje: 0.558 mg/L y 0.919 mg/L respectivamente, al igual que el Fe en el punto de muestreo M-02 en época de lluvia y estiaje, presentando valores de 15.87 mg/L y 9.828 mg/L respectivamente, por lo cual se definió a las aguas superficiales analizadas de calidad regular.

La litología y mineralogía características del pórfido, como son los óxidos de Fe y sulfuros de Cu y Fe como la calcopirita y pirita, generan altos niveles de Cu y Fe al lixiviarse y entrar en contacto con el agua, ejerciendo una notable influencia en la composición, distribución espacial y acúmulo de metales pesados, que muestran en general bajas concentraciones.

La geomorfología influye en el caudal, flujo y energía del agua, causando variaciones en las concentraciones de metales entre épocas de lluvia y estiaje, al disolver metales y remover partículas del subsuelo, lo que incrementa su presencia en el agua.

5.2 RECOMENDACIONES

A la Autoridad Nacional del Agua (ANA), involucrarse en la realización periódica de monitoreos de calidad de las aguas superficiales en los sectores de Michiquillay con mayor influencia por las actividades mineras, realizando análisis fisicoquímicos y biológicos de las aguas superficiales que en su mayoría desembocan en el río Michiquillay y de suelos, con el fin de determinar la calidad de las aguas superficiales tanto para consumo humano como para riego de plantas y bebedero de animales.

A la municipalidad de La Encañada y a los representantes de la Comunidad Campesina de Michiquillay, promover que se realicen programas de monitoreo ambiental participativo, a fin de determinar no solo la calidad de las aguas superficiales, sino también la calidad del aire, del ruido y del suelo, especialmente en las zonas de influencia directa con las actividades mineras que se desarrollan en la zona.

A los profesionales investigadores de pregrado y postgrado, continuar con investigaciones similares que proporcionen información rigurosa sobre estado actual de la calidad de las aguas superficiales en Michiquillay, lugar donde actualmente se viene realizando trabajos de exploración por Southern Perú, con el fin de prevenir y mitigar riesgos ambientales y de salud en los pobladores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, C. y Buitrago, J. 2014. Apoyo Técnico en la Elaboración del Mapa Geomorfológico de la plancha 266 Villavicencio, a escala 1:100000 correspondiente a la zona 13, Convenio 261/2014 IDEAM/ UPTC. Sogamoso, Colombia. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Aduvire, O. 2006. Drenaje ácido de mina generación y tratamiento. Madrid, España. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.
- Aguirre, S. et. al. 2021 Concentración de metales pesados y calidad físico-química del agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Magdalena, Colombia. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. Vol. 24
- Alcántara, G. 2011. Geomorfología. Cajamarca, Perú. Gobierno Regional de Cajamarca.
- Alcivar, M. ; Mosquera, J. 2011. Concentración de metales pesados (Cr total, Pb, Cd) en agua superficial y sedimentos en el Estero Salado (Guayaquil). Tesis Blgo. Guayaquil, Ecuador. Universidad de Guayaquil.
- Alfaro, J. 2021. Efecto de metales traza de los ríos afluentes (Ramis, Coata e Ilave) sobre la calidad de agua y sedimento del Lago Titicaca. Tesis Mag. Lima, Perú. Universidad Ricardo Palma.
- Alfonso, M. et. al. 2020. Propuesta de Lineamiento Técnicos de Política de Buenas Practicas para Estandarizar los procesos relacionados con Drenajes Ácidos Mineros (DAM). Lima, Perú. Asesorías Técnicas Geológicas ATG LTDA.
- Amatriain, M. 2000. Efectos del exceso de hierro sobre la salud. Toronto, Canadá. Sociedad Internacional de Medicina Ortomolecular.
- ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). 2008. Resumen de Salud Pública Al, As, Ba, Be, B, Cd, Cu, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Se, Zn. Atlanta, USA. División de Toxicología.
- Baeza, E. 2016. Calidad del Agua. Chile. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

- Barba, A. et al. 2017. Evaluación de las concentraciones de metales pesados en los ríos Auqui y Paria en la región Ancash, Perú. Huaraz, Áncash. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Rev. Investig. Univ. Le Cordon Bleu 4(1).
- Bravo, M. 2019. Entre La fragilidad institucional local y la presencia de la empresa minera el caso de la Comunidad Campesina de Michiquillay. Massachusetts, USA. Clark University.
- Carvajal, J. 2012. Propuesta de Estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Bogotá, Colombia. Servicio Geológico Colombiano.
- Casierra, F. y Poveda, J. 2005. La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (*Fragaria sp. cv. Camarosa*). Tunja, Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Castillo, L. et al. 2021. Pasivos ambientales mineros en el Perú: Resultados de la auditoría de desempeño sobre gobernanza para el manejo integral de los PAM. Lima, Perú. Contraloría General de la República del Perú.
- Cervantes, A. 2011. Caracterización del drenaje ácido y de las rocas asociadas a una mina para evaluar su posible aplicación en un sistema de tratamiento pasivo. Tesis Ing. México, D.F. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chávez, C. 2011. Detección de metales pesados en agua. Tesis Mag. Tonantzintla, Puebla, México. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
- Chávez, A. 2016. Determinación de metales pesados en el agua del manantial La Quintilla y línea de conducción del sistema de agua potable del distrito de Sucre – Celendín. Tesis Ing. Cajamarca, Perú. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Chepillo, J. 2019. Ocurrencia de cobalto y su asociación en la mineralización de hierro en el yacimiento Bronce Sur, distrito Pleito, región de Atacama. Tesis Ing. Santiago de Chile, Chile. Universidad de Chile.
- Choque, N. 2020. Caracterización y aceptabilidad de agua dosificada con magnesio y zinc. Tesis Ing. Puno, Perú. Universidad Nacional del Altiplano.
- Córdova, M. 2017. Calidad del agua en la microcuenca del río Challhuahuacho comparado con los estándares de calidad ambiental para riego y bebedero (ECA 3) en la zona de

- Challhuahuacho, Cotabamba – Apurímac – 2016. Tesis Ing. Cajamarca, Perú. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- Cornell University.2015. Suelos saludables, comunidades saludables Metales en suelos de jardines urbanos. Nueva York, USA.
- Corrales, J. 2019. Evaluación Geoambiental de los deslizamientos generados entre Misquipuquio y Santa Rosa- Huancavelica. Tesis Ing. Arequipa, Perú. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Cruzado, G. 2009. Estudio de Geología. Cajamarca, Perú. Gobierno Regional de Cajamarca.
- Cuentas, M. et al.2019. Evaluación de riesgos de pasivos ambientales mineros en la comunidad de Condoraque – Puno. Puno, Perú. Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental, Universidad Nacional del Altiplano.
- Cuéllar, M. 2018. Cromo: un metal pesado que se puede especiar, entender y del cual se pueden conocer sus efectos en el ambiente. Tesis Doc. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba.
- Davies, R. y Williams, P.2005. The El Galeno and Michiquillay porphyry Cu–Au–Mo deposits: Geological descriptions and comparison of Miocene porphyry systems in the Cajamarca District, Northern Peru. Townsville, Australia. Springer Editorial.
- DF Grupo.2021. Magnesio, el micronutriente olvidado. Disponible en: <https://www.dfgrupo.com/magnesio-el-macronutriente-olvidado/>
- Departamento de Salud y Servicios para Personas Mayores de New Jersey.2005. Hoja informativa sobre sustancias peligrosas-Cobalto. Nueva Jersey, USA.
- DGAAM (Dirección General de Asuntos Ambientales).2009. Guías y Manuales/Normas Técnicas Para Diseño Ambiental-Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas. Lima, Perú. Disponible en: https://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=4&idPublicacion=50
- Dirección General de Desarrollo Minero. 2018.Perfil de mercado del Litio. Chihuahua, México. Gobierno de México.
- Dirección General de Desarrollo Minero. 2020.Perfil de mercado de la Barita. Chihuahua, México. Gobierno de México.

- Dunham, R. 1962. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Textures. American Association of Petroleum Geologists (AAPG).
- ELIKA-Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria.2013. Mercurío. País Vasco, España. Rev. 1.
- Fajardo, L. y Ancco, L. 2019. Caracterización geológica del área de las comunidades campesinas de Michiquillay y La Encañada, y los pasivos ambientales mineros (depósitos de desmonte) ubicados en las márgenes del río Michiquillay, la quebrada Carbón y el sector aeropuerto. Lima, Perú. Ministerio del Ambiente.
- Ferrer, A. 2003.Intoxicación por metales. Zaragoza, España. Unidad de Toxicología Clínica. Hospital Clínico Universitario. ANALES Sis San Navarra Vol. 26.
- Fertilab.2012. Elementos considerados tóxicos para las plantas. Celaya, Guanajuato. México.
- Fertilab.2021. EL Arsénico en las Aguas de Riego. Celaya, Guanajuato, México. Disponible en: <https://www.fertilab.com.mx/blog/236-el-arsenico-en-las-aguas-de-riego/>
- Flores, H. 2016. Evaluación de la concentración de metales pesados en las aguas del río Grande y su relación con la actividad minera. Tesis Mag. Cajamarca, Perú. Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca.
- Gamonal, P.2013. Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos. Lima, Perú. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Garcés, D. 2015. Evaluación del proceso de remoción de arsénico en agua por ferro-oxidación y propuesta de tratamiento de los subproductos generados. Tesis Mag. México, D.F. Universidad Autónoma Metropolitana.
- García, C. et al.2002. Metales pesados y sus implicancias en la calidad del suelo. Madrid, España. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Giordani, C. y Lanzone, G.2020. Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Santa Fe, Argentina. Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Rosario.
- Gola, J. 2017. Estudio Geoambiental de la explotación de materiales para la construcción de la cantera El Pilón, Provincia de Holguín. Tesis Mag. Moa, Cuba. Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Nuñez Jimenez”.

- Gómez, A. 1996. Abanicos Aluviales: Aportación Teórica a sus aspectos más significativos. León, España. Universidad de León.
- González, M. 2016. Captación y movilización de cromo en plantas de maíz (*Zea mays*) en suelo suplementado con nutrientes minerales. Tesis Mag. Morelia Michoacán, México. Programa Institucional de maestría en ciencias biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.
- González, O. et al. 2022. Concentración y método de aplicación de selenio en plántulas de pimiento. Sonora, México. Universidad de Sonora. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud 24(2).
- GreenFacts. 2005. Boro. Disponible en: <https://www.greenfacts.org/es/boro/boro-1.htm>
- GreenFacts. 2015. Cadmium. Disponible en: <https://www.greenfacts.org/es/cadmium/index.htm>
- Guevara, Y. y Marín, M. 2021. Evaluación de la concentración de metales pesados en el río Michiquillay, 2020. Tesis Ing. Cajamarca, Perú. Universidad Privada del Norte.
- Guzmán, G. 2013. Efecto del plomo sobre la imbibición, germinación y crecimiento de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia. Universidad del Valle Sede Pacífico. Disponible en: <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/114/472>
- Heeren, O. 2021. Efecto directo e indirecto del exceso de hierro (Fe) disponible en el suelo sobre el desempeño del cultivo de *Lepidium meyenii* Walp (maca). Tesis Bach. Lima, Perú. Universidad Peruana Cayetano Heredia.
- Hernández, Y. et al. 2019. Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA)-Cuba.
- Herrera, E. 2012. Estudio estratigráfico del cretáceo superior en los alrededores de la ciudad de Cajamarca. Tesis Ing. Cajamarca, Perú. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Herrera, J. et al. 2012. Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. San José, Costa Rica. Universidad Nacional de Costa Rica. Tecnología en Marcha 26(1).

- Hollister, V. y Sirvas, E. 1974. The Michiquillay Porphyry Copper Deposit. Vancouver, British Columbia, Canadá.
- Huaraca, J. et al. 2020. Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. Lima, Perú. Universidad Peruana Unión. Información Tecnológica 31(4).
- Huarcaya, R. 2018. Identificar los niveles de concentración de metales pesados presentes en las aguas provenientes de la rampa San Marcelo – CIA de minas Sillustani S.A. Tesis Ing. Puno, Perú. Universidad Nacional del Altiplano.
- INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales). 1998. Microcuenca Encañada Cajamarca. Lima, Perú. Dirección General de Estudios y Proyectos de Recursos Naturales. Ministerio de Agricultura.
- Instituto de la Calidad Ambiental. 2023. ¿Qué son los ECA? Lima, Perú. Disponible en: <https://institutoambiental.pe/que-son-los-eca/#:~:text=Los%20Est%C3%A1ndares%20de%20Calidad%20Ambiental,el%20cuervo%20receptor%20de%20medici%C3%B3n.>
- Intagri (Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura). 2017. El papel del Cobalto en las Leguminosas. México. Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/el-papel-del-cobalto-en-las-leguminosas>
- Izquierdo, J. y Verástegui, S. 2017. Concentración de metales pesados (As, Cd, Cr, Hg y Pb) en el agua de la cuenca baja del río Jequetepeque, en relación a los estándares de calidad del agua - categoría 3, Cajamarca - 2016. Tesis Ing. Cajamarca, Perú. Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo.
- Lenntech. 2024. Propiedades químicas del Berilio - Efectos del Berilio sobre la salud - Efectos ambientales del Berilio. Disponible en: <https://www.lenntech.es/períodica/elementos/be.htm>
- Lenntech. 2024. Propiedades químicas del Cobre - Efectos del Cobre sobre la salud - Efectos ambientales del Cobre. Disponible en: <https://www.lenntech.es/períodica/elementos/cu.htm>

- Lenntech.2024. Propiedades químicas del Cobalto - Efectos del Cobalto sobre la salud - Efectos ambientales del Cobalto. Disponible en: <https://www.lenntech.es/períodica/elementos/co.htm>
- Lenntech.2024. Propiedades químicas del Selenio - Efectos del Selenio sobre la salud - Efectos ambientales del Selenio. Disponible en: <https://www.lenntech.es/períodica/elementos/se.htm>
- Mero, M. et al. 2018. Concentración de Cadmio en agua, sedimentos, *Eichhornia crassipes* Y *Pomacea canaliculata* en el río Guayas (Ecuador) y sus afluentes. Guayaquil, Ecuador. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil. Rev. Int. Contam. Ambie. 35 (3)
- Mesa, D. et al. 2020. Aluminio (Al₂O₃). Bogotá, Colombia. Servicio Geológico Colombiano.
- Mesa, D. et al. 2020. Berilio (Be). Bogotá, Colombia. Servicio Geológico Colombiano.
- Mikkelsen, R. 2010. Soil and Fertilizer Magnesium. Better Crops 94(2).
- MINAM (Ministerio del Ambiente).2017. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias 2017.Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Lima, Perú.
- MINAM. 2019. Estándar de Calidad Ambiental. Disponible en <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/308391-estandar-de-calidad-ambiental>
- Mora, H. 2002. Migración de plomo a través de facies hidroquímicas del agua subterránea. Tesis Doc. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid.
- Moreno, A. et al. 2021.Plan de operaciones de emergencia de la provincia de Cajamarca 2022-2023.Cajamarca, Perú. Municipalidad Provincial de Cajamarca.
- Muñoz, E. et al. 2014.Toxicidad del boro en las plantas. Málaga, España. Universidad de Málaga. Disponible en: <https://www.uma.es/estudios/centros/Ciencias/publicaciones/encuentros/encuentros82/boro.htm>
- Neira et al. 2021.Metales Pesados. Cuenca, Ecuador. Universidad del Azuay. Disponible en: <https://revistas.uazuay.edu.ec/index.php/coloquio/article/view/429>

- OEFA. 2013. Informe de la Evaluación ambiental de la calidad del agua, en el área de influencia de la minera Anglo American-Proyecto Michiquillay.
- Oyarzun, R. y Higuera, P. 2007. Minerales, metales, compuestos químicos y seres vivos: Una difícil pero inevitable convivencia. Corrientes, Argentina. Universidad Nacional del Nordeste.
- Oviedo, E. 2021. Aspectos metalogenéticos y caracterización geoquímica del pórfido de Cu-Au-Mo Michiquillay. Distrito de La Encañada – Provincia Cajamarca – Departamento Cajamarca. Tesis Ing. Arequipa, Perú. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.
- Pabón, S. et al. 2020. Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. *Entre Ciencia e Ingeniería* 14(27):9-18.
- Piñero, G. et al. 2017. Litio en sistemas biológicos. Un regulador ubicuo del funcionamiento celular. Buenos Aires, Argentina. CONICET. Instituto de Química y Físicoquímica Biológicas. Universidad de Buenos Aires.
- Poodts, G. 2010. Intoxicación aguda con cobre en bovinos por ingestión de oxiclورو de cobre. Salta, Argentina. Producción Animal de la Universidad Católica de Salta.
- PROINVERSIÓN. 2023. Yacimientos Cupríferos de Michiquillay. Lima, Perú. Disponible en: <https://www.investinperu.pe/es/app/procesos-concluidos/proyecto/8468>
- Pure Water. 2019. Hierro y Manganese. Caldas, Colombia. Disponible en: <https://purewater.com.co/hierro-y-manganese-en-el-agua/>
- Quispe, C. 2015. Caracterización geológica del centro poblado de Combayo distrito de La Encañada. Tesis Mag. Cajamarca, Perú. Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca.
- Quispe, C. 2019. Evaluación de pasivos ambientales mineros en Mesa de Plata río Hualgayoc – Cajamarca. Tesis Doc. Cajamarca, Perú. Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca. Programa de doctorado en ciencias.
- Ravelo, B. 2012. Adsorción de boro del agua. Cataluña, España. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Red Muqui. 2015. Los Pasivos Ambientales Mineros: Diagnóstico y Propuestas. Lima, Perú.

- Robalino, C. y López, R. 2011. Sistemas de Drenajes y Agua de Riego en la Cuenca Alta, Media y Baja del Río Valdivia. Tesis Ing. Guayaquil, Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Roque, J. 2018. Efectos tóxicos del selenio contenido en plantas de garbancillo (*astragalus* sp.), sobre la salud de animales de cría en el departamento de Áncash. Tesis Doc. Huaraz, Áncash. Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
- Roy, S. 1992. Environments and Processes of Manganese Deposition. India. Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Jadavpur. Economic Geology Vol. 87.
- Rumbo Minero Internacional. 2014. Anglo American se retira de proyecto de cobre Michiquillay en Cajamarca -Revista Minera. Consultado nov. 2023. Disponible en: <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/anglo-american-se-retira-de-proyecto-de-cobre-michiquillay-en-cajamarca/>
- Ruiz, G. y Castellanos, A. 2022. Caracterización Geoquímica de Metales Pesados (Cadmio y Plomo) en Rocas de las Formaciones Paja, Simití, Umir y Grupo la Luna: Implicaciones en los Suelos Para Desarrollo Agrícola, Sureste de San Vicente de Chucuri, Santander. Tesis Ing. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander.
- Russi, D. y Martínez, A. 2002. Los Pasivos Ambientales. Quito, Ecuador. Iconos-Revista de Ciencias Sociales, núm. 15. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=50901513>
- Sandoval, C. y Vallejo, T. 2020. Desprendimiento de metales en redes de distribución de agua potable: Revisión Bibliográfica. Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes.
- Sarmiento, A. 2014. Estudio de la contaminación por drenajes ácidos de mina de las aguas superficiales en la cuenca del río Odiel (SO España). Tesis Doc. Huelva, España. Universidad de Huelva.
- Sáenz, C. y Vasquez, N. 2022. Efecto de la descarga de agua del pasivo ambiental minero Condorguachana en el río Michiquillay – La Encañada, 2021. Tesis Ing. Cajamarca, Perú. Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo.

- Servicio Geológico Mexicano. 2017. Geología Ambiental. México, D.F. Disponible en: <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157805/Que-es-la-Geologia-ambiental.pdf>
- Supo, J. 2016. Metodología de la investigación Científica. Lima, Perú.
- Torrellas, R. 2013. La exposición al aluminio y su relación con el ambiente y la salud. Houston, TX, USA. Revista Tecnogestion. Vol. 9
- Vílchez, R. 2005. Eliminación de metales pesados de aguas subterráneas mediante sistemas de lechos sumergidos: Estudio Microbiológicos de las Biopelículas. Tesis Doc. Granada, España. Universidad de Granada.
- Villanueva, G. 2011. Nutrición del Ganado: Selenio. Zapopan, Jalisco, México.
- Villanueva, G. 2015. Nutrición del ganado: Magnesio. Mazatlán, Sinaloa, México. BM Editores.
- Villanueva, T. et al. 2023. Evaluación de la concentración de metales pesados en las aguas superficiales del Río Chacapalca para fines de riego. Puno, Perú. Universidad Nacional del Altiplano de Puno. Rev.Bol.Quim. Vol. 40
- Villegas, O. et al. 2015. Cobre y Níquel, microelementos esenciales en la nutrición vegetal. Guanajuato, México. Universidad de Guanajuato. Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias 2(2).
- Weather Spark. 2023. El clima y el tiempo promedio en todo el año en La Encañada. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/19950/Clima-promedio-en-Enca%C3%B1ada-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Witker, J. 2021. Derecho Minero-Capítulo Quinto: El Litio. Instituto de Investigaciones Jurídicas. Ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zamora, G. y Meza, R. 2022. Formación, prevención e innovación en el tratamiento de drenajes ácidos en operaciones mineras. Oruro, Bolivia y Puno, Perú. Universidad Técnica de Oruro. Universidad Nacional del Altiplano. Revista de Medio Ambiente Minero y Minería 7(1).

ANEXOS

ANEXO I-PUNTOS DE MONITOREO

A. Formatos de muestreo de agua

ANEXO II-PLANOS

Plano N° 01- Plano de Ubicación

Plano N° 02- Plano de Ubicación de los puntos de muestreo

Plano N° 03- Plano Satelital

Plano N° 04- Plano Hidrológico

Plano N° 05- Plano de Unidades Morfogenéticas

Plano N° 06-Plano Geológico Local

ANEXO III-INFORMES DE LABORATORIO

A. Resultados de laboratorio en época de lluvia

B. Resultados de laboratorio en época de estiaje

<p align="center">UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Geológica</p>	<p align="center">N° Estación de muestreo:01</p>
	<p>Código de muestra: M-01</p>
	<p>Localidad: Michiquillay, La Encañada</p>
	<p>Época de muestreo: Lluvia</p>
<p align="center">FICHA DE MUESTREO-ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA</p>	
<p>Tesista-Muestreador</p>	<p>Bach. Alondra Orquidea Rios Quiliche</p>
<p>Ubicación del Punto de muestreo</p>	<p>Parte alta del río Michiquillay, a aprox. 130 m. aguas arriba, pasando la bocamina Michiquillay “El Túnel”</p>
<p>Coordenadas UTM-WGS-84:</p>	<p>E:795493 / N: 9221097 / Cota:3471 m.s.n.m.</p>
<p>Fecha de muestreo:</p>	<p>23/05/2023</p>
<p>Hora de muestreo:</p>	<p>13:00:00</p>
<p>Tipo de ensayo:</p>	<p>Metales Disueltos y Totales por ICP-OES (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Ce, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, K, Li, Na, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, SiO₂, Sn, Sr, Tl, Ti, U, V, Zn)</p>
<p>Laboratorio de análisis:</p>	<p>Laboratorio Regional del Agua-Cajamarca</p>
<p>Descripción General:</p>	<p>La muestra de agua fue tomada durante el mes de mayo, presenciándose un gran caudal del río Michiquillay, producto de las continuas precipitaciones, el cual se encuentra fluyendo con gran velocidad a través de los diferentes tipos de rocas que lo constituyen.</p>
<p>Panel fotográfico:</p>	
	

Fuente: Elaboración propia

<p align="center">UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Geológica</p>	<p align="center">N° Estación de muestreo:01</p>
	<p>Código de muestra: M-01</p>
	<p>Localidad: Michiquillay, La Encañada</p>
	<p>Época de muestreo: Estiaje</p>
<p align="center">FICHA DE MUESTREO-ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA</p>	
<p>Tesista-Muestreador</p>	<p>Bach. Alondra Orquidea Rios Quiliche</p>
<p>Ubicación del Punto de muestreo</p>	<p>Parte alta del río Michiquillay, a aprox. 130 m. aguas arriba, pasando la bocamina Michiquillay “El Túnel”</p>
<p>Coordenadas UTM-WGS-84:</p>	<p>E:795493 /N: 9221097 /Cota:3471 m.s.n.m.</p>
<p>Fecha de muestreo:</p>	<p>16/08/2023</p>
<p>Hora de muestreo:</p>	<p>10:40:00</p>
<p>Tipo de ensayo:</p>	<p>Metales Disueltos y Totales por ICP-OES (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Ce, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, K, Li, Na, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, SiO₂, Sn, Sr, Tl, Ti, U, V, Zn)</p>
<p>Laboratorio de análisis:</p>	<p>Laboratorio Regional del Agua-Cajamarca</p>
<p>Descripción General:</p>	<p>La muestra de agua fue tomada durante el mes de agosto, presenciándose un leve flujo con baja velocidad de las aguas del río Michiquillay, donde se observa que el agua tiene mayor contacto con los sedimentos depositados en el fondo.</p>
<p>Panel fotográfico:</p>	
	

Fuente: Elaboración propia

<p align="center">UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Geológica</p>	<p align="center">N° Estación de muestreo:02</p>
	<p>Código de muestra: M-02</p>
	<p>Localidad: Michiquillay, La Encañada</p>
	<p>Época de muestreo: Lluvia</p>
<p align="center">FICHA DE MUESTREO-ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA</p>	
<p>Tesista-Muestreador</p>	<p>Bach. Alondra Orquidea Rios Quiliche</p>
<p>Ubicación del Punto de muestreo</p>	<p>Aguas del DAM de la bocamina Michiquillay “El Túnel”</p>
<p>Coordenadas UTM-WGS-84:</p>	<p>E:795623 / N: 9220971 / Cota:3500 m.s.n.m.</p>
<p>Fecha de muestreo:</p>	<p>23/05/2023</p>
<p>Hora de muestreo:</p>	<p>13:47:00</p>
<p>Tipo de ensayo:</p>	<p>Metales Disueltos y Totales por ICP-OES (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Ce, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, K, Li, Na, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, SiO₂, Sn, Sr, Tl, Ti, U, V, Zn)</p>
<p>Laboratorio de análisis:</p>	<p>Laboratorio Regional del Agua-Cajamarca</p>
<p>Descripción General:</p>	<p>La muestra de agua fue tomada en el efluente que sale de la bocamina producto del agua que se infiltra por las rocas con minerales de Cu como la calcantita y abundancia de óxidos de Fe, presenciándose un aumento en la corriente del agua.</p>
<p>Panel fotográfico:</p>	
	

Fuente: Elaboración propia

<p align="center">UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Geológica</p>	<p align="center">N° Estación de muestreo:02</p>
	<p>Código de muestra: M-02</p>
	<p>Localidad: Michiquillay, La Encañada</p>
	<p>Época de muestreo: Estiaje</p>
<p align="center">FICHA DE MUESTREO-ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA</p>	
<p>Tesista-Muestreador</p>	<p>Bach. Alondra Orquidea Rios Quiliche</p>
<p>Ubicación del Punto de muestreo</p>	<p>Aguas del DAM de la bocamina Michiquillay “El Túnel”</p>
<p>Coordenadas UTM-WGS84:</p>	<p>E:795623 / N: 9220971 / Cota:3500 m.s.n.m.</p>
<p>Fecha de muestreo:</p>	<p>16/08/2023</p>
<p>Hora de muestreo:</p>	<p>11:14:00</p>
<p>Tipo de ensayo:</p>	<p>Metales Disueltos y Totales por ICP-OES (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Ce, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, K, Li, Na, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, SiO₂, Sn, Sr, Tl, Ti, U, V, Zn)</p>
<p>Laboratorio de análisis:</p>	<p>Laboratorio Regional del Agua-Cajamarca</p>
<p>Descripción General:</p>	<p>La muestra de agua fue tomada en el efluente que sale de la bocamina producto del agua que se infiltra por las rocas, durante el mes de agosto.</p>
<p>Panel fotográfico:</p>	
	

Fuente: Elaboración propia

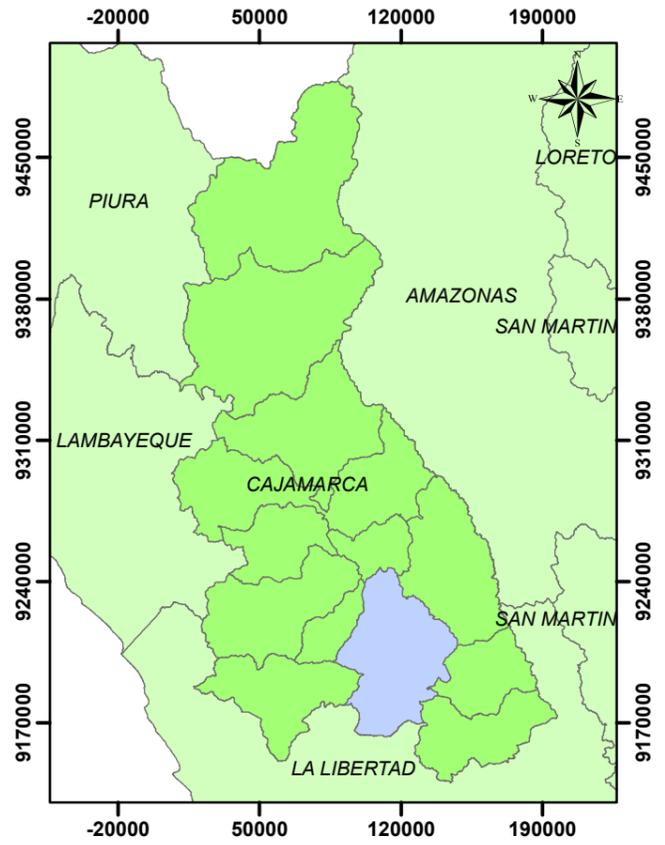
<p align="center">UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Geológica</p>	<p align="center">N° Estación de muestreo:03</p>
	<p>Código de muestra: M-03</p>
	<p>Localidad: Michiquillay, La Encañada</p>
	<p>Época de muestreo: Lluvia</p>
<p align="center">FICHA DE MUESTREO-ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA</p>	
<p>Tesista-Muestreador</p>	<p>Bach. Alondra Orquidea Rios Quiliche</p>
<p>Ubicación del Punto de muestreo</p>	<p>Punto de confluencia del agua del DAM de la bocamina que desemboca al río Michiquillay con las aguas propias de este.</p>
<p>Coordenadas UTM-WGS84:</p>	<p>E:795375 / N: 9220734 / Cota:3450 m.s.n.m.</p>
<p>Fecha de muestreo:</p>	<p>23/05/2023</p>
<p>Hora de muestreo:</p>	<p>14:59:00</p>
<p>Tipo de ensayo:</p>	<p>Metales Disueltos y Totales por ICP-OES (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Ce, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, K, Li, Na, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, SiO₂, Sn, Sr, Tl, Ti, U, V, Zn)</p>
<p>Laboratorio de análisis:</p>	<p>Laboratorio Regional del Agua-Cajamarca</p>
<p>Descripción General:</p>	<p>La muestra de agua fue tomada a aprox. 10 m. del punto de confluencia de las aguas del DAM de la bocamina que desemboca al río Michiquillay por una ladera de gran pendiente y abundante vegetación, con las aguas propias de este.</p>
<p>Panel fotográfico:</p>	
	

Fuente: Elaboración propia

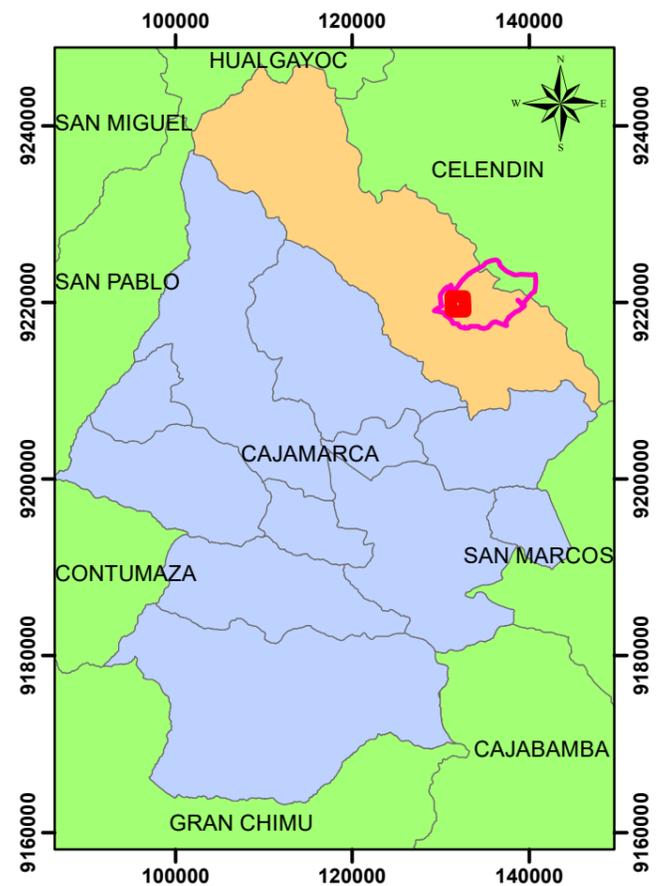
<p align="center">UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Geológica</p>	<p align="center">N° Estación de muestreo:03</p>
	<p>Código de muestra: M-03</p>
	<p>Localidad: Michiquillay, La Encañada</p>
	<p>Época de muestreo: Estiaje</p>
<p align="center">FICHA DE MUESTREO-ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA</p>	
<p>Tesista-Muestreador</p>	<p>Bach. Alondra Orquidea Rios Quiliche</p>
<p>Ubicación del Punto de muestreo</p>	<p>Punto de confluencia del agua del DAM de la bocamina que desemboca al río Michiquillay con las aguas propias de este.</p>
<p>Coordenadas UTM-WGS84:</p>	<p>E:795375 / N: 9220734 / Cota:3450 m.s.n.m.</p>
<p>Fecha de muestreo:</p>	<p>16/08/2023</p>
<p>Hora de muestreo:</p>	<p>12:12:00</p>
<p>Tipo de ensayo:</p>	<p>Metales Disueltos y Totales por ICP-OES (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Ce, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, K, Li, Na, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, SiO₂, Sn, Sr, Tl, Ti, U, V, Zn)</p>
<p>Laboratorio de análisis:</p>	<p>Laboratorio Regional del Agua-Cajamarca</p>
<p>Descripción General:</p>	<p>La muestra de agua fue tomada a unos 10 m. del punto de confluencia de las aguas del DAM de la bocamina que desemboca al río Michiquillay, observándose un flujo menor de sus aguas, debido a la escasez de precipitaciones.</p>
<p>Panel fotográfico:</p>	
	

Fuente: Elaboración propia

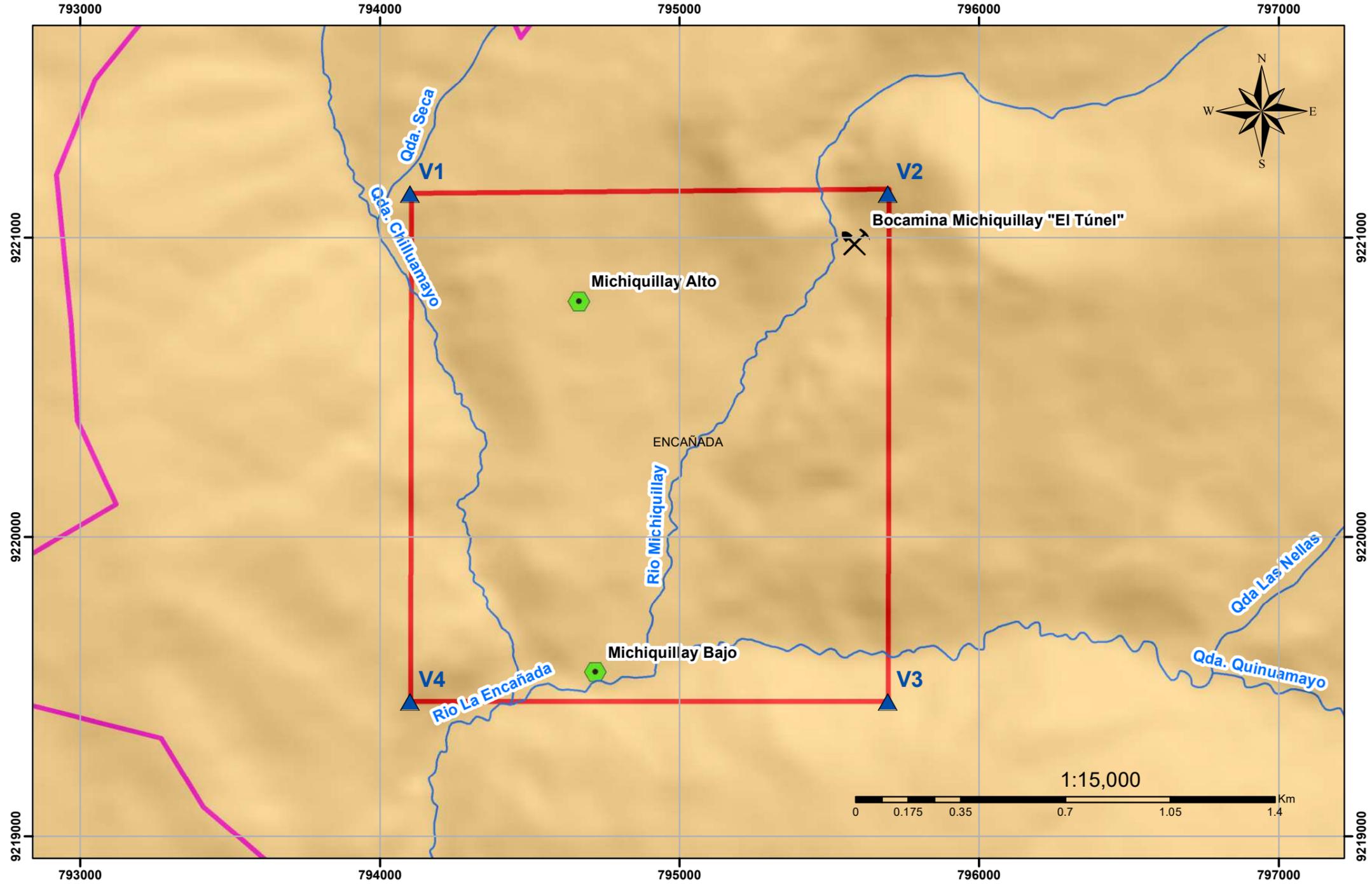
DEPARTAMENTO/PROVINCIA:CAJAMARCA



DISTRITO: ENCAÑADA



ÁREA DE INVESTIGACIÓN

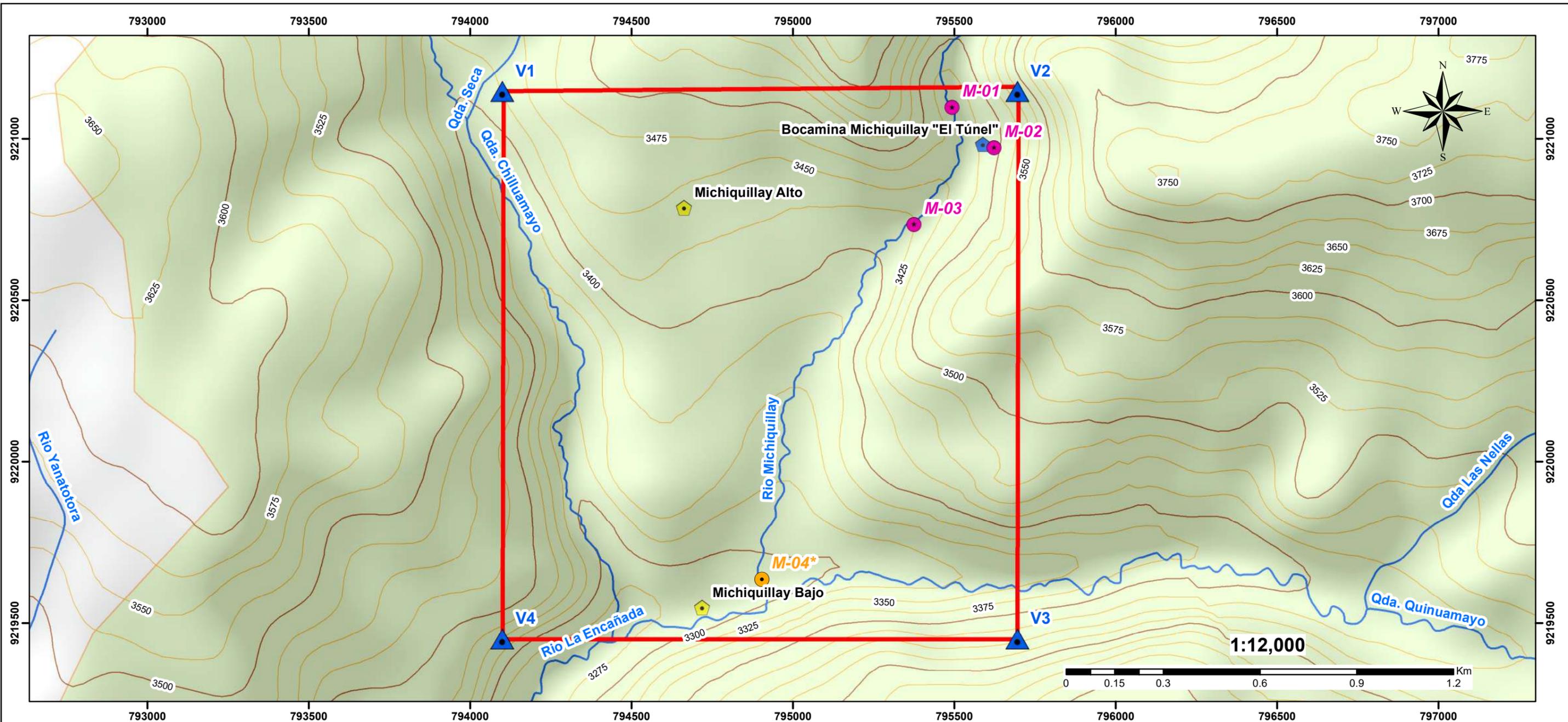


SIMBOLOGIA

- Comunidad Campesina Michiquillay
- Área de investigación
- Vértices
- Bocamina Michiquillay "El Túnel"
- Sectores
- Drenaje
- Distrito de La Encañada
- Provincia de Cajamarca
- Departamento de Cajamarca

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Geológica	
	TESIS: EVALUACION GEAMBIENTAL DEL DAM DE METALES PESADOS ENTRE LOS SECTORES DE MICHQUILLAY ALTO Y BAJO, DISTRITO DE LA ENCAÑADA, 2023.	
	PLANO: UBICACIÓN	ESCALA: 1/15,000
	TESISTA: ALONDRA ORQUIDEA RIOS QUILICHE ASESOR: MCs. Ing. VÍCTOR AUSBERTO ARAPA VILCA DATUM: UTM-WG84 FECHA: DICIEMBRE 2024	
		P-01



Estación de muestreo	Descripción de la ubicación	Coordenadas UTM -WGS-84		
		Este	Norte	Cota (m.s.n.m.)
M-01	Parte alta del río Michiquillay, a 130 m. aguas arriba, pasando la bocamina Michiquillay “El Túnel”	795493	9221097	3471
M-02	Aguas del DAM de la bocamina Michiquillay “El Túnel”	795623	9220971	3500
M-03	A 10 m. del punto de confluencia del agua de descarga de la bocamina al río Michiquillay	795375	9220734	3450
M-04*	Río Michiquillay parte baja, antes de la confluencia con la Qda. Quinuamayo*	794903	9219635	3310

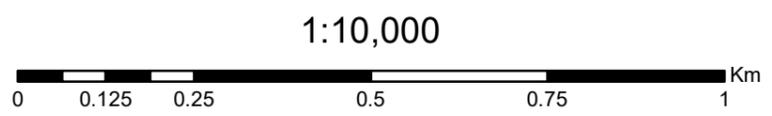
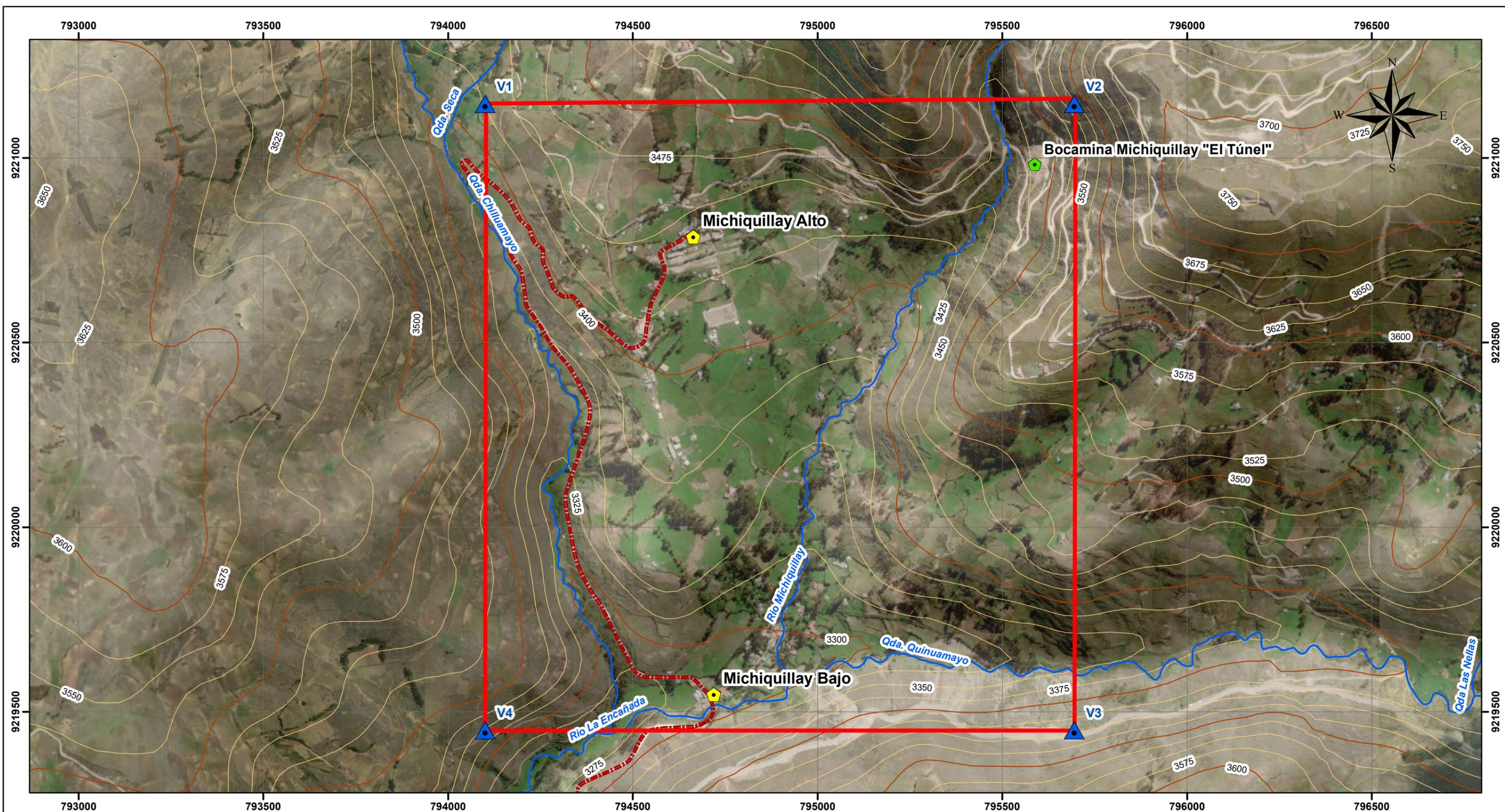
*Punto de muestreo tomado de la OEFA (2013)

SIMBOLOGIA

- Punto de muestreo de agua OEFA-2013
- Puntos de muestreo de agua
- ▲ Bocamina Michiquillay
- Sectores
- ~ Drenaje
- ~ Curvas de Nivel Mayores (100 m)
- ~ Curvas de Nivel Menores (25 m)
- ▲ Vértices
- Área de investigación
- Microcuenca Rio La Encañada

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

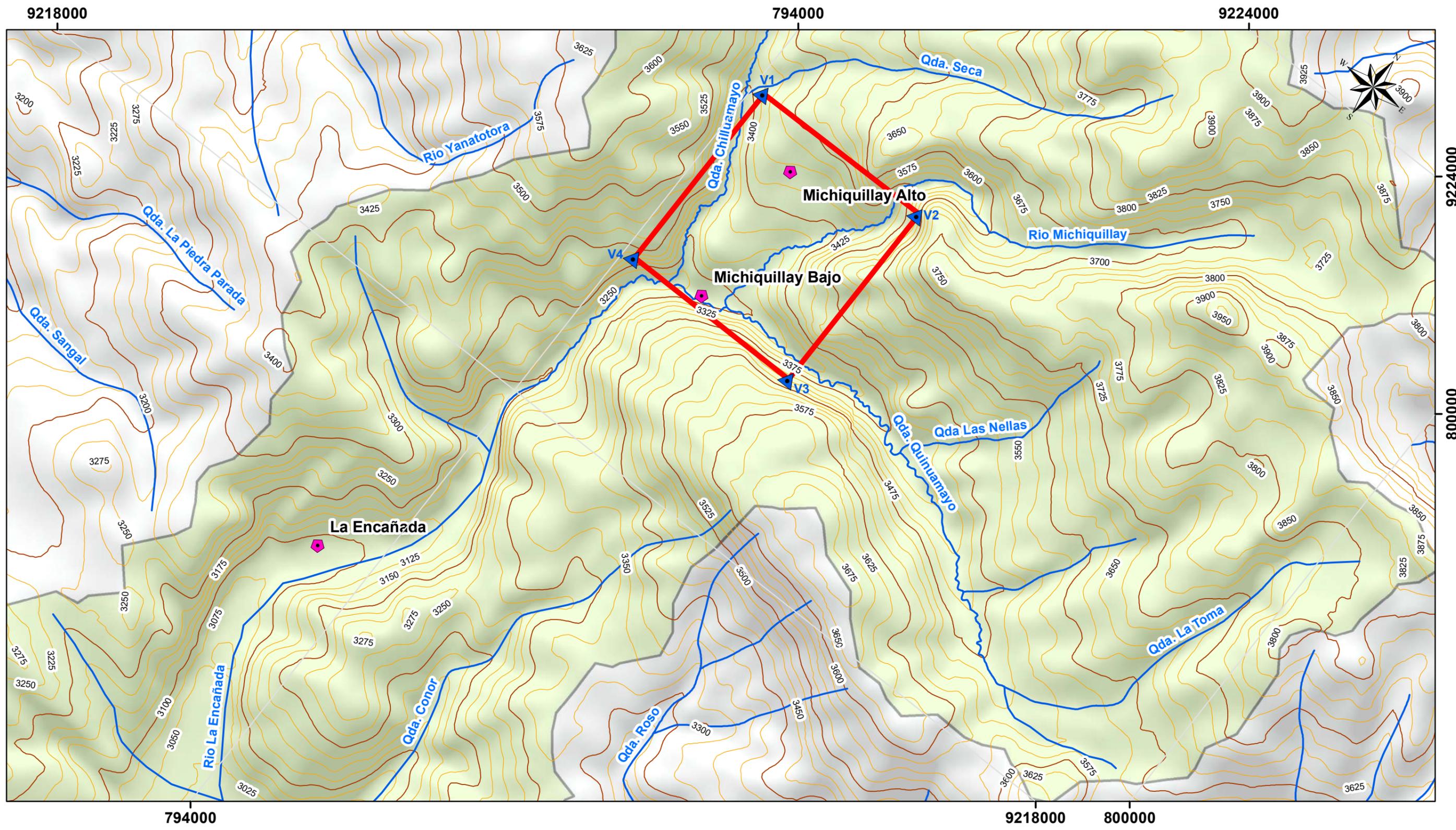
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Facultad de Ingeniería Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica	
	TESIS: EVALUACION GEAMBIENTAL DEL DAM DE METALES PESADOS ENTRE LOS SECTORES DE MICHICUILLAY ALTO Y BAJO, DISTRITO DE LA ENCAÑADA, 2023.	
	PLANO: UBICACIÓN PUNTOS DE MUESTREO	ESCALA: 1/12,000
	TESISTA: ALONDRA ORQUIDEA RIOS QUILICHE	P-02
	ASESOR: MCs. Ing. VÍCTOR AUSBERTO ARAPA VILCA	
DATUM: UTM-WG84	FECHA: DICIEMBRE 2024	



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

SIMBOLOGIA	
	Vértices
	Área de investigación
	Sectores
	Bocamina Michiquillay
	Trocha
	Drenaje
	Curvas de Nivel Mayores (100 m)
	Curvas de Nivel Menores (25 m)

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Geológica	
	TESIS: EVALUACION GEAMBIENTAL DEL DAM DE METALES PESADOS ENTRE LOS SECTORES DE MICHIQUELLAY ALTO Y BAJO, DISTRITO DE LA ENCAÑADA, 2023.	
	PLANO: SATELITAL	ESCALA: 1/10,000
	TESISTA: ALONDRA ORQUIDEA RIOS QUILICHE	
	ASESOR: MCs. Ing. VÍCTOR AUSBERTO ARAPA VILCA	
DATUM: UTM-WG84	FECHA: DICIEMBRE 2024	P-03



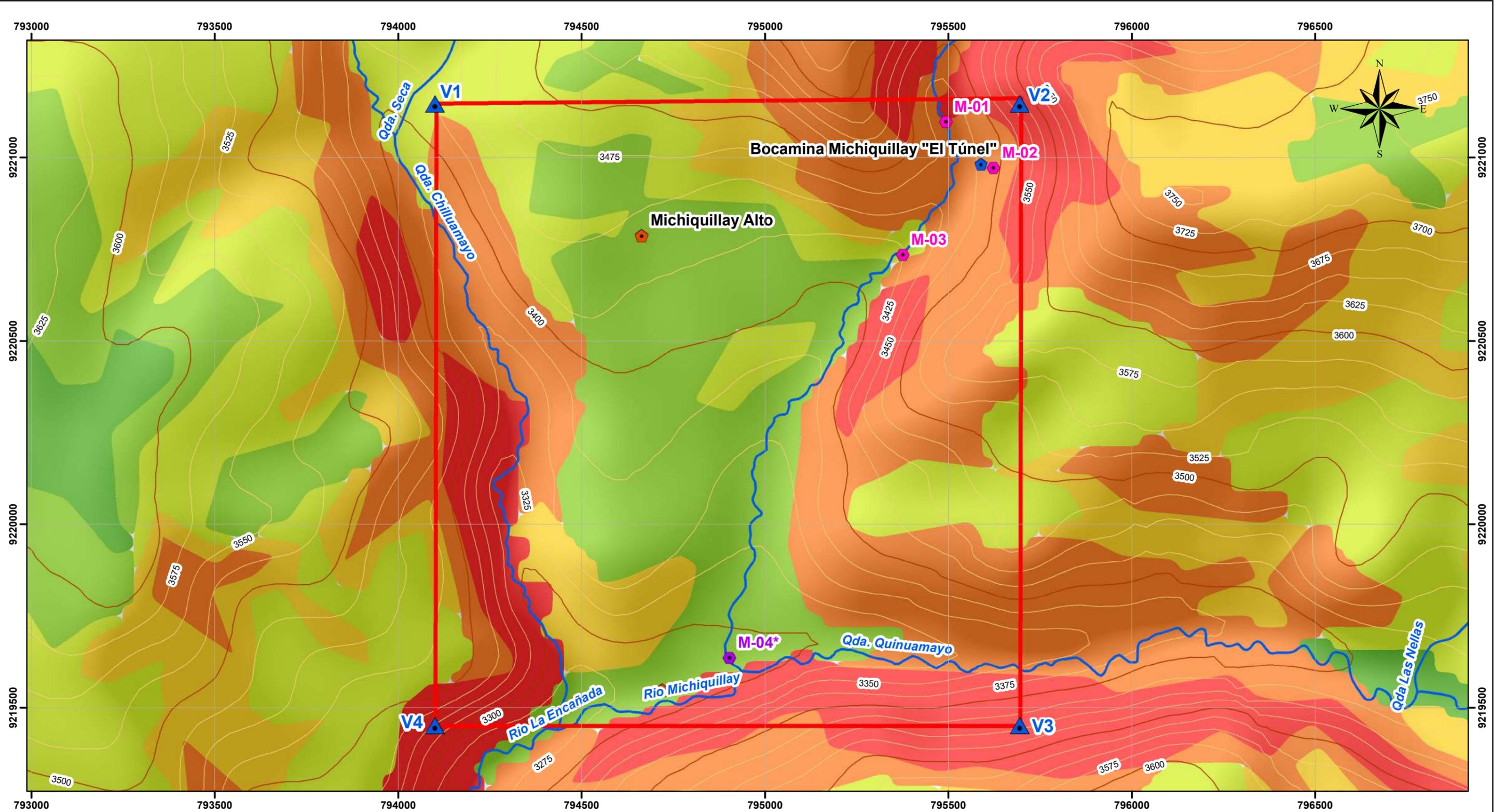
SIMBOLOGIA

	Vertices
	Área de investigación
	Pueblos/Sectores
	Drenaje
	Curvas de Nivel Mayores (100 m)
	Curvas de Nivel Menores (25 m)
	Microcuenca Rio La Encañada



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Geológica	
	TESIS: EVALUACION GEAMBIENTAL DEL DAM DE METALES PESADOS ENTRE LOS SECTORES DE MICHICUILLAY ALTO Y BAJO, DISTRITO DE LA ENCAÑADA, 2023.	
	PLANO: HIDROLÓGICO	ESCALA: 1/30,000
	TESISTA: ALONDRA ORQUIDEA RIOS QUILICHE	P-04
ASESOR: MCs. Ing. VÍCTOR AUSBERTO ARAPA VILCA		
DATUM: UTM-WG84	FECHA: DICIEMBRE 2024	



UNIDADES MORFOGENÉTICAS

- < 5°: Plana
- 6° - 10°: Inclinada
- 11° - 15°: Muy inclinada
- 16° - 20°: Abrupta
- 21° - 30°: Muy abrupta
- 31° - 45°: Escarpada

SIMBOLOGIA

- Vértices
- Área de investigación
- Bocamina Michiquillay
- Sectores
- Puntos de muestreo de agua
- Puntos de muestreo de agua OEFA 2013
- Drenaje
- Curvas de Nivel Mayores (100 m)
- Curvas de Nivel Menores (25 m)

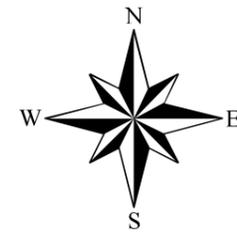
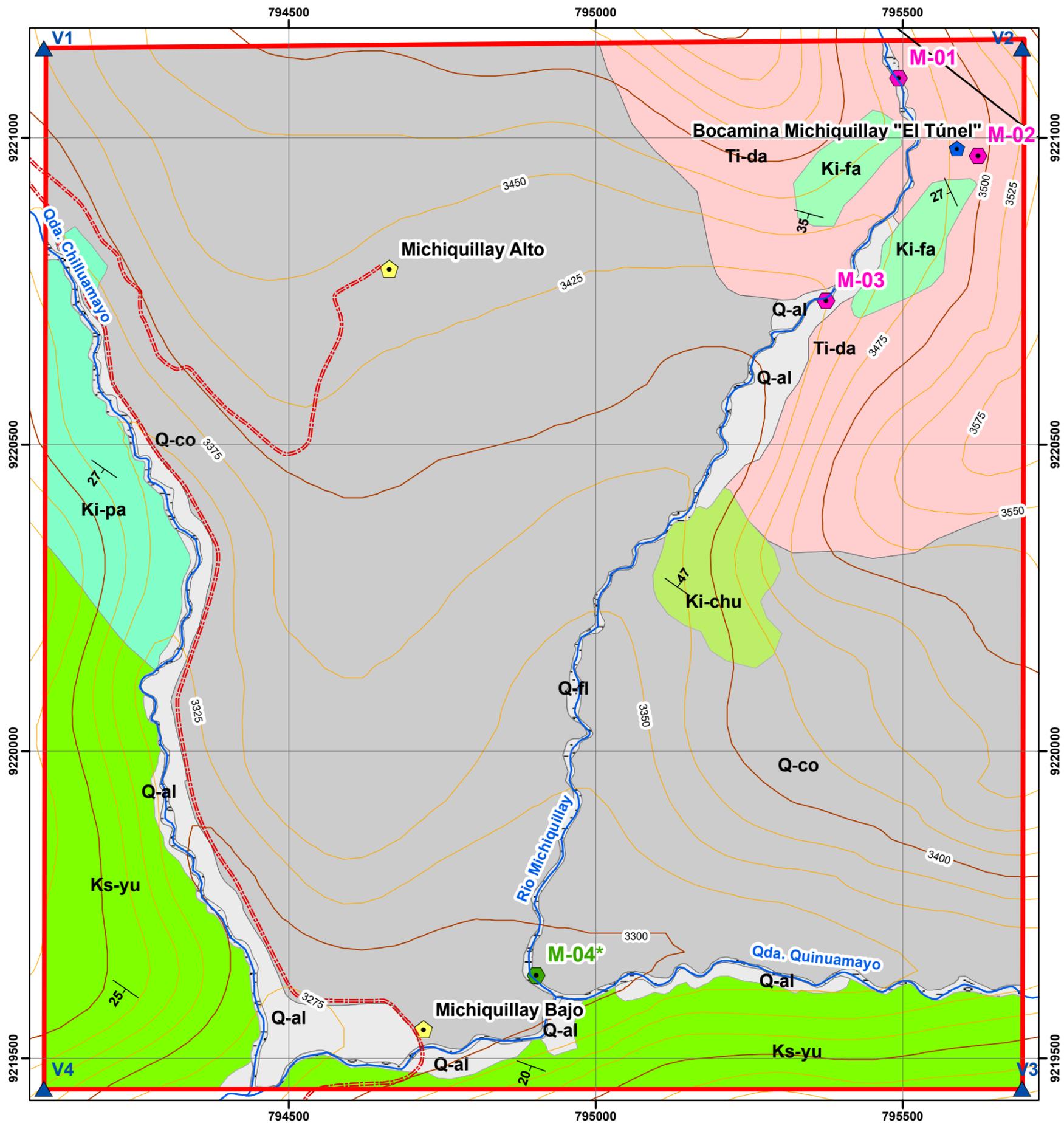
1:10,000



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Geológica	
	TESIS: EVALUACION GEAMBIENTAL DEL DAM DE METALES PESADOS ENTRE LOS SECTORES DE MICHIQUELLAY ALTO Y BAJO, DISTRITO DE LA ENCAÑADA, 2023.	
	PLANO: UNIDADES MORFOGENÉTICAS	ESCALA: 1/10,000
	TESISISTA: ALONDRA ORQUIDEA RIOS QUILICHE	
	ASESOR: MCs. Ing. VÍCTOR AUSBERTO ARAPA VILCA	
DATUM: UTM-WG84	FECHA: DICIEMBRE 2024	

P-05



UNIDADES ESTATIGRÁFICAS

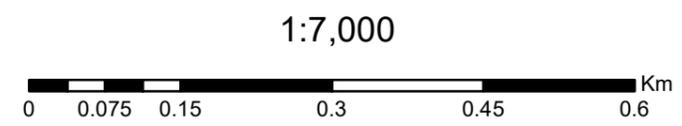
	Depósito Fluvial
	Depósito Aluvial
	Depósito Coluvial
	Pórfido Dacítico
	Formación Yumagual
	Formación Pariatambo
	Formación Farrat
	Formación Chúlec

SIMBOLOGIA

	Vértices
	Área de investigación
	Bocamina Michiquillay
	Sectores
	Punto de muestreo de agua OEFA 2013
	Puntos de muestreo de aguas
	Trocha
	Drenaje
	Curvas de Nivel Mayores (100 m)
	Curvas de Nivel Menores (25 m)

LEYENDA ESTRUCTURAL

	Rb y Bz de estratos
	Falla normal



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Geológica	
	TESIS: EVALUACION GEAMBIENTAL DEL DAM DE METALES PESADOS ENTRE LOS SECTORES DE MICHICUILLAY ALTO Y BAJO, DISTRITO DE LA ENCAÑADA, 2023.	
	PLANO: GEOLÓGICO-LOCAL	ESCALA: 1/7,000
	TESISTA: ALONDRÁ ORQUIDEA RÍOS QUILICHE	
ASESOR: MCs. Ing. VÍCTOR AUSBERTO ARAPA VILCA		P-06
DATUM: UTM-WG84	FECHA: DICIEMBRE 2024	

INFORME DE ENSAYO N° IE 05230334

DATOS DEL CLIENTE

Razon Social/Nombre **ALONDRA ORQUIDEA RIOS QUILICHE**

Dirección -

Persona de contacto **ALONDRA ORQUIDEA RIOS QUILICHE** Correo electrónico alondrariosquiliche.26@gmail.com

DATOS DE LA MUESTRA

Fecha del Muestreo **23.05.23** Hora de Muestreo **16:00 a 16:30**

Responsable de la toma de muestra **Cliente** Plan de muestreo N° -

Procedimiento de Muestreo -

Tipo de Muestreo **Puntual**

Número de puntos de muestreo **03**

Ensayos solicitados **Químicos Instrumentales**

Breve descripción del estado de la muestra **Las muestras cumplen con los requisitos de volumen, preservacion y conservación**

Referencia de la Muestra: **Michiquillay**

DATOS DE CONTROL DEL LABORATORIO

N° Contrato **SC-463** Cadena de Custodia **CC - 0334 - 23**

Fecha y Hora de Recepción **24.05.23 15:14** Inicio de Ensayo **26.05.23 10:15**

Reporte Resultado **05.06.23 15:15**



Firmado digitalmente por NEYRA JAICO
Edder Miguel FAU 20453744168 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 05/06/2023 05:43 p.m.

Edder Neyra Jaico
Responsable de Laboratorio
CIP: 147028

Cajamarca, 05 de Junio de 2023

INFORME DE ENSAYO N° IE 05230334

ENSAYOS			Químicos Instrumentales					
Código de la Muestra			M-01	M-02	M-03	-	-	-
Código Laboratorio			05230334-01	05230334-02	05230334-03	-	-	-
Matriz			Natural	Proceso	Natural	-	-	-
Descripción			Superficial- Río	De Lixiviación	Superficial- Río	-	-	-
Localización de la Muestra			Parte Alta del Río Michiquillay	Tunel Michiquillay	Parte Baja del Río Michiquillay	-	-	-
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados de Metales Totales					
Plata (Ag)	mg/L	0.0190	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Aluminio (Al)	mg/L	0.0230	0.369	1.067	1.308	-	-	-
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Boro (B)	mg/L	0.0260	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Bario (Ba)	mg/L	0.0040	0.013	0.018	0.021	-	-	-
Berilio (Be)	mg/L	0.0030	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Bismuto (Bi)	mg/L	0.0160	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Calcio (Ca)	mg/L	0.1240	3.347	6.085	5.130	-	-	-
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	<LCM	0.002	<LCM	-	-	-
Cerio (Ce)	mg/L	0.0040	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Cobalto (Co)	mg/L	0.0020	<LCM	0.004	<LCM	-	-	-
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Cobre (Cu)	mg/L	0.0180	0.056	1.148	0.558	-	-	-
Hierro (Fe)	mg/L	0.0230	0.719	15.87	2.905	-	-	-
Potasio (K)	mg/L	0.0510	0.381	1.497	0.897	-	-	-
Litio (Li)	mg/L	0.0050	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Magnesio (Mg)	mg/L	0.0190	0.543	2.242	1.064	-	-	-
Manganeso (Mn)	mg/L	0.0030	0.043	0.085	0.070	-	-	-
Molibdeno (Mo)	mg/L	0.0020	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Sodio (Na)	mg/L	0.0260	1.380	2.332	1.777	-	-	-
Niquel (Ni)	mg/L	0.0060	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Fósforo (P)	mg/L	0.0240	<LCM	0.317	0.055	-	-	-
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	<LCM	0.020	0.011	-	-	-
Azufre (S)	mg/L	0.0910	2.767	14.80	6.684	-	-	-
Antimonio (Sb)	mg/L	0.0050	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Selenio (Se)	mg/L	0.0070	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Silicio (Si)	mg/L	0.1040	3.691	8.835	5.611	-	-	-
Estaño (Sn)	mg/L	0.0070	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Estroncio (Sr)	mg/L	0.0030	0.027	0.040	0.034	-	-	-
Titanio (Ti)	mg/L	0.0040	<LCM	<LCM	0.011	-	-	-
Talio (Tl)	mg/L	0.0030	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Uranio (U)	mg/L	0.0040	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Vanadio (V)	mg/L	0.0040	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Zinc (Zn)	mg/L	0.0180	0.020	0.048	0.041	-	-	-
Sílice (SiO2)	mg/L	0.2225	7.895	18.90	12.00	-	-	-

Leyenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)

Cajamarca, 05 de Junio de 2023

INFORME DE ENSAYO N° IE 05230334

Ensayo	Unidad	Método de Ensayo Utilizado
Metales Disueltos y Totales por ICP-OES (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Ce, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, K, Li, Na, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, SiO ₂ , Sn, Sr, Ti, Tl, U, V, Zn)	mg/L	EPA Method 200.7 Rev. 4.4, 1994. (Validado-Modificado) 2020.Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry

NOTAS FINALES

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos y/o matriz que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

(°) Los Resultados son referenciales, no cumplen los requisitos de volumen, tiempo, preservación o conservación estipulado por el método, por lo tanto no se encuentra dentro del alcance de acreditación.

✓ Los resultados indicados en este informe concierne única y exclusivamente a las muestras recibidas y sometidas a ensayo o realizadas en campo por el Laboratorio Regional del Agua . Cuando la toma de muestra lo realiza el cliente los resultados aplican a las muestras como son recibidas.

✓ La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito del Laboratorio Regional del Agua. Este informe no será válido si presenta tachaduras o enmiendas.

✓ Las muestras sobre los que se realicen los ensayos se conservaran en Laboratorio Regional del Agua de acuerdo al tiempo de perecibilidad que indica el método de ensayo y por un tiempo máximo de 10 días luego de la emisión de la informe de ensayo; luego serán eliminadas salvo pedido expreso del cliente.

✓ Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditacion otorgada por INACAL-DA.

✓ Se prohíbe el uso del símbolo de acreditación o la declaración de condición de acreditado emitida en este informe, por parte del cliente.

"Fin del documento"

Código del Formato: P-23-F01 Rev:N°02 Fecha : 03/07/2020

Cajamarca, 05 de Junio de 2023

**LABORATORIO REGIONAL
DEL AGUA**

INFORME DE ENSAYO N° IE 08230912

DATOS DEL CLIENTE

Razon Social/Nombre	ALONDRA ORQUIDEA RIOS QUILICHE		
Dirección	-		
Persona de contacto	ALONDRA ORQUIDEA RIOS QUILICHE	Correo electrónico	alondrariosquiliche.26@gmail.com

DATOS DE LA MUESTRA

Fecha del Muestreo	16.08.23	Hora de Muestreo	10:40 a 12:12
Responsable de la toma de muestra	Cliente	Plan de muestreo N°	-
Procedimiento de Muestreo	-		
Tipo de Muestreo	Puntual		
Número de puntos de muestreo	03		
Ensayos solicitados	Químicos Instrumentales		
Breve descripción del estado de la muestra	Las muestras cumplen con los requisitos de volumen, preservacion y conservación		
Referencia de la Muestra:	Encañada- Cajamarca		

DATOS DE CONTROL DEL LABORATORIO

N° Contrato	SC-1130	Cadena de Custodia	CC - 0912 - 23	
Fecha y Hora de Recepción	16.08.23	16:30	Inicio de Ensayo	24.08.23 10:50
Reporte Resultado	25.08.23	16:10		



Firmado digitalmente por NEYRA JAICO
Edder Miguel FAU 20453744188 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 25/08/2023 04:55 p.m.

Edder Neyra Jaico
Responsable de Laboratorio
CIP: 147028

Cajamarca, 25 de Agosto de 2023

INFORME DE ENSAYO N° IE 08230912

ENSAYOS			Químicos Instrumentales					
Código de la Muestra			M-01	M-02	M-03	-	-	-
Código Laboratorio			08230912-01	08230912-02	08230912-03	-	-	-
Matriz			Natural	Proceso	Natural	-	-	-
Descripción			Superficial- Río	De Lixiviación	Superficial- Río	-	-	-
Localización de la Muestra			Michiquillay Alto	Tunel- Michiquillay	Parte Baja Río Michiquillay	-	-	-
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados de Metales Totales					
Plata (Ag)	mg/L	0.0190	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Aluminio (Al)	mg/L	0.0230	0.130	0.805	2.139	-	-	-
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Boro (B)	mg/L	0.0260	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Bario (Ba)	mg/L	0.0040	0.021	0.015	0.020	-	-	-
Berilio (Be)	mg/L	0.0030	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Bismuto (Bi)	mg/L	0.0160	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Calcio (Ca)	mg/L	0.1240	4.177	5.347	7.395	-	-	-
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Cerio (Ce)	mg/L	0.0040	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Cobalto (Co)	mg/L	0.0020	0.002	0.004	0.008	-	-	-
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Cobre (Cu)	mg/L	0.0180	0.028	0.416	0.919	-	-	-
Hierro (Fe)	mg/L	0.0230	0.309	9.828	1.814	-	-	-
Potasio (K)	mg/L	0.0510	0.402	1.362	1.760	-	-	-
Litio (Li)	mg/L	0.0050	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Magnesio (Mg)	mg/L	0.0190	1.084	2.102	1.965	-	-	-
Manganeso (Mn)	mg/L	0.0030	0.207	0.078	0.117	-	-	-
Molibdeno (Mo)	mg/L	0.0020	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Sodio (Na)	mg/L	0.0260	1.220	2.108	2.797	-	-	-
Niquel (Ni)	mg/L	0.0060	0.009	<LCM	<LCM	-	-	-
Fósforo (P)	mg/L	0.0240	<LCM	0.246	<LCM	-	-	-
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	<LCM	0.005	<LCM	-	-	-
Azufre (S)	mg/L	0.0910	6.520	14.20	15.61	-	-	-
Antimonio (Sb)	mg/L	0.0050	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Selenio (Se)	mg/L	0.0070	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Silicio (Si)	mg/L	0.1040	3.908	7.697	7.540	-	-	-
Estaño (Sn)	mg/L	0.0070	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Estroncio (Sr)	mg/L	0.0030	0.034	0.039	0.055	-	-	-
Titanio (Ti)	mg/L	0.0040	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Talio (Tl)	mg/L	0.0030	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Uranio (U)	mg/L	0.0040	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Vanadio (V)	mg/L	0.0040	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-
Zinc (Zn)	mg/L	0.0180	0.046	0.038	0.056	-	-	-
Sílice (SiO2)	mg/L	0.2225	8.359	16.46	16.13	-	-	-

Legenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)

Cajamarca, 25 de Agosto de 2023

INFORME DE ENSAYO N° IE 08230912

Ensayo	Unidad	Método de Ensayo Utilizado
Metales Disueltos y Totales por ICP-OES (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Ce, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, K, Li, Na, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, SiO ₂ , Sn, Sr, Ti, Tl, U, V, Zn)	mg/L	EPA Method 200.7 Rev. 4.4, 1994. (Validado-Modificado) 2020.Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry

NOTAS FINALES

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos y/o matriz que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

(°) Los Resultados son referenciales, no cumplen los requisitos de volumen, tiempo, preservación o conservación estipulado por el método, por lo tanto no se encuentra dentro del alcance de acreditación.

- ✓ Los resultados indicados en este informe concierne única y exclusivamente a las muestras recibidas y sometidas a ensayo o realizadas en campo por el Laboratorio Regional del Agua . Cuando la toma de muestra lo realiza el cliente los resultados aplican a las muestras como son recibidas.
- ✓ La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito del Laboratorio Regional del Agua. Este informe no será válido si presenta tachaduras o enmiendas.
- ✓ Las muestras sobre los que se realicen los ensayos se conservaran en Laboratorio Regional del Agua de acuerdo al tiempo de perecibilidad que indica el método de ensayo y por un tiempo máximo de 10 días luego de la emisión de la informe de ensayo; luego serán eliminadas salvo pedido expreso del cliente.
- ✓ Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditacion otorgada por INACAL-DA.
- ✓ Se prohíbe el uso del símbolo de acreditación o la declaración de condición de acreditado emitida en este informe, por parte del cliente.

"Fin del documento"

Código del Formato: P-23-F01 Rev:N°02 Fecha : 03/07/2020

Cajamarca, 25 de Agosto de 2023

**LABORATORIO REGIONAL
DEL AGUA**