

**INFORME N° 00259-2020-OEFA/DEAM-STEC**

A : FRANCISCO GARCÍA ARAGÓN
Director de Evaluación Ambiental

DE : LÁZARO WALTHER FAJARDO VARGAS
Ejecutivo de la Subdirección Técnica Científica

LUIS ÁNGEL ANCCO PICHUILLA
Coordinador de Evaluaciones Ambientales en Minería y Energía

CARLOS MANUEL AMAYA ROJAS
Especialista de Evaluaciones Ambientales

ASUNTO : Evaluación ambiental de causalidad en el ámbito del depósito de relaves Huachuacaja y planta de tratamiento de aguas residuales industriales ubicadas en el área de influencia de la unidad fiscalizable Colquijirca de Sociedad Minera El Brocal S.A.A., en el 2020

CUE : 2020-01-0039

REFERENCIA : Memorando N.º 00670-2020-OEFA/DSEM

FECHA : Lima, 31 de diciembre de 2020

Tenemos el agrado de dirigirnos a usted para informarle lo siguiente:

1. INFORMACIÓN GENERAL

Los aspectos generales de la evaluación ambiental de causalidad realizada en el ámbito del depósito de relaves Huachuacaja y planta de tratamiento de aguas residuales industriales ubicadas en el área de influencia de la unidad fiscalizable Colquijirca, se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Datos generales de la actividad realizada

a.	Tipo de evaluación	Evaluación ambiental de causalidad
b.	Zona evaluada	Ámbito del depósito de relaves Huachuacaja y planta de tratamiento de aguas residuales industriales, ubicadas en el distrito Tinyahuarco, provincia Pasco, departamento Pasco.
c.	Unidades fiscalizables o actividades económicas en la zona	Unidad fiscalizable Colquijirca de Sociedad Minera El Brocal S.A.A.
d.	Problemática identificada	Presunta afectación ambiental por actividades de la unidad fiscalizable Colquijirca
e.	La actividad se realizó en el marco de	La DSEM solicita a la DEAM la realización de una evaluación ambiental de causalidad (EAC) en el ámbito de influencia de la unidad fiscalizable Colquijirca, mediante memorando N.º 02216-2020-OEFA/DSEM
f.	Periodo de ejecución	Del 12 al 31 de octubre de 2020



Los profesionales que aportaron a este documento se detallan en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Listado de profesionales

N.º	Nombres y apellidos	Profesión	Actividad desarrollada
1	Lázaro Walther Fajardo Vargas	Ingeniero químico	Gabinete
2	Luis Ángel Ancco Pichuilla	Ingeniero químico	Gabinete
3	Carlos Manuel Amaya Rojas	Ingeniero ambiental y de recursos naturales	Campo y gabinete
4	Rubí Gabriela Lumbreras Huamán	Ingeniero ambiental	Campo y gabinete
5	Carlos Aurelio Quispe Huamán	Biólogo	Campo y gabinete
6	Fray Luis Yanapa Huaquisto	Bachiller en ingeniería geológica	Campo y gabinete
7	Caleb Pérez Quispe	Ingeniero agrónomo	Campo
8	Jorge Luis Fernández Najarro	Bachiller en ingeniería ambiental	Gabinete
9	Francis Jesús Cari Abril	Biólogo	Gabinete
10	Enoch Matthew Aguirre Alegre	Ingeniero geólogo	Gabinete
11	Félix Filio Farfán Amezcua	Biólogo	Gabinete
12	Miguel Yosimar Choquehuanca Corimanya	Ingeniero geofísico	Campo y gabinete
13	Jesús José Guainazzo Santi	Bachiller en ciencias geofísicas	Campo y gabinete
14	Ulises Miguel García Chacón	Ingeniero petroquímico	Campo

2. DATOS DE LA ACTIVIDAD REALIZADA

Los parámetros y matrices evaluadas en la evaluación ambiental de causalidad en ámbito del depósito de relaves Huachuacaja y planta de tratamiento de aguas residuales industriales ubicadas en el área de influencia de la unidad fiscalizable Colquijirca, se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros y matrices evaluadas

Matriz evaluada	Mes	Parámetros evaluados	Cantidad de puntos evaluados
Agua superficial	Octubre	Cloruros, sulfatos, fluoruros, nitratos, nitritos	9
		Carbonatos	8
		Bicarbonatos	8
		STS	8
		STD	8
		Metales totales incluido mercurio	9
		Metales disueltos incluido mercurio	8
		Cromo hexavalente	8
		Cianuro total	8
		Cianuro wad	8
Sedimento	Octubre	Materia orgánica	5
		Extracción secuencial de metales por Tessier	4
		Metales totales incluido mercurio	6
		pH	6
		Análisis mineralógico – DRX	1
		Análisis granulométrico	5
Comunidades hidrobiológicas	Octubre	Perifiton	6
		Macroinvertebrados	6
		Necton (peces)	1
Agua subterránea (Piezómetros y Manantial)	Octubre	Cloruros, sulfatos, fluoruros, nitratos, nitritos, carbonatos, bicarbonatos, STS, STD, metales, disueltos incluido mercurio, cromo hexavalente	4
		Metales totales incluido mercurio	4
		Cianuro total	4
		Cianuro wad	4

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

Matriz evaluada	Mes	Parámetros evaluados	Cantidad de puntos evaluados
Efluentes industriales	Octubre	Cloruros, sulfatos, fluoruros, nitratos, nitritos, carbonatos, bicarbonatos, STS, metales totales incluido mercurio, metales disueltos incluido mercurio, cromo hexavalente, cianuro total, cianuro wad	1
Agua residual industrial	Octubre	Cloruros, sulfatos, fluoruros, nitratos, nitritos, carbonatos, bicarbonatos, STS, STD, metales totales incluido mercurio, metales disueltos incluido mercurio, cromo, hexavalente, cianuro total, cianuro wad	6
Geofísica tomografía eléctrica	Octubre	Resistividad	4 líneas

Los parámetros que superaron o que se encontraron fuera de lo establecido en la normativa nacional o de uso internacional, se presentan en la Tabla 2.2 y 2.3 respectivamente.

Tabla 2.2. Parámetros que superaron o se encontraron fuera de la normativa nacional

Matriz	Cuerpo de agua	Código		Norma ambiental ¹
		OEFA	IGA	
Agua superficial	Quebrada Huachuacaja	QHua	-	pH
	Quebrada Andacancha	-	QHE-2	Conductividad eléctrica, sulfato, calcio
	Agua del canal Este de coronación del depósito de relaves Huachuacaja	RAnda6	-	Conductividad eléctrica, sulfato, calcio
	Río Andacancha	RAnda5	-	Conductividad eléctrica, sulfato, calcio
		-	A-2	Conductividad eléctrica, sulfato, calcio
		-	E-11	Conductividad eléctrica, sulfato, calcio
Agua subterránea	Bofedal	B-1	-	pH
	Manantial Huachuacaja	-	PMH-01	Oxígeno disuelto
	Piezómetros	-	SDHE-03	Oxígeno disuelto
		-	PMH-2	Calcio, hierro, manganeso, oxígeno disuelto

1: Estándar de Calidad Ambiental para Agua. Categoría 3: Riego de vegetales y Bebida de animales, aprobado mediante Decreto Supremo N.º 002-2008-MINAM. Para el caso de la matriz agua subterránea, sus resultados se compararon de manera referencial.

-: No aplica

Tabla 2.3. Parámetros que superaron referencialmente la normativa de uso internacional

Matriz	Cuerpo de agua	Código OEFA	Código IGA	Norma de referencia
				CCME ¹
Sedimentos	Quebrada Andacancha	QAnda	-	arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo y, zinc
		-	QHE-2	arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo y, zinc
	Río Andacancha	RAnda5	-	arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo y, zinc
		-	A-2	arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo y, zinc
		-	E-11	arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo y, zinc
	Bofedal	B-1A	-	arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo y, zinc

1: Canadian Council of Ministers of the Environment (2002). Canadian Environmental Quality Guidelines. Sediment. Quality Guidelines for Protection of Aquatic Life of Freshwater (Valores de la guía de calidad ambiental de Canadá para sedimentos de aguas continentales). De uso referencial al no contar con normativa nacional.

-: No aplica

3. CONCLUSIONES

- Se evidencia la presencia de un cuerpo saturado de agua que se relaciona al acuífero libre de la quebrada Huachuacaja (líneas ERT-6 y ERT-8), el cual al encontrarse con el dique R4 provoca una surgencia de la misma. De acuerdo al contexto geológico y las características fisicoquímicas de los puntos blancos MHua-2 y QHua, estas surgencias



deberían presentarse en la facie bicarbonatada cálcica o magnésica; sin embargo, se presentan en una facie sulfatada cálcica, que es semejante a la facie del sobrenadante del depósito de relaves Huachuacaja, lo cual evidencia filtración y la mezcla de aguas; por lo que las filtraciones acumuladas de agua (AF5, AF6, AF7 y ESP-8) identificados al pie del dique de protección R4 se deben considerar como agua residual industrial o de contacto.

- Durante la acción de campo realizado del 12 al 31 de octubre de 2020, la quebrada Andacancha (QHE-2) tuvo como origen la descarga del efluente R-5, estas aguas son derivadas mediante el canal de coronación Este del depósito de relaves Huachuacaja (Randa6) al río Andacancha (RAnda5, A-2, E-11) y se evidencia en que las concentraciones de los parámetros evaluados en ambos cuerpos receptores son similares a lo registrado en el efluente. Además, el punto ubicado aguas arriba de este efluente (QHE-3) se encontró sin flujo de agua y no hubo aporte de la quebrada Huachuacaja al río Andacancha.
- Los parámetros evaluados en el efluente minero R-5 de la planta de tratamiento de aguas industriales de la UF Colquijirca cumplieron con los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero-Metalúrgicas, aprobado mediante Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM. Sin embargo, este efluente también presenta alta concentración de sulfatos (1735 mg/L) que altera la calidad de la quebrada Andacancha (QHE-2) y río Andacancha (RAnda5, A-2, E-11) principalmente con este anión que superó el ECA para agua 2008 categoría 3 en todos los puntos ubicados aguas abajo de este efluente; esta influencia en relación al sulfato se confirma con la data histórica del 2016 al 2020. Además, la alteración se evidencia en el cambio de facie hidroquímica de bicarbonatada cálcica o magnésica a sulfatada cálcica e incremento de la concentración de este anión en comparación con los puntos ubicados aguas arriba (QAnda, QHua) del efluente y depósito de relaves Huachuacaja.
- Por otro lado, la concentración de arsénico total, cadmio total, cobre total, mercurio total, plomo total y zinc total en los sedimentos de la quebrada Andacancha (QHE-2) y río Andacancha (RAnda5, A-2, E-11) que superaron, referencialmente, los valores PEL de la guía canadiense, influyó negativamente en el desarrollo de las comunidades hidrobiológicas presentando especies tolerantes a metales pesados reflejándose en una pésima calidad biológica.

El desarrollo completo del análisis de resultados y conclusiones se encuentra en el documento adjunto al presente informe.

4. RECOMENDACIONES

- Aprobar el informe de la Evaluación ambiental de causalidad en el ámbito del depósito de relaves Huachuacaja y planta de tratamiento de aguas residuales industriales ubicadas en el área de influencia de la unidad fiscalizable Colquijirca de Sociedad Minera El Brocal S.A.A., en el 2020; en vista que cuenta con el sustento técnico requerido.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

STEC: Subdirección
Técnica Científica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

- Remitir a la Dirección de Supervisión Ambiental en Energía y Minas para los fines que se estimen convenientes.

Atentamente:

[LFAJARDO]

[LANCCO]

[CAMAYA]

Visto este informe la Dirección de Evaluación Ambiental ha dispuesto su aprobación.

Atentamente:

[FGARCIA]



"Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por el OEFA, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. N° 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través de la siguiente dirección web: <https://sistemas.oefa.gob.pe/verifica> e ingresando la siguiente clave: 05637487"



05637487

**EVALUACIÓN AMBIENTAL DE CAUSALIDAD EN
EL ÁMBITO DEL DEPÓSITO DE RELAVES
HUACHUACAJA Y PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES UBICADAS
EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA UNIDAD
FISCALIZABLE COLQUIJIRCA DE SOCIEDAD
MINERA EL BROCAL S.A.A., EN EL 2020**

**SUBDIRECCIÓN TÉCNICA CIENTÍFICA
DIRECCIÓN DE EVALUACIÓN AMBIENTAL**

2020

Profesionales que aportaron a este documento:



Firmado digitalmente por:
AMAYA ROJAS Carlos Manuel
FIR 41376432 hard
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 31/12/2020 19:37:05-0500



Firmado digitalmente por:
CARI ABRIL Francis Jesus
FIR 40250345 hard
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 31/12/2020 20:01:15-0500



Firmado digitalmente por:
FERNANDEZ NAJARRO Jorge
Luis FIR 43970034 hard
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 31/12/2020 20:12:21-0500



Firmado digitalmente por:
LUMBRERAS HUAMAN RUBI
GABRIELA FIR 48077489 hard
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 31/12/2020 20:25:06-0500



Firmado digitalmente por:
QUISPE HUAMAN Carlos
Aurelio FIR 70516070 hard
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 31/12/2020 19:52:48-0500



Firmado digitalmente por:
GUAINAZZO SANTI JESUS
JOSE FIR 30501323 hard
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 31/12/2020 20:04:36-0500



Firmado digitalmente por:
YANAPA HUAQUISTO Fray
Luis FIR 70019558 hard
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 31/12/2020 21:20:48-0500



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	ANTECEDENTES.....	1
3.	OBJETIVOS.....	2
3.1.	Objetivo general.....	2
3.2.	Objetivos específicos.....	2
4.	ÁREA DE ESTUDIO.....	3
4.1.	Climatología y geología regional.....	3
4.2.	Contexto social.....	4
5.	METODOLOGÍA.....	4
5.1.	Objetivo específico 1: Identificar las infiltraciones del dique de contención del depósito de relaves Huachuacaja y su efecto en el acuífero libre de la quebrada Huachuacaja.....	5
5.1.1.	Caracterización de aguas residuales industriales.....	5
5.1.2.	Tomografía de resistividad eléctrica.....	9
5.2.	Objetivo específico 2: Determinar la influencia de los elementos o compuestos de preocupación del efluente minero de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en la quebrada Andacancha.....	15
5.2.1.	Caracterización geológica.....	15
5.2.2.	Efluente minero.....	17
5.2.3.	Agua superficial.....	20
5.2.4.	Sedimento.....	23
5.2.5.	Comunidades hidrobiológicas.....	26
5.2.6.	Agua subterránea.....	33
6.	RESULTADOS y ANÁLISIS.....	36
6.1.	Objetivo específico 1: Identificar las infiltraciones del dique de contención del depósito de relaves Huachuacaja y su efecto en el acuífero libre de la quebrada Huachuacaja.....	36
6.1.1.	Agua residual industrial en el ámbito de la relavera Huachuacaja.....	36
6.1.2.	Tomografía de resistividad eléctrica.....	41
6.2.	Objetivo específico 2: Determinar la influencia de los elementos o compuestos de preocupación del efluente minero de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en la quebrada Andacancha.....	46
6.2.1.	Caracterización geológica local.....	46
6.2.1.	Efluente minero.....	50
6.2.2.	Agua superficial.....	53
6.2.3.	Hidrobiología.....	60
6.2.4.	Agua subterránea.....	65



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

STEC: Subdirección Técnica
Científica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

6.2.5. Sedimento.....	69
7. DISCUSIÓN.....	80
Zona 1: Filtraciones identificadas en la cola del dique de contención (R4) del depósito de relaves Huachuacaja y su efecto en el acuífero libre de la quebrada Huachuacaja.	82
Zona 2: Análisis de la influencia de elementos o compuestos de preocupación del efluente minero R5 de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en la quebrada Andacancha	85
8. CONCLUSIONES	99
9. ANEXOS.....	99
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 5.1.	Ubicación de los puntos de muestreo de agua residual industrial de mina.....	5
Tabla 5.2.	Parámetros considerados para el análisis de agua residual industrial	6
Tabla 5.3.	Guías empleadas en la tomografía de resistividad eléctrica	10
Tabla 5.4.	Coordenadas de inicio y fin de cada línea de tomografía de resistividad eléctrica.....	10
Tabla 5.5.	Parámetros de adquisición de tomografía de resistividad eléctrica.....	12
Tabla 5.6.	Resistividad característica de distintos materiales.....	14
Tabla 5.7.	Referencias utilizadas para la caracterización geológica	15
Tabla 5.8.	Ubicación de puntos de caracterización geológica	16
Tabla 5.9.	Protocolo utilizado para el muestreo de efluentes minero	18
Tabla 5.10.	Ubicación de los puntos de muestreo de efluente minero	18
Tabla 5.11.	Parámetros y metodologías de la muestra de efluente minero de la UF Colquijirca	18
Tabla 5.12.	Guías utilizadas para el muestreo de agua superficial	20
Tabla 5.13.	Ubicación de los puntos de muestreo de aguas superficial	21
Tabla 5.14.	Parámetros y metodologías para agua superficial	22
Tabla 5.15.	Referencias para el muestreo de la calidad de sedimento	23
Tabla 5.16.	Ubicación de los puntos de muestreo de sedimento	24
Tabla 5.17.	Parámetros evaluados y métodos de análisis	24
Tabla 5.18.	Ubicación de los puntos de muestreo de comunidades hidrobiológicas	27
Tabla 5.19.	Parámetros, métodos y técnicas empleadas en el análisis de las comunidades hidrobiológicas	27
Tabla 5.20.	Valoración de la calidad hidromorfológica.....	30
Tabla 5.21.	Puntajes de sensibilidad asignadas a las familias de macroinvertebrados bentónicos para la obtención del índice ABI	30
Tabla 5.22.	Valoración de la calidad biológica con el índice ABI.....	31
Tabla 5.23.	Escala de calidad ecológica	31
Tabla 5.24.	Guías utilizadas para evaluación de la calidad del agua subterránea	33
Tabla 5.25.	Ubicación de los puntos de muestreo de agua subterránea	34
Tabla 5.26.	Parámetros y metodologías para agua subterránea	34
Tabla 6.1.	Resultados de parámetros evaluados en agua residual industrial	36
Tabla 6.2.	Caracterización de los metales en el agua residual industrial y las filtraciones	37
Tabla 6.3.	Clasificación de las muestras de agua residual industrial de componentes según diagramas de Stiff.....	38
Tabla 6.4.	Clasificación de las muestras de agua residual industrial de filtraciones según diagramas de Stiff	40
Tabla 6.5.	Características de las líneas de tomografía de resistividad eléctrica ejecutadas en el ámbito del depósito de relaves Huachuacaja.....	42
Tabla 6.6.	Resultados de parámetros fisicoquímicos en efluentes comparado con los LMP para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas ...	50
Tabla 6.7.	Caracterización de los metales en el efluente minero	51
Tabla 6.8.	Clasificación de las muestras del efluente según diagramas de Stiff	52
Tabla 6.9.	Resultados de parámetros fisicoquímicos en agua superficial comparados con los ECA para agua 2018 Cat.3.....	54
Tabla 6.10.	Resultados de metales totales en agua superficial comparados con los ECA para Agua 2008	55
Tabla 6.11.	Caracterización de los metales en agua superficial en el ámbito relavera Huachuacaja	56



Tabla 6.12.	Clasificación de las muestras de agua superficial según diagramas de Stiff ...	58
Tabla 6.13.	Diversidad alfa de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos	61
Tabla 6.14.	Resultados de la calidad ecológica según el protocolo CERA-S modificado ...	62
Tabla 6.15.	Diversidad alfa de la comunidad de microalgas.....	64
Tabla 6.16.	Resultados de parámetros fisicoquímicos en agua subterránea comparados referencialmente con los ECA para agua 2018 Cat.3.....	65
Tabla 6.17.	Resultados de metales totales en agua subterránea comparados referencialmente con los ECA para Agua 2008	66
Tabla 6.18.	Caracterización de los metales en agua subterránea en el ámbito de estudio relavera Huachuacaja.....	67
Tabla 6.19.	Clasificación de las muestras de agua subterránea según diagramas de Stiff	68
Tabla 6.20.	Resultados de parámetros de los sedimentos comparados referencialmente con los valores ISQG y PEL de la guía canadiense de sedimento.....	70
Tabla 6.21.	Resultados de metaloides, metales y parámetros físicos en el sedimento	71
Tabla 6.21.	Resultados de metales del análisis de extracción (Tessier) en los sedimentos del ámbito de la quebrada y río Andacancha.....	72
Tabla 6.23.	Resultados del análisis de difracción de rayos X en sedimento.	76
Tabla 6.24.	Cargas de los componentes principales para los parámetros (variables) del sedimento en el ámbito de la quebrada y río Andacancha.....	77
Tabla 6.25.	Tabla de medias de los parámetros que componen los cluster es y del total de puntos de sedimento	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1.	Esquema de ubicación del área de estudio	3
Figura 5.1.	Diagrama de Stiff	8
Figura 5.2.	Diagrama de Ficklin	8
Figura 5.3.	Diagrama de Ficklin	9
Figura 5.4.	Componentes de campo de tomografía de resistividad eléctrica	9
Figura 5.5.	Resistividad y conductividad característica de distintos materiales.....	14
Figura 5.6.	Factores geológicos que incrementan o disminuyen la resistividad	15
Figura 5.7.	Dendograma	25
Figura 6.1.	Diagrama de Piper de las muestras de agua residual industrial en el ámbito de la relavera Huachuacaja	38
Figura 6.2.	Clasificación de las muestras de agua residual industrial de componentes según el diagrama de Ficklin	39
Figura 6.3.	Diagrama de Piper de las muestras de agua residual industrial de filtraciones	40
Figura 6.4.	Clasificación de las muestras de agua residual industrial de filtraciones según el diagrama de Ficklin	41
Figura 6.5.	Ubicación de las líneas de tomografía de resistividad eléctrica en el ámbito de la relavera Huachuacaja	42
Figura 6.6.	Línea de tomografía de resistividad eléctrica ERT-05	43
Figura 6.7.	Línea de tomografía de resistividad eléctrica ERT-07	44
Figura 6.8.	Línea de tomografía de resistividad eléctrica ERT-06	45
Figura 6.9.	Línea de tomografía de resistividad eléctrica ERT-08	46
Figura 6.10.	Mapa geológico del ámbito de influencia del UF Colquijirca	47
Figura 6.11.	Diagrama de Piper de las muestras del efluente minero en el ámbito de la quebrada y río Andacancha.....	52



Figura 6.12.	Clasificación de las muestras de agua de efluente según el diagrama de Ficklin	53
Figura 6.13.	Diagrama de Piper de las muestras de agua superficial.....	57
Figura 6.14.	Clasificación de las muestras de agua superficial de filtraciones según el diagrama de Ficklin.....	59
Figura 6.15.	a) Densidad (abundancia), b) Riqueza (número de especies distintas) con respecto al orden taxonómico de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos.....	61
Figura 6.16.	a) Densidad (abundancia), b) Riqueza (número de especies distintas) con respecto al orden taxonómico de la comunidad de microalgas	64
Figura 6.17.	Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea.....	68
Figura 6.18.	Clasificación de las muestras de agua subterránea según el diagrama de Ficklin	69
Figura 6.19.	Disponibilidad por etapas de arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc en sedimento en el punto de muestreo QAnda	73
Figura 6.20.	Disponibilidad por etapas de arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc en sedimento en el punto de muestreo QHE-2.....	74
Figura 6.21.	Disponibilidad por etapas de arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc en sedimento en el punto de muestreo A-2	75
Figura 6.22.	Disponibilidad por etapas de arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc en sedimento en el punto de muestreo E-11	76
Figura 6.23.	Dendrograma que muestra los grupos jerárquicos entre los puntos de muestreo de sedimento del ámbito de la quebrada y río Andacancha (método «Ward»)	78
Figura 6.24.	Puntuaciones de los componentes principales, con ubicación de los puntos de muestro de sedimento separados por cluster es	79
Figura 7.1.	Modelo conceptual de las zonas evaluadas en el área de estudio.....	81
Figura 7.2.	Dique de protección y poza R4 de lado norte del depósito de relaves Huachuacaja	82
Figura 7.3.	Filtraciones empozadas al pie del talud externo del dique R4 del depósito de relaves Huachuacaja	83
Figura 7.4.	Comparación de características hidroquímicas entre la sobrenadante del DR Huachuacaja, filtraciones y puntos blancos en la quebrada Huachuacaja	84
Figura 7.5.	Tomografía de resistividad eléctrica en 4 líneas ubicadas en el ámbito del dique de protección R4 en la parte norte del depósito de relaves Huachuacaja	85
Figura 7.6.	Esquema hídrico del sistema de tratamiento HDS.....	86
Figura 7.7.	a) Vista panorámica de la ubicación del efluente R-5, b) descarga del efluente R-5 a la quebrada Andacancha, c) parte alta de la quebrada Andacancha y efluente R-5 y d) quebrada Andacancha sin flujo de agua (aguas arriba de la descarga del efluente), e) Flujo de agua en dirección a la poza de bombeo R-5, f) poza de bombeo R-5 y g) flujo de agua que sale del canal de coronación Este del depósito de relaves Huachuacaja y llega al río Andacancha y vista de la quebrada Huachuacaja sin flujo de agua	88
Figura 7.8.	Resultados de a) sulfatos y conductividad eléctrica, y b) calcio	89
Figura 7.9.	Data histórica de la concentración de sulfato desde octubre 2016 a noviembre 2020	90
Figura 7.10.	Resultados de sulfato en el ámbito del efluente R-5.....	90



Figura 7.11.	Resultados de hidroquímica y geología en el ámbito de la quebrada y río Andacancha	91
Figura 7.12.	Esquema de distribución de puntos de muestreo de sedimento con comparación referencial con la norma canadiense.....	92
Figura 7.13.	Cluster es de la quebrada Andacancha, río Andacancha y bofedal	93
Figura 7.14.	Concentraciones de arsénico total, cadmio total, cobre total, mercurio total, plomo total y zinc total comparados con la guía canadiense para sedimento	94
Figura 7.15.	Dinámica de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos y microalgas en función a su calidad biológica, composición y similitud de grupos de especies	97
Figura 7.16.	Análisis de correspondencia canónica - ACC entre los factores abióticos vs a) los macroinvertebrados bentónicos y b) Microalgas	98



1. INTRODUCCIÓN

La presente evaluación ambiental de causalidad (en adelante, EAC), realizada en octubre de 2020, en el ámbito del depósito de relaves Huachuacaja y planta de tratamiento de aguas ácidas ubicadas en el área de influencia de la unidad fiscalizable Colquijirca (en adelante, UF Colquijirca), de Sociedad Minera El Brocal S.A.A., contiene resultados, análisis y conclusiones de los estudios realizados por la Dirección de Evaluación Ambiental del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (en adelante, OEFA). Cabe indicar que, las operaciones de la UF Colquijirca son percibidas por la sociedad civil como un agente de contaminación ambiental y afectación de salud de las personas.

En tal sentido, la Dirección de Supervisión Ambiental en Energía y Minas (DSEM), mediante memorando N.º 02216-2020-OEFA/DSEM, solicitó a la Dirección de Evaluación Ambiental (DEAM) efectuar acciones de evaluación ambiental de causalidad en el ámbito de la unidad fiscalizable Colquijirca.

En este contexto, la presente EAC determinó la influencia del depósito de relaves Huachuacaja (depósito de protección R4) al acuífero natural de la quebrada Huachuacaja y el efluente minero de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales sobre la quebrada Andacancha y río Andacancha. Cabe precisar que, para la presente evaluación se realizaron muestreos de agua superficial, agua residual industrial, agua subterránea, efluente minero, sedimento y comunidades hidrobiológicas.

La información de la presente EAC constituirá un soporte técnico para las acciones de supervisión y fiscalización ambiental del OEFA.

2. ANTECEDENTES

El informe N.º 034-2015-OEFA/DE-SDCA-CEAI titulado «Evaluación ambiental de la cuenca del río San Juan» mencionó que en junio 2015 el río San Juan, durante su recorrido desde la parte alta de las operaciones de la UF Colquijirca de Sociedad Minera El Brocal S.A.A. hacia la parte baja presentó un incremento en las concentraciones de cobre y hierro hasta superar el ECA para agua (2008)¹.

En el caso del río Andacancha antes de su confluencia con el río San Juan, también se registraron concentraciones de cobre y hierro que superaron la norma mencionada; asimismo, el manganeso, a pesar de superar el ECA para agua 2008¹ aguas arriba de las operaciones, también registró un incremento aguas abajo. Similar comportamiento presentó las concentraciones de cobre y arsénico en sedimento en junio y setiembre de 2015, evidenciándose un incremento en la parte baja de las operaciones que superaron la norma canadiense (CEQG)².

En el informe N.º 0002-2017-OEFA-DE-SDLB-CEAI titulado «Evaluación Ambiental de la subcuenca del río San Juan durante el año 2016» se concluyó lo siguiente:

(I) El punto de monitoreo AG-RAN-11 ubicado en el tributario Andacancha, reportó mayores condiciones de alcalinidad en referencia a los demás puntos de monitoreo evaluados; además, se evidenciaron concentraciones de cobre, hierro y manganeso por encima del ECA para Agua Categoría 3. Cabe acotar que, este punto se ubica aguas abajo

¹ Estándares de Calidad Ambiental para Agua Categoría 3, aprobado mediante Decreto Supremo N.º 002-2008-MINAM, Categorías 3: Riego de Vegetales y Bebida de Animales

² CEQG (*Canadian Environmental Quality Guidelines*), 2011: Valores guía para la protección de la vida acuática (aguas continentales). Agencia de Protección Ambiental.



del depósito de desmonte Sur, chancadora primaria, *stock pile* Marcapunta Norte y depósito de relaves Huachuacaja, los cuales fueron identificados como potenciales fuentes de contaminación por sus características químicas, mineralógicas, de biodisponibilidad y de toxicidad. Por otro lado, el punto de monitoreo AG-RSJ-10 se vió influenciado por el tributario Andacancha, puesto que ambos puntos de monitoreo (AG-RAN-11 y AG-RSJ-10) superan los mismos metales. Así también el punto de monitoreo AG-RSJ-10 puede verse influenciado por el depósito de relaves 6 y 7. Este último componente minero está compuesto principalmente por Fe, Mn y Ca, y en menor proporción por Pb, Cu y Zn.

(II) El depósito de relaves Huachuacaja operado por la Sociedad Minera El Brocal S.A.A., tiene una composición mineralógica con predominante contenido de siderita (36 %), cuarzo (35 %) y pirita (11 %), este último mineral característico por generar drenaje ácido. Asimismo, los resultados de metales totales muestran mayor presencia de Ca, Fe y Mn, y en menor proporción concentraciones de Pb y Zn, en referencia de los metales evaluados en la presente EAC. Con respecto a la biodisponibilidad, este componente minero presenta importantes porcentajes en la fracción 1 y 2 para metales como Ba y Cd, para la fracción 1 el Ba y Cd alcanzaron valores de 11,06 % y 13,33 % respectivamente, mientras para la fracción 2 alcanzaron valores de 47,69 % y 45,60 % respectivamente. Al encontrarse en la fracción 1 y 2 son biodisponibles, representando con ello un riesgo potencial para el ambiente y población, ya que el Ba y Cd pueden movilizarse, lixiviarse y contaminar otros medios abióticos o ser absorbidos por organismos vivos. Finalmente, la evaluación de toxicidad evidenció que el Mn superó el valor referencial marcado por los niveles para agua potable multiplicados por un factor de atenuación y dilución igual a 100. Por ende, el Mn en este componente minero podría considerarse peligroso de acuerdo a este criterio. De manera complementaria, el APCM³ indica que los resultados de la prueba ácido-base evidencian la generación de drenaje ácido en 6 muestras de las 10 evaluadas.

El informe N.º 036-2020-ANA-AAA.MAN-ALA.PS.AT-NVTH titulado «Evaluación de los resultados de análisis de metales de las muestras de agua tomadas el 14.04.2020 por presunta afectación al río San Juan», indica que el río Andacancha durante su recorrido desde la parte alta de la relavera Huachuacaja de la UM Colquijirca hacía la parte baja y después del mencionado componente, presentó un incremento en las concentraciones de cobre y manganeso superando el ECA para agua 2017 Categoría 3, subcategoría D1 Riego de vegetales⁴; además se observó un incremento en la concentración de manganeso, todo esto antes de la confluencia con el río San Juan.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar la influencia del depósito de relaves Huachuacaja y efluente minero metalúrgico de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales sobre los receptores ambientales.

3.2. Objetivos específicos

- Identificar las infiltraciones del dique de contención del depósito de relaves Huachuacaja y su efecto en el acuífero libre de la quebrada Huachuacaja.

³ Actualización del Plan de Cierre de Minas de la unidad minera Colquijirca aprobado mediante Resolución Directoral N.º 243-2012-MEM/AAM, el 19 de julio de 2012.

⁴ Estándares de Calidad Ambiental para Agua Categoría 3, aprobado mediante Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, Categoría 3 Riego de Vegetales y Bebida de Animales, Subcategorías D1: Riego de Vegetales y D2: Bebida de Animales

- Determinar la influencia de los elementos o compuestos de preocupación del efluente minero de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en la quebrada Andacancha.

4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarcó el ámbito del depósito de relaves Huachuacaja y efluente minero metalúrgico de la planta de tratamiento de aguas ácidas; ubicado en el distrito Tinyahuarco, provincia y departamento Pasco (Figura 4.1).

Hidrográficamente, se ubica en la microcuenca Andacancha en la subcuenca del río San Juan, que pertenece a la cuenca del río Mantaro. Geográficamente, se ubica en los Andes Centrales del Perú a unos 25 km al norte del lago Junín y a una altitud promedio de 4300 m s. n. m.

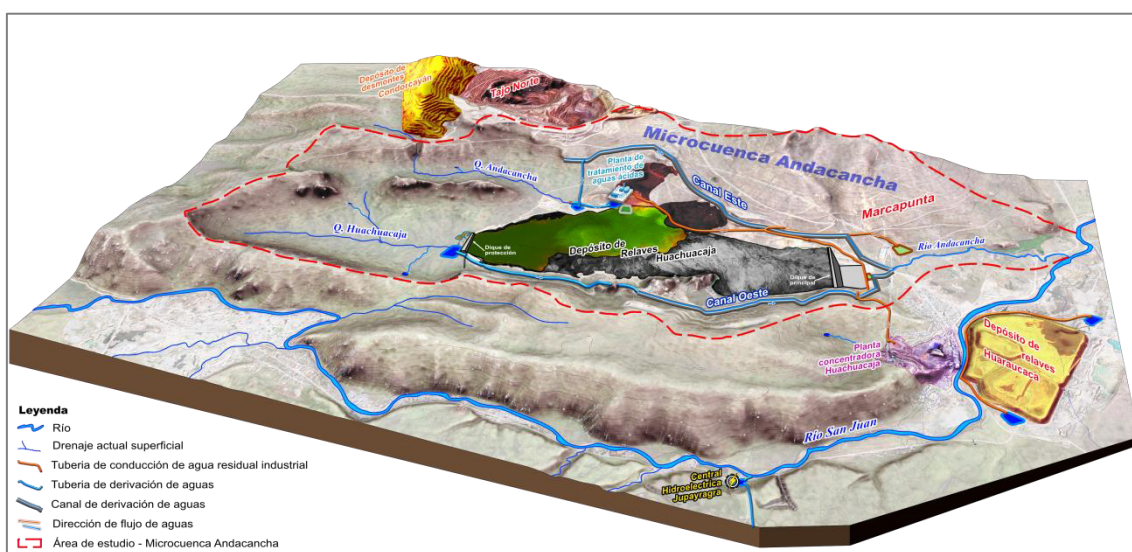


Figura 4.1. Esquema de ubicación del área de estudio

4.1. Climatología y geología regional

Según los datos del Quinto ITS⁵, las condiciones climáticas regionales características del área donde se ubica la UM Colquijirca, están determinadas por un clima muy lluvioso-semifrío, con un promedio anual de precipitación de 1207,7 mm; con una temperatura promedio de 5,3 °C; mientras que, los valores promedios mínimos y máximos varían de 0,2 °C a 10,8 °C respectivamente.

La época de lluvias corresponde al periodo de enero a marzo, siendo la época de menor precipitación el periodo entre junio y agosto, mientras que los demás meses las precipitaciones son variables. En la estación meteorológica Huaraucaca, la dirección predominante es este, con una velocidad de viento promedio de 6,05 m/s con rango de 3 m/s a 6 m/s.

5 Quinto ITS Reubicación de Oficinas Administrativas en Marcapunta Norte e Implementación de Duchas y Vestuarios en Marcapunta Norte, Marcapunta Sur y Ex Campamento Graña – UM Colquijirca. Capítulo 8: Línea de Base Actualizada.



El contexto geológico regional⁶ está representado principalmente por unidades litoestratigráficas (Grupo Mitu, Formación Chambará, Grupo Pucará, Formación Calera) y de forma local por rocas volcánicas y subvolcánicas (complejo Marcapunta), ambos cubiertos por depósitos cuaternarios recientes (glaciar, fluvio-glaciar, bofedal y aluvial). Se resalta que la Formación Calera corresponde a la unidad mineralizada donde se encuentran los yacimientos que actualmente realizan actividades de explotación.

El área de la mina Colquijirca, según la esquematización geotécnica, se encuentra en la Cuenca Peruana Occidental que fue afectada por varias fases tectónicas (*Cobbing*). Las principales fallas longitudinales presentan ejes paralelos al eje de los pliegues, emplazados como sobreescurrecimientos y fallas normales locales. La mayoría de estas estructuras se encuentran cubiertas por depósitos cuaternarios, cuyos vestigios no evidencian actividad reciente (fallas activas) y que puedan considerarse fuente sismogénica.

4.2. Contexto social

En el área de influencia directa, los poblados de Smelter, Huaracaca, y Colquijirca se encuentran involucrados en las actividades mineras que se realiza en la zona. Asimismo, la población residente en estos poblados son los receptores directos de los posibles impactos ambientales y sociales. El distrito Tinyahuarco al tener la jurisdicción política y administrativa, además de ser el receptor de canon minero, es considerado junto con la provincia Pasco, como parte del área de influencia indirecta.

La población estimada en el área de influencia social directa es de 420 habitantes; asimismo, el 100 % de la población total, es urbana. La población de varones es de 203 y la de mujeres es de 217; y 273 habitantes de la población corresponde a edades de 15 a 59 años, 123 habitantes están dentro de la edad de 0 a 14 años y 24 habitantes pertenecen a los de 65 años a más. Respecto a la actividad económica que desarrollan los habitantes de la población económicamente activa ocupada de Smelter, Huaracaca, y Colquijirca se registraron a 135 personas; de estos, 93 personas se dedican al servicio y transporte, 15 personas a minería, seguido por comercio con 13 personas, empleados 10 personas y solo 4 personas a la ganadería (ovinos, llamas, alpacas y animales menores). Asimismo, debido a la ubicación geográfica de los poblados a más de 4000 m s. n. m., las tierras no son aptas para la agricultura (Quinto ITS⁷).

5. METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo de la presente EAC en el el ámbito del depósito de relaves Huachuacaja y efluente minero metalúrgico de la planta de tratamiento de aguas ácidas de la UF Colquijirca, se aplicó en función de los objetivos planteados. La evaluación contempló 3 etapas: planificación en gabinete, ejecución en campo y la elaboración de la EAC.

En este ítem se detallan los protocolos o guías utilizados, la ubicación y descripción de puntos de muestreo, los parámetros y métodos de análisis, los equipos y herramientas utilizadas, el procesamiento de datos y criterios de evaluación aplicados para el cumplimiento de los objetivos planteados.

⁶ Extraído de la Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de ampliación de operaciones a 18,000 TMD, aprobado con Resolución Directoral N.º 361-2012-MEM/AAM.

⁷ Quinto ITS Reubicación de Oficinas Administrativas en Marcapunta Norte e Implementación de Duchas y Vestuarios en Marcapunta Norte, Marcapunta Sur y Ex Campamento Graña – UM Colquijirca. Capítulo 8: Línea de Base Actualizada.

**5.1. Objetivo específico 1: Identificar las infiltraciones del dique de contención del depósito de relaves Huachuacaja y su efecto en el acuífero libre de la quebrada Huachuacaja****5.1.1. Caracterización de aguas residuales industriales**

Se presenta la metodología empleada para la caracterización de agua residual industrial generadas por las operaciones de la UF Colquijirca en el ámbito de la relavera Huachuacaja.

5.1.1.1. Guías utilizadas para la evaluación

La referencia para el muestreo de efluentes mineros fue el «Protocolo de monitoreo de calidad de agua subsector – minería», aprobado por Resolución Directoral N.º 004-94-EM/DGAA del Ministerio de Energía y Minas en 1994; el cual también se tomó como referencia para el muestreo de los puntos de aguas residuales de mina.

5.1.1.2. Ubicación de puntos de muestreo

En la Tabla 5.1 se presenta la ubicación de los puntos de muestreo de agua residual industrial de mina.

Tabla 5.1. Ubicación de los puntos de muestreo de agua residual industrial de mina

N.º	Código OEFA	Código IGA	Coordenadas UTM WGS84 – Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		
1	DRHua-1	--	358886	8810553	4169	Agua sobrenadante en el sector noreste del vaso del depósito de relaves Huachuacaja
2	--	E-13*	359089	8807185	4173	Poza de infiltración del depósito de relaves Huachuacaja
3	ESP-8	--	358381	8810926	4142	Afloramiento al pie del dique de contención en la cola del vaso del depósito de relaves Huachuacaja que discurre por el suelo en dirección a la poza R4.
4	AF5	--	358586	8810922	4174	Agua acumulada ubicada al pie del dique de contención en la cola del vaso del depósito de relaves Hauchuacaja
5	AF6	--	358439	8810942	4177	Agua acumulada ubicada al pie del dique de contención en la cola del vaso del depósito de relaves Hauchuacaja
6	AF7	--	358289	8810874	4175	Agua acumulada ubicada al pie del dique de contención en la cola del vaso del depósito de relaves Hauchuacaja

*: Tomado del Estudio de Impacto Ambiental de la Mina Marcapunta Zona Norte y Sur, aprobado con Resolución Directoral N.º 533-2014-MEM/DGAAM

--: No aplica

5.1.1.3. Parámetros y métodos de análisis

Los parámetros evaluados fueron elegidos de acuerdo a la actividad desarrollada por el administrado. En los puntos de muestreo se analizaron *in situ* los parámetros temperatura (T), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y potencial redox (ORP), ver Tabla 5.2.

**Tabla 5.2.** Parámetros considerados para el análisis de agua residual industrial

N.º	Parámetro	Unidad	Método de ensayo
1	Cianuro Total	mg/L	Método Colorimétrico
2	Cianuro Wad	mg/L	Método Colorimétrico
3	Sólidos totales suspendidos (SST)	mg/L	Gravimetría
4	Sólidos totales disueltos (STD)	mg/L	Gravimetría
5	Carbonatos	mg/L	Método de titulación
6	Bicarbonatos	mg/L	Método de titulación
7	Cloruros	mg/L	Cromatografía iónica
8	Nitratos	mg/L N-NO ₃	Cromatografía iónica
9	Nitritos	mg/L N-NO ₂	Cromatografía iónica
10	Sulfatos	mg/L	Cromatografía iónica
11	Metales totales + mercurio	mg/L	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
12	Metales disueltos + mercurio	mg/L	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
13	Cromo hexavalente	mg/L	espectrometría ultravioleta-visible (UV-VIS)

Fuente: Reporte de campo (Anexo A) y reporte de resultados (Anexo B)

5.1.1.4. Equipos utilizados

Los equipos utilizados para la ubicación de los puntos y medición de parámetros *in situ*, se detallan en el Anexo A.

5.1.1.5. Aseguramiento de la calidad

El aseguramiento de la calidad en la etapa de campo consideró la verificación y ajuste de los sensores de los equipos multiparámetro antes del inicio del muestreo, cuyos registros se presentan en el Anexo A.

Para el aseguramiento de la calidad de los resultados de laboratorio se tomó un duplicado del parámetro metales totales. De acuerdo al Protocolo de monitoreo de calidad de agua-subsector minería: «... el 10% de las muestras se prepara rutinariamente como duplicados». También se evaluó blancos viajeros y de campo, acorde a lo indicado por el laboratorio acreditado.

5.1.1.6. Procesamiento de datos

Los resultados obtenidos fueron digitalizados y ordenados en una base de datos (hojas de cálculo), y se empleó gráficos de líneas o barras.

Se realizó la caracterización hidroquímica para clasificar las facies (tipo de agua) y los procesos químicos en la muestra, considerando la concentración de los iones mayoritarios como calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y parámetros de campo como la conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto y potencial de hidrógeno.

5.1.1.7. Criterios de evaluación

Las aguas residuales del sobrenadante del depósito de relaves y pozas de subdrenaje serán caracterizadas utilizando diagramas de concentración de parámetros fisicoquímicos y de metales totales; asimismo, se realizará la interpretación hidrogeoquímica en base a los iones disueltos.



La caracterización hidroquímica permitió clasificar las facies (tipo de agua) y los procesos químicos en aguas residuales, considerando la concentración de los iones mayoritarios del agua como calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y parámetros de campo como la conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto y potencial de hidrógeno. Esto sirvió para determinar la relación que existe entre las aguas residuales y el cuerpo de agua receptor.

Para esto, se considerará la serie analítica, el balance iónico y los diagramas hidroquímicos que se detallan a continuación.

- Selección de la serie analítica

La serie analítica contemplará los parámetros medidos para describir las propiedades de los componentes químicos del agua subterránea:

- Parámetros fisicoquímicos: pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, carbonatos y bicarbonatos.
- Parámetros Inorgánicos: sulfatos y cloruros.
- Metales totales y metales disueltos: Al, Ag, Sb, As, Be, Ba, B, Bi, Cd, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Hg, Se, Sn, Sr y Zn.

- Balance iónico

El balance iónico (B.I) determinará el equilibrio porcentual de las cargas en las muestras, ya que cuando las sales se disuelven en agua para formar iones, los aniones son atraídos al polo positivo del agua mientras que los cationes son atraídos al polo negativo. Los valores se encuentran entre -20 % y +20 %.

- Diagramas

Con el software libre «Diagrams» se elaborará los diagramas de Stiff, Piper, Ficklin que permitirán caracterizar las aguas en función a la concentración de sales, su predominancia catiónica y aniónica (tipo de agua) e interacción con la parte orgánica y roca. Estos aspectos constituyen una herramienta para identificar distintas reacciones fisicoquímicas y procesos modificadores de la composición química del agua en un acuífero como los procesos que se producen desde la zona de recarga hasta la zona de descarga, procesos de disolución-precipitación, intercambio iónico, etc.

Diagrama de Stiff

Este diagrama está compuesto por 3 ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Na^+ se confronta con el Cl^- , Ca^{+2} , HCO_3^- , Mg^{+2} y SO_4^{-2} . Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/L (Figura 5.1).

Este tipo de diagrama: por un lado, permite visualizar diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica).

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

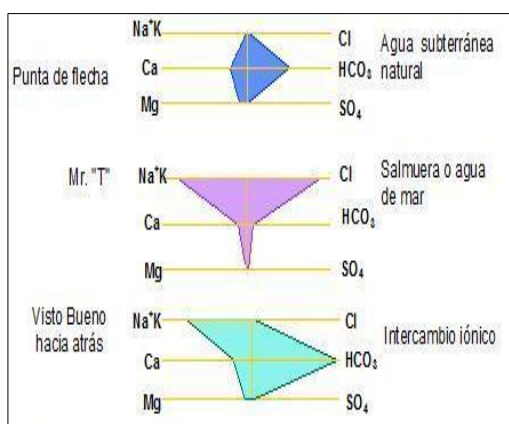


Figura 5.1. Diagrama de Stiff

Diagrama de Piper

Este diagrama incluye la interacción simultánea entre aniones y cationes. Las aguas químicamente similares quedan agrupadas en áreas definidas dentro del diagrama. Está formado por 2 triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes están representados por Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ y los vértices del triángulo de aniones, por SO_4^{2-} , Cl^- y HCO_3^- . Los datos de los diagramas triangulares se proyectan en un rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de cationes y aniones (Figura 5.2).

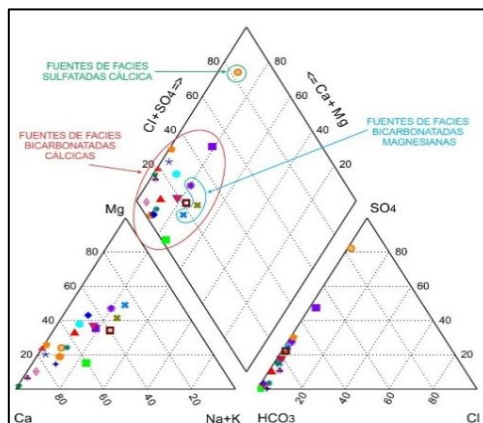


Figura 5.2. Diagrama de Ficklin

Diagrama de Ficklin

Ficklin *et. al* (1992) desarrolla en este diagrama una clasificación para aguas de mina y drenaje natural en zonas mineralizadas, dicha clasificación está basada en el pH vs. la suma de las concentraciones de los principales metales disueltos: Zn, Cu, Cd, Co, Ni y Pb. Los metales Al, Fe y Mn no son considerados en este diagrama por tener comportamientos geoquímicos diferentes (Figura 5.3).

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

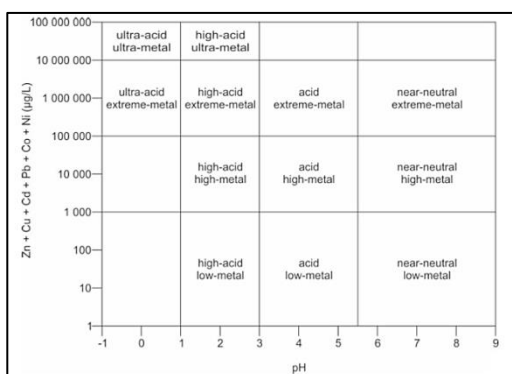


Figura 5.3. Diagrama de Ficklin

5.1.2. Tomografía de resistividad eléctrica

A continuación, se detalla la metodología para el estudio de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) en el sector dique de protección (R4) del depósito de relaves Huachuacaja-quebrada Huachuacaja.

Denominada también tomografía eléctrica, es una técnica geofísica para obtener imágenes de las estructuras subsuperficiales del subsuelo a partir de medidas eléctricas efectuadas sobre la superficie por una distribución de multielectródos.

Mediante la TRE se obtuvo un modelo en 2 dimensiones (2-D), el cual tomó en cuenta los cambios de resistividad en las direcciones vertical y horizontal, siendo obtenidos a lo largo de la línea de investigación.

El equipo de TRE consta de los siguientes instrumentos: un receptor, un transmisor, un motor generador y accesorios, los cuales siguiendo los procedimientos de campo según configuración que se utilizó en la presente EAC, se ubicaron los componentes de campo de TRE como se muestra en la Figura 5.4.

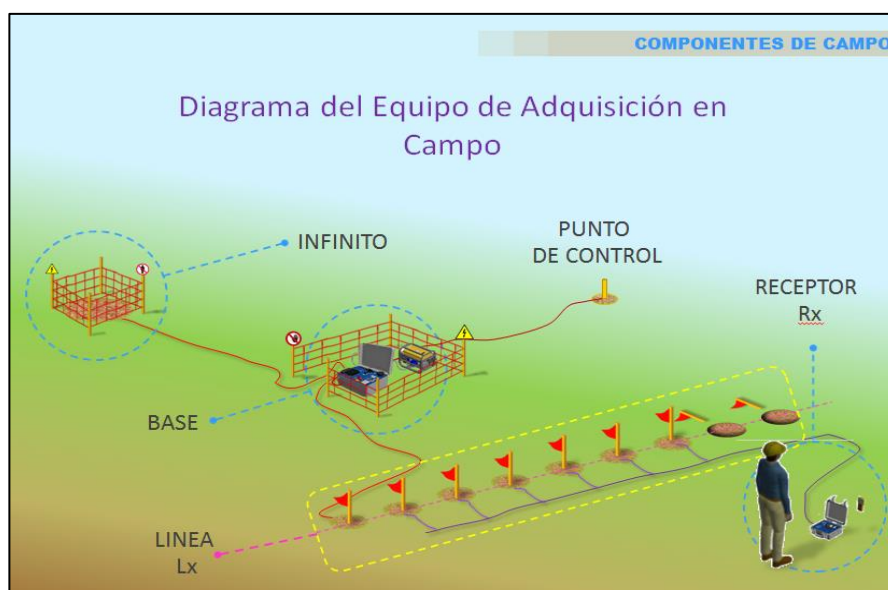


Figura 5.4. Componentes de campo de tomografía de resistividad eléctrica



5.1.3.1 Guías utilizadas para la evaluación

Para la tomografía de resistividad eléctrica se utilizaron las guías listadas en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Guías empleadas en la tomografía de resistividad eléctrica

Nombre	Código de referencia	Entidad/Autor	País	Año
Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation	ASTM- D6431-99	American Society for Testing and Materials	Estados Unidos	2010
Use of Airborne Surface and Borehole Geophysical Techniques at Contaminated Sites	EPA/625/R-92/00	U.S Environmental Protection Agency	Estados Unidos	1993
Electrical Imaging survey for environmental and engineering studies	N.A.	Meng Heng Loke	Tailandia	2000

N.A.: No aplica

5.1.3.2 Ubicación de vértices de líneas de tomografía de resistividad eléctrica

El equipo técnico profesional del OEFA realizó 4 líneas de tomografía de resistividad eléctrica, en las acciones de campo de octubre de 2020.

Las coordenadas de inicio y fin se resumen en la Tabla 5.4, las coordenadas intermedias se presentan en el Anexo A.

Tabla 5.4. Coordenadas de inicio y fin de cada línea de tomografía de resistividad eléctrica

Líneas de tomografía	Progresiva	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18L		Separación de electrodos	Distancia total (m)	Descripción de la línea
		Este (m)	Norte (m)			
ERT-05	Inicio 0	358544	8810932	0	80	Línea ERT-05 ubicado a 1 metro aproximadamente al lado norte del Depósito de Relaves Huachuacaja (Dique de contención de agua -R4) con una longitud de 80 metros.
	Final 80	358618	8810905	5		
ERT-06	Inicio 0	358363	8810915	0	150	Línea ERT-06, ubicado a 8 metros aproximadamente al lado norte del Depósito de Relaves Huachuacaja (Dique de contención de agua -R4) con una longitud de 150 metros.
	Final 150	358507	8810939	10		

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

Líneas de tomografía	Progresiva	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18L		Separación de electrodos	Distancia total (m)	Descripción de la línea
		Este (m)	Norte (m)			
ERT-07	Inicio 0	358540	8810963	0	80	Línea ERT-07 ubicado a 40 metros aproximadamente al lado norte del Depósito de Relaves Huachuacaja (Dique de contención de agua -R4) con una longitud de 80 metros.
	Final 80	358616	8810939	5		
ERT-08	Inicio 0	358265	8810985	0	250	Línea ERT-08 , ubicado a 70 metros aproximadamente al lado norte del Depósito de Relaves Huachuacaja (Dique de contención de agua -R4) con una longitud de 250 metros.
	Final 250	358515	8810990	10		

Para la ubicación de la línea de tomografía de resistividad eléctrica, se procedió primero a realizar un recorrido por toda la zona de influencia comprendida en el ámbito estudio de la UF Colquijirca. Se realizó, con la finalidad de determinar las zonas de interés y accesibilidad para el desarrollo del trabajo de campo. Las coordenadas de ubicación de la línea de TRE y los datos de campo obtenidos se encuentran a detalle en el Anexo A.

En campo, el trabajo consistió en la toma de datos de las lecturas de emisión de corriente eléctrica enviada por el transmisor a través del cable de corriente y electrodos hacia el terreno, para ello se realizó la implantación del infinito (Inf), el cual se localizó lo suficientemente lejos de la línea de medición, 10 veces el espaciamiento de electrodos (dipolo), para atenuar el efecto por acoplamiento de señal con relación a los dipolos de medida distribuidos a lo largo del perfil, considerando la recepción del potencial eléctrico y el registro de sus valores a través del receptor. Para la realización del trabajo en campo se mantuvo una comunicación constante entre el operador del transmisor-receptor y el personal de apoyo mediante el uso de radios móviles.



En el desarrollo de las mediciones en el perfil de TRE, el operador transmisor (TX) realizó el envío de corriente teniendo en consideración parámetros para la obtención de una buena señal que certifique valores representativos del área y procedimientos de seguridad, y siempre en coordinación con el personal de apoyo encargado de los cables de emisión de corriente para que no manipulen los cables mientras se envía energía; seguido se consideró el valor de la intensidad de corriente (mA) al operador del receptor Elrec Pro, valor que se ingresa en el receptor y se realizó las mediciones por cada estación. En cada medición se consideró los valores de resistividad óptimos y una vez registrado y almacenado en el receptor, el operador de receptor (Rx) indicó al operador de transmisor (TX) de corriente que corte la emisión y este a su vez indicó al personal de cable de corriente que está cortada y así puedan avanzar a la siguiente estación.

5.1.2.3. Parámetros de adquisición

Los parámetros utilizados en la adquisición de datos se muestran a continuación en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Parámetros de adquisición de tomografía de resistividad eléctrica

Parámetros	Modo de adquisición
Forma de medición	Dominio de Tiempo
Configuración de electrodos	Polo – Dipolo
Distancia del dipolo	5 metros (para las líneas ERT-03, ERT-04, ERT-05, ERT-07), 10 metros (para las líneas ERT-06, ERT-08)
Profundidad máxima de alcance	21 metros (para las líneas para las líneas ERT-03, ERT-04, ERT-05, ERT-07), 43 metros (para las líneas para las líneas ERT-06, ERT-08)
Niveles de investigación medidos (n)	Desde n=1 a n=10
Tiempo de sincronización	2 segundos
Stack (apilamiento)	4 – 6 por estación

Las coordenadas de ubicación de cada electrodo (estación) tomadas en las líneas de tomografía fueron almacenadas en una base de datos. Durante la adquisición de datos se siguieron los procedimientos de seguridad y de control de calidad en campo.

Los datos de campo fueron almacenados en la memoria interna del receptor del equipo ELREC Pro, considerando nombre y ubicación de cada línea, fecha y hora de lectura, y distancia entre los electrodos de medida y de emisión de corriente. Además, se controlaron los valores como intensidad de corriente, voltaje primario (Vp), potencial natural (SP), tiempo de dominio de las lecturas, desviación estándar de los *stack* de lectura y resistividad aparente (Rho).

Con esta información se generaron las pseudosecciones de resistividad aparente, mediante ellas se realizó el primer control de calidad de datos para su procesamiento, que consistió en validar y aceptar los valores menores al 5 % de la desviación estándar de los datos de potencial primario de cada dipolo.

5.1.2.4. Equipos utilizados

Los equipos utilizados para la tomografía de resistividad eléctrica se detallan en el Anexo A.



5.1.2.5. Aseguramiento de la calidad

El control de calidad se realizó antes de la adquisición de datos, en la calibración del equipo receptor, durante la adquisición de datos y en el proceso de inversión de los datos geofísicos, como se mencionó en el Anexo B.

5.1.2.6. Procesamiento de datos

A continuación, se describen los procesos realizados para obtener las pseudosecciones de resistividad y los resultados de los modelos de inversión de datos.

Base de datos

Primero: Se realizó el levantamiento de coordenadas con un GPS de la marca Garmin y sus datos fueron almacenados en su memoria interna, posteriormente son descargados y almacenados en una base de datos.

Segundo: Los datos de resistividad obtenidos en campo fueron almacenados en la memoria interna del receptor, principalmente se consideró lo siguiente: nombre y ubicación de cada línea, distancia entre los electrodos de medida, distancia de los electrodos de emisión de corriente, los valores de intensidad de corriente, voltaje primario (V_p), potencial natural (SP), el tiempo de dominio de las lecturas (2000 ms), la desviación estándar de los *stack* de lectura, la fecha y hora de lectura y los valores de resistividad aparente (Rho).

Tercero: Con esta información se procedió a generar los primeros resultados como pseudosecciones de resistividad aparente, a través del cual se realiza un control de calidad de los datos observando, los errores de la desviación estándar de los datos del potencial primario en cada dipolo, cuyos valores menores al 5 % son aceptados para el procesamiento de estos.

Proceso de inversión

Primero: La base de datos previamente validada y empleada para la generación de las pseudosecciones se exportó a un formato específico de software para el proceso de inversión.

Segundo: Se realizó el control de calidad (QC) de los datos de campo, en el software de procesamiento e inversión, tal como se indicó Anexo B.

Tercero: Se realizó el proceso de inversión, el cual tuvo por objetivo obtener un modelo 2-D de las resistividades reales a partir de los datos de las resistividades aparentes obtenidas en campo. Esta técnica de inversión se basó en realizar un proceso iterativo con el fin de obtener un modelo de resistividades reales.

En este caso se aplicó la inversión 2D mediante el software libre Res2DInv, que realizó de manera simultánea la inversión de los parámetros de resistividad en conjunto con la topografía. Este software empleó un modelo matemático de elementos finitos, el cual es un método robusto para resaltar los contrastes geológicos o anomalías producidas por cambios en la resistividad (resaltar la geometría del cuerpo).

El proceso de inversión está basado en el teorema de inversión mediante la determinación de modelos directos de solución para los datos y a partir de estos modelos se realiza una solución mediante medidas indirectas y el proceso busca el modelo que se ajuste a los

valores, obteniendo de esta manera una solución más precisa para las anomalías determinadas con las pseudosecciones.

5.1.2.7. Criterios para la interpretación de resultados

Los perfiles de tomografía muestran la distribución de resistividades en profundidad, la interpretación de estos valores se realizó en base al conocimiento de resistividades características de distintos materiales, presentadas en la Tabla 5.6 y Figura 5.5.

Tabla 5.6. Resistividad característica de distintos materiales

Material	Resistividad (Ohm.m)
Rocas ígneas y metamórficas	
Granito	$5 \cdot 10^3 - 10^6$
Basalto	$10^3 - 10^6$
Esquistos	$6 \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^7$
Mármol	$10^2 - 2,5 \cdot 10^8$
Cuarcita	$10^2 - 2,5 \cdot 10^8$
Rocas sedimentarias	
Arenisca	$8 - 4 \cdot 10^3$
Pizarra	$20 - 2 \cdot 10^3$
Calizas	$50 - 4 \cdot 10^2$
Suelo y agua	
Arcillas	$1 - 100$
Aluvial	$10 - 800$
Agua subterránea (dulce)	$10 - 100$
Agua de mar	$0,2$
Compuestos químicos	
Hierro	$9,074 \cdot 10^{-8}$
Cloruro potásico 0,01M	$0,708$
Cloruro sódico 0,01M	$0,843$
Ácido acético 0,01 M	$6,13$
Xyleno	$6,998 \cdot 10^{16}$

Fuente: Loke (1999), en Ravelo (2007)

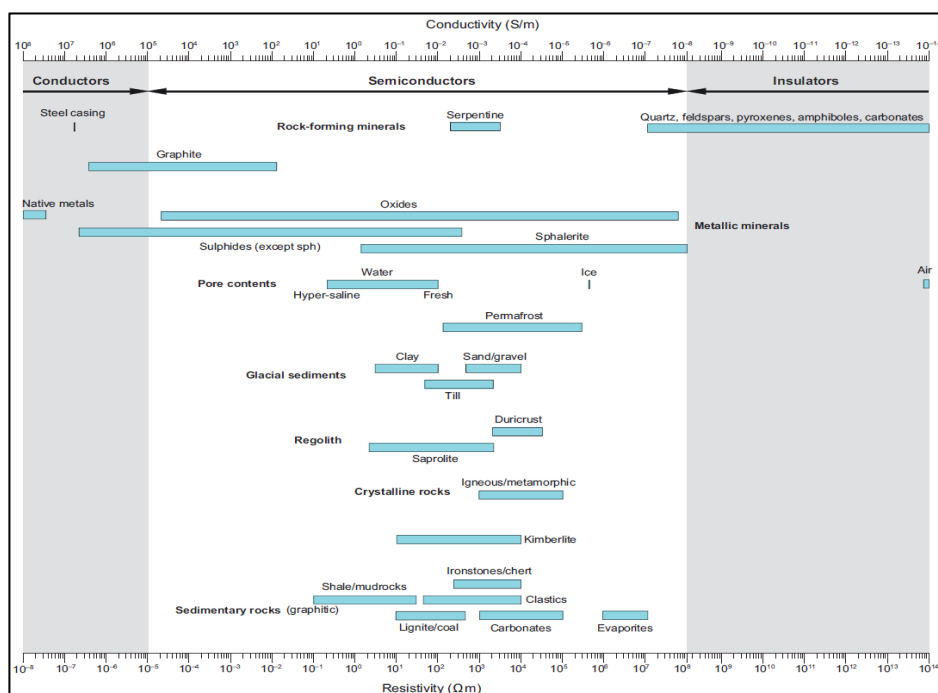


Figura 5.5. Resistividad y conductividad característica de distintos materiales

Fuente: Dentith y Mudge (2014)

También, mencionar que, los factores geológicos pueden incrementar o disminuir la resistividad de las rocas o materiales presentes en el área de estudio (Figura 5.6).

Alteración argílica	↓
Disoluciones	↓
Fracturación	↓
Intrusión de aguas salinas	↓
Cizallamiento	↓
Alteración superficial	↓
Compactación	↑
Precipitación de carbonatos	↑
Silicificación	↑
Metamorfismo	↕
↑ Aumenta ↓ Disminuye	
↕ Puede variar en ambos sentidos	

Figura 5.6. Factores geológicos que incrementan o disminuyen la resistividad

5.2. Objetivo específico 2: Determinar la influencia de los elementos o compuestos de preocupación del efluente minero de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en la quebrada Andacancha

5.2.1. Caracterización geológica

La caracterización geológica (mapeo geológico) consistió en la descripción litológica, estructural, alteraciones y mineralización en afloramientos rocosos y depósitos cuaternarios.

Las referencias de la geología regional corresponden al cuadrángulo de Cerro de Pasco - 22k, realizado por Quispesivana (1996) y que formó parte de la Carta Geológica Nacional (CGN) a escala 1:100 000 del Ingemmet. Asimismo, se consideraron las actualizaciones a escala 1:50 000 de los cuadrantes 22k-4 realizado por Rodríguez (2000) y 22k-3 realizado por Cueva, Rodríguez y Romero (2008). La referencia local corresponde a los estudios realizados por el administrado, complementado con el cartografiado realizado por el OEFA.

5.2.1.3. Referencias utilizadas para la caracterización geológica

Las referencias que se tomaron en cuenta para la caracterización geológica corresponden a los servicios geológicos del Perú, Colombia, Chile, Estados Unidos y Reino Unido; y se listan en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Referencias utilizadas para la caracterización geológica

Referencia	Sección	País	Institución/autor	Año
Manual de estándares de cartografía para la digitalización de los mapas geológicos CGN a escala 1:100 000	Toda la guía	Perú	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (Ingemmet)	2016
<i>Basic Geological Mapping</i>	Toda la guía	Reino Unido	Richard J. Lisle, Peter Brabham, y John Barnes	2011
<i>Geological field techniques</i>	Toda la guía	Reino Unido	Angela L. Coe, Tom W. Argles, David A. Rothery y Robert A. Spicer	2010
<i>FGDC Digital Cartographic Standard</i>	Toda la	Estados	Servicio Geológico de los Estados	2006



Referencia	Sección	País	Institución/autor	Año
<i>for Geological Map Symbolization</i>	guía	Unidos	Unidos (USGS, en inglés <i>United States Geological Survey</i>)	
<i>Geological Structures and Maps</i>	Toda la guía	Reino Unido	Richard J. Lisle	2004
Estándares cartográficos y de manejo de información gráfica para mapas geológicos	Toda la guía	Colombia	Servicio Geológico Colombiano (Ingeominas)	2001

5.2.1.4. Ubicación de puntos de caracterización geológica

En la Tabla 5.8 se presenta la ubicación de las zonas de caracterización geológica.

Tabla 5.8. Ubicación de puntos de caracterización geológica

N.º	Código de punto	Coordenadas UTM WGS84 – Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
		Este (m)	Norte (m)		
1	CG-COL1	356891	8807952	4208	Afloramiento de roca ubicado en la margen izquierda del río San Juan, aproximadamente a 350 m al este de la descarga de las aguas turbinadas de la C.H. de Jupayragra
2	CG-COL2	356617	8807900	4171	Depósito cuaternario ubicado en la margen izquierda del río San Juan, aproximadamente a 80 m al este de la descarga de las aguas turbinadas de la C.H. de Jupayragra
3	CG-COL3	357278	8806609	4169	Depósito cuaternario ubicado en la margen derecha del río San Juan, aproximadamente a 500 m al oeste del CP Cinco Manantiales
4	CG-COL4	358107	8805312	4163	Depósito cuaternario ubicado en la margen derecha de la quebrada Yurac Yacu (sin flujo), aproximadamente a 300 m al suroeste de la caja colectora de la Relavera N.º 6
5	CG-COL5	359740	8805126	4154	Depósito cuaternario ubicado en la margen derecha del río San Juan, aproximadamente a 650 m al sureste de la Poza 1A
6	CG-COL6	360488	8805443	4165	Afloramiento de roca ubicado en la margen izquierda del río San Juan, aproximadamente a 20 m al norte del PAM Relave Colonial Marcapunta B
7	CG-COL7	360283	8805745	4153	Afloramiento de roca ubicado en la margen izquierda del río Andacancha, aproximadamente a 20 m al sureste de la bocamina Borjes
8	CG-COL8	359959	8805985	4152	Afloramiento de roca ubicado en la margen izquierda del río Andacancha, aproximadamente a 130 m al noroeste de la bocamina Santa María
9	CG-COL9	358955	8807126	4153	Afloramiento de roca ubicado en la margen derecha del río Andacancha, aproximadamente a 140 m al suroeste del punto de monitoreo E-13 (poza de infiltración del depósito de relaves Huachuacaja)
10	CG-COL10	358123	8807544	4225	Afloramiento de roca ubicado aproximadamente a 550 m al norte de la tolva de gruesos de la Planta concentradora Huaracaca
11	CG-COL11	358605	8807906	4182	Afloramiento de roca ubicado en el borde oeste del depósito de relaves Huachuacaja, aproximadamente a 100 m al este del canal de aguas de no contacto de la quebrada Huachuacaja
12	CG-COL12	359477	8810023	4185	Afloramiento de roca ubicado en el borde este del depósito de relaves Huachuacaja, aproximadamente a 250 m al norte de la Planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI)
13	CG-COL13	359813	8812329	4326	Afloramiento de roca ubicado en la margen izquierda de la quebrada Mishihuanan, aproximadamente a 60 m al noroeste del depósito de desmonte Condorcayán



N.º	Código de punto	Coordenadas UTM WGS84 – Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
		Este (m)	Norte (m)		
14	CG-COL14	359734	8811996	4312	Afloramiento de roca ubicado en la margen izquierda de la quebrada Mishihuanan, aproximadamente a 30 m al oeste del depósito de desmonte Condor cayán
15	CG-COL15	359905	8811592	4321	Afloramiento de roca ubicado en la margen izquierda de la quebrada Andacancha, aproximadamente a 330 m al suroeste del polvorín del tajo Norte
16	CG-COL16	360096	8810912	4301	Afloramiento de roca ubicado en la margen izquierda de la quebrada Andacancha, aproximadamente a 250 m al norte del piezómetro PZ-CN-3
17	CG-COL17	361057	8809555	4291	Afloramiento de roca ubicado en el sector Esmelter, aproximadamente a 150 m al sur del depósito de desmonte Sur
18	CG-COL18	358208	8809324	4225	Afloramiento de roca ubicado en el borde oeste del depósito de relaves Huachuacaja, aproximadamente a 270 m al sureste del piezómetro PRH09-03
19	CG-COL19	358148	8808818	4223	Afloramiento de roca ubicado en el borde oeste del depósito de relaves Huachuacaja, aproximadamente a 650 m al sur del piezómetro PRH09-03
20	CG-COL20	359309	8807241	4170	Depósito cuaternario ubicado en la margen izquierda del río Andacancha, aproximadamente a 270 m al sureste del dique del depósito de relaves Huachuacaja
21	CG-COL21	361888	8807143	4206	Depósito cuaternario ubicado en la ladera este del cerro Marcapunta, aproximadamente a 1660 m al sur del C.P. Nuevo Smelter

Fuente: Reporte de campo (Anexo A)

5.2.1.5. Materiales utilizados

Los materiales utilizados para la caracterización geológica se detallan en Anexo A.

5.2.1.6. Criterios de evaluación

Las descripciones macroscópicas en campo (tipo de roca e identificación de minerales primarios, secundarios y accesorios) de afloramientos rocosos y depósitos cuaternarios se realizaron *in situ*, además, se tomaron datos de rumbo y buzamiento de estratos, fallas geológicas, fracturas y estructuras mineralizadas (cuerpos, mantos y vetas). Estos datos fueron plasmados sobre un mapa topográfico a escala 1:100000, obteniendo un mapa geológico de campo.

Los puntos de caracterización geológica (POG) y el mapa de campo fueron georreferenciados y digitalizados en el software ArcGIS 10.3, para elaborar el mapa geológico local. Además, se generaron secciones geológicas con la finalidad de entender el contexto geológico del subsuelo de las zonas evaluadas.

5.2.2. Efluente minero

La metodología para la toma de muestras de efluente minero contempla la ubicación de punto de muestreo, los parámetros, los métodos de análisis, los equipos, el aseguramiento de la calidad, los criterios de comparación y el análisis de datos; estos procedimientos se detallan en los siguientes ítems.



5.2.2.1. Guías utilizadas para la evaluación

En la Tabla 5.9 se presenta el protocolo de referencia para la colecta de muestras del único efluente minero⁸ ubicado en el área de influencia de la UF Colquijirca. Asimismo, la preservación o conservación de las muestras se realizaron siguiendo las indicaciones del protocolo y del laboratorio acreditado.

Tabla 5.9. Protocolo utilizado para el muestreo de efluentes minero

Referencia	País	Institución	Año	Sección
Protocolo de monitoreo de calidad de agua del Ministerio de Energía y Minas – Sub sector Minería	Perú	Ministerio de Energía y Minas	1994	Manual completo

5.2.2.2. Ubicación de punto de muestreo

El punto de efluente minero se estableció en base a lo declarado en los IGA de la UF Colquijirca. En la Tabla 5.10 se detalla la ubicación del punto de muestreo; mientras que su distribución espacial se puede observar en el Anexo A.

Tabla 5.10. Ubicación de los puntos de muestreo de efluente minero

N.º	Cuerpo receptor/lugar/poblado	Puntos de muestreo	Código IGA	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18 L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
				Este (m)	Norte (m)		
1	Quebrada Andacancha	--	R-5*	359359	8810155	4176	Descarga de efluente proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Industriales de la UM Colquijirca

*: Tomado del Quinto ITS Reubicación de Oficinas Administrativas en Marcapunta Norte e Implementación de Duchas y Vestuarios en Marcapunta Norte, Marcapunta Sur y Ex campamento Graña - Unidad Minera Colquijirca

5.2.2.3. Parámetros y métodos de análisis

Los parámetros evaluados se presentan en la Tabla 5.11, los cuales fueron elegidos de acuerdo con la actividad desarrollada por el administrado. En cada uno de los puntos de muestreo se analizaron in situ los parámetros temperatura, potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y potencial redox (ORP).

Tabla 5.11. Parámetros y metodologías de la muestra de efluente minero de la UF Colquijirca

N.º	Parámetro	Unidad	Método de ensayo
1	Cianuro Total	mg/L	Método Colorimétrico
2	Cianuro Wad	mg/L	Método Colorimétrico
3	Sólidos totales suspendidos (SST)	mg/L	Gravimetría
4	Sólidos totales disueltos (STD)	mg/L	Gravimetría
5	Carbonatos	mg/L	Método de titulación
6	Bicarbonatos	mg/L	Método de titulación
7	Cloruros	mg/L	Cromatografía iónica
8	Fluoruro	mg/L	Cromatografía iónica
9	Nitratos	mg/L N-NO ₃	Cromatografía iónica
10	Nitritos	mg/L N-NO ₂	Cromatografía iónica
11	Sulfatos	mg/L	Cromatografía iónica
12	Metales totales + mercurio	mg/L	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)

⁸ Según el Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM, y de acuerdo a la presente EAC, se define como: Cualquier flujo regular o estacional de sustancia líquida descargada a los cuerpos receptores, que proviene de cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales asociado con actividades mineras o conexas, incluyendo plantas de tratamiento de efluentes mineros, efluentes industriales y efluentes domésticos.



N.º	Parámetro	Unidad	Método de ensayo
13	Metales disueltos + mercurio	mg/L	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
14	Cromo hexavalente	mg/L	espectrometría ultravioleta-visible (UV-VIS)

Fuente: Reporte de campo (Anexo A) y reporte de resultados (Anexo B)

5.2.2.4. Equipos utilizados/Herramientas utilizadas

Los equipos utilizados para la medición de parámetros *in situ*, se detallan en el Anexo A.

5.2.2.5. Aseguramiento de la calidad

El aseguramiento de la calidad en la etapa de campo, consideró la verificación y ajuste de los sensores de los equipos multiparámetro, antes de inicio de muestreo, cuyos registros se presentan en el Anexo A.

Para el aseguramiento de la calidad de los resultados de laboratorio se tomó un duplicado del parámetro metales totales. De acuerdo al Protocolo de monitoreo de calidad de agua-subsector minería: «... el 10% de las muestras se prepara rutinariamente como duplicados». También se evaluó blancos viajeros y de campo, acorde a lo indicado por el laboratorio acreditado.

5.2.2.6. Procesamiento de datos

Los resultados obtenidos fueron digitalizados y ordenados en una base de datos (hojas de cálculo), para luego ser comparados referencialmente, mediante el uso de gráficos de líneas o barras.

Se realizó la caracterización hidroquímica para clasificar las facies (tipo de agua) y los procesos químicos en el efluente, considerando la concentración de los iones mayoritarios del efluente como calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y parámetros de campo como la conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto y pH. De igual modo, permitirá conocer la influencia y el medio de transporte de posibles contaminantes provenientes de los procesos de tratamiento de aguas de mina.

5.2.2.7. Criterios de evaluación

Los resultados de efluente minero fueron comparados con los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas, aprobados mediante Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM, tal cual se establece en el IGA⁹ del administrado. Cabe precisar que, para el análisis histórico se considerará la comparación con los resultados reportados al Ministerio de Energía y Minas (Minem) por el administrado.

Además, se realizó la caracterización hidroquímica de las aguas superficiales evaluadas, considerando lo descrito en el ítem 5.1.1.7 Criterios de evaluación.

⁹ Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de Operaciones a 18,000 TMD de Sociedad Minera El Brocal S.A.A., aprobado mediante Resolución Directoral N.º 361-2012-MEM-AAM



5.2.3. Agua superficial

Se presenta la metodología empleada para la caracterización de la calidad de agua superficial.

5.2.3.1. Guías utilizadas para la evaluación

La metodología para la toma de muestras de agua superficial en el ámbito de la UF Colquijirca se enmarcó en la sección 6 «Monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales» del «Protocolo Nacional para el Monitoreo de Calidad de Recursos Hídricos Superficiales»¹⁰, el cual establece los lineamientos generales y criterios técnicos que se aplicaron en las actividades de monitoreo de la calidad de agua: logística necesaria, establecimiento de los puntos de muestreo, preparación de materiales, equipos e indumentaria de protección, seguridad en el trabajo de campo, procedimiento para la toma de muestras mediante el uso de un receptor (balde), preservación, llenado de la cadena de custodia, almacenamiento, conservación y transporte de muestras (Tabla 5.12). Para el análisis de las muestras de agua colectada, fue realizado por un laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (Inacal)¹¹.

Tabla 5.12. Guías utilizadas para el muestreo de agua superficial

Referencia	País	Institución	Año	Sección
Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales	Perú	Autoridad Nacional del Agua (ANA)	2016	Capítulo 6
Manual de hidrometría	Perú	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi)	2016	Manual completo
Guía de prácticas hidrológicas (OMM No.168)	Países que integran la OMM	Organización Meteorológica Mundial (OMM)	2004	Capítulo 11

5.2.3.2. Ubicación de puntos de muestreo

Los puntos de muestreo de agua superficial se establecieron tomando como referencia los puntos declarados en el instrumento de gestión ambiental del administrado «Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de Operaciones a 18,000 TMD de Sociedad Minera El Brocal S.A.A. aprobado mediante Resolución Directoral N.º 361-2012-MEM-AAM», los cuales fueron validados en la ejecución; asimismo se incluyeron puntos de acuerdo a lo observado en campo.

Se establecieron 9 puntos de muestreo distribuidos en el ámbito de estudio. En la Tabla 5.13 se detalla la cantidad de puntos muestreados, los cuerpos de agua evaluados y la ubicación de los puntos de muestreo. La distribución espacial de los puntos se puede observar en los mapas de ubicación en el Anexo A.

¹⁰ Protocolo Nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales, aprobado mediante Resolución Jefatural N.º 010-2016-ANA, del 11 de enero de 2016.

¹¹ El Instituto Nacional de Calidad (Inacal) es un Organismo Público Técnico Especializado adscrito al Ministerio de la Producción, es el ente rector y máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional para la Calidad. Son competencias del INACAL la normalización, acreditación y metrología, acorde con lo previsto en las normas que regulan las materias respectivas.

**Tabla 5.13.** Ubicación de los puntos de muestreo de aguas superficial

N.º	Cuerpo receptor/lugar/poblado	Código OEFA	Código IGA*	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18 L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
				Este (m)	Norte (m)		
1	Bofedal	B-1	--	360019	8805650	4148	Bofedal ubicado en la margen izquierda del río Andacancha, aproximadamente a 350 m al suroeste de la bocamina Borges
2	Bofedal	B-1A	--	360004	8805649	4135	Bofedal ubicado en la margen izquierda del río Andacancha, aproximadamente a 360 m al suroeste de la bocamina Borges
3	Quebrada Andacancha	QAnda		359528	8811505	4203	Quebrada Andacancha ubicada aproximadamente 1.4 km aguas arriba del depósito de relaves Huachuacaja
4	Quebrada Andacancha	--	QHE-2	359348	8810121	4174	Quebrada Andacancha, a 40 m aguas abajo de la descarga del efluente R-5
5	Río Andacancha	RAnda6	--	359294	8807009	4159	Canal Este de coronación relavera Huachuacaja/quebrada Andacancha antes de su descarga al cauce natural del río Andacancha
6	Río Andacancha	RAnda5	--	359454	8806843	4156	Río Andacancha, 50 m aproximadamente aguas arriba del antiguo punto de control V-1
7	Río Andacancha	--	A-2	359661	8806639	4154	Río Andacancha, aproximadamente a 140 m aguas abajo del antiguo punto de control V-1
8	Río Andacancha	--	E-11	359987	8805478	4148	Río Andacancha, aproximadamente a 20 m antes de la confluencia del río San Juan.
9	Quebrada Huachuacaja	QHua	--	358618	8812246	4203	Quebrada Huachuacaja ubicada aproximadamente a 1 km aguas arriba del depósito de relaves Huachuacaja

*: Tomado de la Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de Operaciones a 18,000 TMD de Sociedad Minera El Brocal S.A.A., aprobado mediante Resolución Directoral N.º 361-2012-MEM-AAM

--: No aplica

5.2.3.3. Parámetros y métodos de análisis

Para la evaluación de calidad de agua superficial, se priorizaron los parámetros relacionados con las actividades desarrolladas por el administrado. Asimismo, en los puntos de muestreo se midieron los parámetros de campo: temperatura (T), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto y potencial redox (ORP).

La Tabla 5.14 presenta los parámetros que se evaluaron en agua superficial y la metodología usada para su análisis por el laboratorio acreditado por el Inacal.

Tabla 5.14. Parámetros y metodologías para agua superficial

N.º	Parámetro	Unidad	Método de ensayo
1	Cianuro Total	mg/L	Método Colorimétrico
2	Cianuro Wad	mg/L	Método Colorimétrico
3	Sólidos totales suspendidos (SST)	mg/L	Gravimetría
4	Sólidos totales disueltos (STD)	mg/L	Gravimetría
5	Carbonatos	mg/L	Método de titulación
6	Bicarbonatos	mg/L	Método de titulación
7	Cloruros	mg/L	Cromatografía iónica
8	Fluoruros	mg/L	Cromatografía iónica
9	Nitratos	mg/L N-NO ₃	Cromatografía iónica
10	Nitritos	mg/L N-NO ₂	Cromatografía iónica
11	Sulfatos	mg/L	Cromatografía iónica
12	Metales totales + mercurio	mg/L	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
13	Metales disueltos + mercurio	mg/L	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
14	Cromo hexavalente	mg/L	espectrometría ultravioleta-visible (UV-VIS)

Fuente: Reporte de campo (Anexo A) y reporte de resultados (Anexo B)

5.2.3.4. Equipos y materiales utilizados

Los equipos utilizados, los certificados de calibración, los registros de verificación y las herramientas para la evaluación ambiental se muestran en el Anexo A.

5.2.3.5. Aseguramiento de la calidad

El aseguramiento de la calidad en la etapa de campo, considero la verificación y ajuste de los sensores de los equipos multiparámetro. Todos los resultados fueron registrados en los formatos correspondientes y se presentan en los reportes de campo.

Para el aseguramiento de calidad de los resultados de laboratorio, se tomó un duplicado del parámetro metales totales. Para garantizar la representatividad de los resultados, se realizó como control de calidad la toma de muestras duplicados, un blanco viajero y un blanco de campo, según lo indicado en el «Protocolo Nacional para el Monitoreo de Calidad de Recursos Hídricos Superficiales» de la ANA.

5.2.3.6. Procesamiento de datos

Los resultados obtenidos fueron digitalizados y ordenados en una base de datos (hojas de cálculo), para luego ser comparados referencialmente, mediante el uso de gráficos de líneas o barras.

Se realizó la caracterización hidroquímica para clasificar las facies (tipo de agua) y los procesos químicos en el agua superficial, considerando la concentración de los iones mayoritarios como calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y parámetros de campo como la conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto y pH. De igual modo, permitirá conocer la influencia y el medio de transporte de posibles contaminantes provenientes de los procesos de tratamiento de aguas de mina.



5.2.3.7. Criterios de evaluación

Los resultados de los análisis de agua superficial fueron comparados con los valores de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua aprobados mediante Decreto Supremo N.º 002-2008-MINAM, Categoría 3-Riego de Vegetales y Bebida de Animales (en adelante, ECA para agua 2018 Cat.3), según las consideraciones del IGA¹² del administrado.

Además, se realizó la caracterización hidroquímica de las aguas superficiales evaluadas, considerando lo descrito en el ítem 5.1.1.7 Criterios de evaluación.

5.2.4. Sedimento

La metodología utilizada para el muestreo de sedimento de cuerpos de agua continentales contempla la selección de guías o protocolos, la ubicación de puntos de muestreo, determinación de parámetros y sus métodos de análisis, selección de los equipos, el aseguramiento de la calidad, los criterios de comparación y el análisis de datos; los cuales se detallan en los siguientes ítems.

5.2.4.1. Referencias utilizadas para la evaluación

Las referencias utilizadas para el muestreo de sedimento son detalladas en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15. Referencias para el muestreo de la calidad de sedimento

Protocolo o guía	Autoridad emisora	País	Sección	Año
Manual de métodos de muestreo y preservación de muestras de las sustancias prioritarias para las matrices prioritarias del PRONAME	Instituto nacional de ecología y cambio climático (INECC-CCA)	México	Sección 3.4	2010
Procedimiento para el muestreo de aguas y sedimentos para la determinación de metales	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Colombia	Sección 7.3, Sección 8, Sección 9.2.	2011
Manual técnico. Métodos de recolección, almacenamiento y manipulación de sedimentos para análisis químicos y toxicológicos (EPA-823-B-01-002)	Agencia para la Protección Ambiental (EPA)	Estados Unidos	Sección 2, 3.2.2, 4.4.2-4, 7	2001
Muestreo de sedimento			Sección 2, 3, 4, 5, 7.1-2, 9, 11	2016
U.S. Geological Survey (1994) Guidelines for collecting and processing samples of stream bed sediment for analysis of trace elements and organic contaminants for the National Water-Quality Assessment Program.			11, 15, 18, 19	1994

5.2.4.2. Ubicación de puntos de muestreo

Los puntos de muestreo de sedimento para la evaluación ambiental de la UF Colquijirca se ubicaron en los mismos puntos de muestreo de agua, y las tomas de muestras fueron en las mismas fechas; el muestreo se realizó en octubre de 2020. En la Tabla 5.16 se muestra la cantidad de puntos de muestreo por zona, los cuerpos de agua asociados y la ubicación de los puntos de muestreo. La distribución espacial de los puntos se puede observar en el mapa de ubicación en el Anexo A.

¹² Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de Operaciones a 18,000 TMD de Sociedad Minera El Brocal S.A.A., aprobado mediante Resolución Directoral N.º 361-2012-MEM-AAM.

**Tabla 5.16.** Ubicación de los puntos de muestreo de sedimento

N.º	Cuerpo de agua	Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18 L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		
1	Río Andacancha	E-11	359987	8805478	4148	Río Andacancha, aproximadamente a 20 m antes de la confluencia del río San Juan
2	Río Andacancha	A-2	359661	8806639	4154	Río Andacancha, aproximadamente a 140 m aguas abajo del efluente V-1
3	Río Andacancha	RAnda5	359454	8806843	4156	Río Andacancha, 50 m aproximadamente aguas arriba de la descarga del efluente V-1
4	Quebrada Andacancha	QHE-2	359348	8810121	4174	Quebrada Andacancha, a 40 m aguas a abajo de la descarga del efluente R-5
5	Quebrada Andacancha	QAnda	359528	8805286	4208	Quebrada Andacancha, ubicada aproximadamente 1,4 km aguas arriba del depósito de relaves Huachuacaja
6	Bofedal sin nombre	B-1A	360004	8805649	4135	Bofedal ubicado en el margen izquierdo del río Andacancha, aproximadamente a 369 m al sureste de la bocamina Borges

Nota: La precisión de la medición de las coordenadas fue de ± 3 m

5.2.4.3. Parámetros y métodos de análisis

En la matriz sedimento para todos los puntos de muestreo se consideró los parámetros de metales totales, incluido mercurio (9 puntos) y potencial de hidrogeno (9 puntos), además de los parámetros análisis granulométrico (5 puntos), materia orgánica (5 puntos), extracción secuencial de metales (4 puntos) y análisis mineralógico por difracción de rayos X (1 punto). En la Tabla 5.17 se presentan los parámetros y métodos de análisis.

Tabla 5.17. Parámetros evaluados y métodos de análisis

Parámetros	Unidad	Método de referencia	Descripción
Metales	mg/kg PS	EPA Method 3050 B. Rev. 2 (1996) EPA Method 6020 B Rev. 2 (2014)	Acid Digestion of Sediments, sludges and soils / Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry
Extracción secuencial de metales pesados por la metodología de Tessier	mg/kg PS	GEO-9016-PE. Extracción secuencial.	Lectura por Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry
Análisis mineralógico por difracción de rayos X	%	-	Determinación semicuantitativa de las fases cristalinas
Potencial de hidrogeno (pH)	Unidades de pH	El método de análisis de referencia es de acuerdo con lo establecido en el Decreto Supremo N.º 013-2010-AG-. Art. 12 del Ministerio de Agricultura	Relación suelo: agua 1:1
Materia orgánica	%		Walkley y Black, oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio
Análisis granulométrico	% arena, limo y arcilla		Método del hidrómetro

Fuente: Reporte de campo (Anexo A) y reporte de resultados (Anexo B)

5.2.4.4. Materiales utilizados

Los materiales utilizados para la evaluación ambiental de sedimento se detallan en el Anexo A.

5.2.4.5. Aseguramiento de la calidad

Debido a que no se cuenta con un protocolo nacional para el monitoreo y la evaluación de sedimentos de agua continental, se tomó un duplicado en uno de los puntos para el parámetro metales totales, tanto sus resultados como el cálculo de la diferencia porcentual relativa de la muestra original y duplicado, se detallan en el Anexo B.

5.2.4.6. Procesamiento de datos

Los resultados obtenidos fueron digitalizados y ordenados en una base de datos (hojas de cálculo), para luego ser comparados referencialmente según corresponda, mediante el uso de gráficos de líneas o barras.

Se han utilizado métodos y modelos estadísticos para sintetizar todos los parámetros de sedimento en solo 2 y agrupar puntos de muestreo por sus similitudes. Entre las técnicas más empleadas se incluyen el análisis de componentes principales (PCA, siglas en inglés de *Principal Component Analysis*), y el análisis de conglomerados (CA, siglas en inglés de *Conglomerate Analysis*). El PCA se usa ampliamente para reducir datos y extraer factores latentes que permitan analizar las relaciones entre las variables observadas (Farnham *et al.*, 2003; Gou *et al.*, 2007).

El PCA se realizó para extraer los componentes principales (PC, siglas en inglés de *Principal Component*) de los datos de muestreo de sedimento y así evaluar las variaciones espaciales y la posible fuente de metales pesados y otros compuestos. Si casi toda la variabilidad entre las muestras puede explicarse por una pequeña cantidad de PC, entonces las relaciones entre las muestras multivariadas pueden evaluarse mediante una simple inspección de una gráfica de 2 o 3 dimensiones. Por otro lado, el CA se realizó para clasificar los elementos de diferentes fuentes en función de las similitudes de sus propiedades químicas (Rahman *et al.*, 2014b). El agrupamiento jerárquico es el enfoque que proporciona relaciones de similitud entre cualquier muestra y todo el conjunto de datos (McKenna, 2003), y se ilustra típicamente mediante un dendrograma (Figura 5.7).

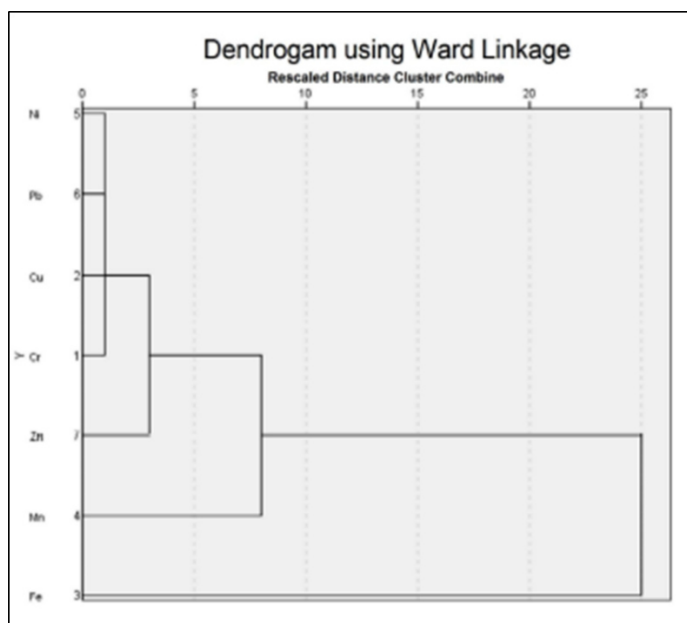


Figura 5.7. Dendrograma

Fuente: Magesh *et al.* (2017)



5.2.4.7. Criterios de evaluación

Los resultados fueron comparados, referencialmente, con las *Sediment Quality Guidelines* (SQG), de la *Canadian Environmental Quality Guidelines* (CEQG) del *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME) del 2002. Esta guía presenta un estándar científico para observar efectos biológicos adversos en sistemas acuáticos, para ello establece 2 tipos de valores y un rango: (i) ISQG (*Interim Sediment Quality Guidelines*), que corresponde al límite por debajo del cual ocurre rara vez efectos biológicos adversos sobre los ecosistemas acuáticos, (ii) PEL (*Probable Effect Level*), que corresponde al límite por encima del cual ocurre frecuentemente efectos biológicos adversos sobre los ecosistemas acuáticos, y (iii) al valor que se encuentra entre los valores ISQG y PEL, corresponde al rango de efecto posible dentro del cual ocurre ocasionalmente efectos biológicos adversos sobre los ecosistemas acuáticos.

5.2.5. Comunidades hidrobiológicas

Los diversos organismos pertenecientes a las comunidades hidrobiológicas están directamente relacionados entre sí, así como con el ecosistema acuático en el que coexisten. Es por ello importante analizar las comunidades hidrobiológicas y relacionarlas a los componentes no biológicos (agua superficial y sedimento). Estos resultados se obtienen a través de una serie de procedimientos, que son necesarios desarrollar tanto en campo como en gabinete. Estos procedimientos se describen a continuación.

5.2.5.1. Guías utilizadas para la evaluación

La colecta de muestras hidrobiológicas de las comunidades del perifiton (microalgas y microorganismos), macroinvertebrados acuáticos y peces tuvieron como base metodológica las técnicas de muestreo descritas en el manual «Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú». En esta guía se señala los criterios técnicos y lineamientos generales a aplicarse en la evaluación del componente hidrobiológico, el establecimiento de los puntos de monitoreo, materiales y equipos requeridos para la evaluación, equipos de protección personal, preservación de muestras, entre otros. Además, mediante una evaluación visual se utilizó el «Protocolo simplificado y guía de evaluación de la calidad ecológica de los ríos andinos (CERA-S)» para obtener la calidad hidromorfológica en el área de evaluación.

5.2.5.2. Ubicación de puntos de muestreo

Se evaluó un total de 6 puntos de muestreo para las comunidades hidrobiológicas. Los puntos de muestreo fueron designados en relación con los puntos de muestreo de agua superficial y sedimento; según lo verificado en el reconocimiento técnico ambiental y que presentaron condiciones de accesibilidad, importancia de uso, caudal del río y disponibilidad de microhábitats.

De acuerdo con los factores anteriormente descritos se colectaron muestras en el cauce principal o en la orilla del cuerpo de agua. En la Tabla 5.18 se presentan los puntos de muestreo de comunidades hidrobiológicas seleccionados.

**Tabla 5.18.** Ubicación de los puntos de muestreo de comunidades hidrobiológicas

Nº	Nombre cuerpo receptor	Código del punto de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		
1	Río Andacancha	E-11*	359987	8805478	4148	Río Andacancha, aproximadamente a 20 m. antes de la confluencia del río San Juan
2	Río Andacancha	A-2	359661	8806639	4154	Río Andacancha, aproximadamente a 140 m aguas abajo del antiguo punto de control V-1
3	Río Andacancha	RAnda5	359454	8806843	4156	Río Andacancha, 50 m aproximadamente aguas arriba del antiguo punto de control V-1
4	Quebrada Andacancha	QAnda	359528	8811505	4208	Quebrada Andacancha ubicada aproximadamente 1.4 km aguas arriba del depósito de relaves Huachuacaja
5	Quebrada Huachuacaja	QHua*	358618	8812246	4203	Quebrada Huachuacaja ubicada aproximadamente a 1 km aguas arriba del depósito de relaves Huachuacaja
6	Bofedal sin nombre	B-1 A	360004	8805649	4135	Bofedal ubicado en la margen izquierda del río Andacancha, aproximadamente a 369 m al sureste de la bocamina Borges

Nota: La precisión de la medición de las coordenadas fue de ± 3 m

*: Además de la colecta de macroinvertebrados y perifiton se realizó el esfuerzo de pesca

5.2.5.3. Parámetros y métodos de análisis

La Tabla 5.19 presenta los parámetros, métodos de ensayo y técnicas empleadas en el análisis de las comunidades hidrobiológicas, a través de los profesionales taxónomos de la DEAM.

Tabla 5.19. Parámetros, métodos y técnicas empleadas en el análisis de las comunidades hidrobiológicas

Matriz	Parámetro	Método	Técnica Empleada
Comunidades hidrobiológicas	Perifiton	SMEWW 10300C, 10300E. EPA 841-B-99-002	Periphyton. Sample Analysis. Sedgwick-Rafter Counts. Inverted Microscope Method Counts
	Macroinvertebrados bentónicos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF. Part 10500 C.1, 2. 23rd. Ed. 2017	Benthic Macroinvertebrates, Sample Processing and Analysis
	Peces	SMEWW 10600 D	Items 1. Identificación y conteo

SMEWW: Estándar Métodos para la Examinación de Agua y Agua Residuales

APHA-AWWA-WEF: Asociación Americana de Trabajos en Agua – Salud Pública Americana – Federación Ambiental



5.2.5.4. Materiales utilizados

Para la evaluación de comunidades hidrobiológicas se utilizó los materiales que se detallan en Anexo A.

5.2.5.5. Aseguramiento de la calidad

El aseguramiento de la calidad con respecto a las actividades en campo tuvo en cuenta lo descrito en el manual «Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y neuston (peces) en aguas continentales del Perú» del Minam. Lo relacionado al análisis de las muestras obedeció a los criterios de los especialistas (taxónomos) de la Dirección de Evaluación Ambiental del OEFA.

5.2.5.6. Procesamiento de datos

La evaluación de las comunidades hidrobiológicas consistió en la caracterización de las estructuras comunitarias del perifiton (microalgas y microorganismos) y macroinvertebrados bentónicos, la cual incluyó la riqueza, densidad de especies por taxones, diversidad alfa y calidad ecológica en base a los macroinvertebrados bentónicos. Así mismo, se determinó mediante análisis estadísticos las relaciones de las comunidades hidrobiológicas con las variables fisicoquímicas del agua y sedimento, además se calculó las diferencias significativas entre puntos de muestreo con respecto a la composición de especies.

a. Riqueza, densidad y diversidad alfa

La evaluación de la riqueza y la abundancia (densidad) de macroinvertebrados bentónicos y perifiton se desarrolló sobre la base de la categoría taxonómica «orden» y «phylum», respectivamente. Es necesario indicar, que los resultados de la densidad se analizaron en base a la suma total de las tres réplicas, donde para los macroinvertebrados bentónicos fue representado en individuos/0,27 m², cabe indicar que cada réplica de la muestra está representada en individuos/0,09 m²; asimismo el perifiton fue representado por organismos/cm² de un total de área muestreada de 75 cm², cabe precisar que cada réplica fue colectada de un área de 25 cm². Para esto, se utilizó el programa Excel en donde se sistematizaron los nombres y valores de cada especie por cada punto de monitoreo reportado por taxónomos contratados por el OEFA; posteriormente, se realizó las representaciones mediante gráficas acumuladas.

Para la evaluación de diversidad de especies (diversidad alfa) se utilizó los índices de diversidad verdadera (Números de Hill) con base en el número de especies de cada punto de monitoreo para cada comunidad hidrobiológica. Para esto, se utilizó la variable N1 como la modificación del índice Shannon (H') (Jost, 2006). que tiene como fórmula:

$$N1 = \exp(H') \quad (\text{Ecuación 1})$$

Así mismos se calculó el índice de dominancia de Simpson que es inverso al concepto de equidad de la comunidad, ya que toma en cuenta las especies con mayor importancia sin considerar al resto de especies, siendo menos sensible con la riqueza de especies (Krebs, 1978; Magurran, 1991; Feinsinger, 2003). El índice de Simpson representa la probabilidad

de que 2 individuos, dentro de un hábitat, seleccionados al azar pertenezcan a la misma especie. La fórmula para determinar el índice de Simpson es:

$$D = \sum pi^2 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Por último, se desarrolló el índice de equidad de Pielou, el cual mide la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada. Su valor va de 0 a 1, de forma que 1 corresponde a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes (Pielou, 1975; Peet, 1974).

$$J' = \frac{H'}{H'_{max}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde:

J' es el índice de equidad de Pielou,

H' = índice de diversidad de Shannon-Wiener,

H' max = Ln(S) y,

S = número de especies.

b. Calidad ecológica de ríos altoandinos

El protocolo CERA-S da como resultado el estado ecológico de los ríos mediante la combinación de la calidad hidromorfológica y la calidad biológica (macroinvertebrados bentónicos). La base del protocolo es la valoración de la calidad biológica del río y las características de su entorno y su representación mediante una combinación sencilla de colores que permite, a quien no tiene una formación científica especializada, observar rápidamente cual es el estado de salud de los sistemas lóticos (Encalada *et al.*, 2011). Es importante mencionar que se hizo una modificación al protocolo CERA-S, donde la calidad biológica que se trabajó fue con el *Andean Biotic Index* (ABI), para ello se utilizó la base de datos del muestreo cuantitativo donde se realizó un muestreo del mesohábitats más dominante del cuerpo.

Calidad hidromorfológica

La calidad hidromorfológica se estimó a partir de la observación de 8 características, las cuales son listadas a continuación:

- Estructura y naturalidad de la vegetación de ribera
- Continuidad de la ribera
- Conectividad de la vegetación de ribera con otros elementos del paisaje
- Presencia de basuras y escombros
- Naturalidad del canal fluvial
- Composición del sustrato
- Regímenes de velocidad y profundidad del río
- Elementos de heterogeneidad.

El criterio de elección del puntaje para cada característica se detalla en los datos de campo. Una vez obtenidas las puntuaciones para cada característica hidromorfológica se obtiene una sumatoria de todas ellas, con la finalidad de tener un solo valor por punto de



muestreo. Finalmente, para obtener la calidad hidromorfológica, dicho valor es comparado con la siguiente escala (Tabla 5.20).

Tabla 5.20. Valoración de la calidad hidromorfológica

Puntuación	Calidad hidromorfológica
> 35	Excelente
29 – 35	Buena
21 – 28	Moderada
11 – 20	Mala
0 – 10	Pésima

Fuente: Encalada *et al.* (2011)

Calidad biológica - Índice biótico andino

A partir de la identificación de las muestras de macroinvertebrados bentónicos se determinará la calidad biológica utilizando el ABI (Índice biótico andino, del inglés *Andean Biotic Index*). Este índice fue desarrollado para ríos altoandinos (sobre los 2000 m s. n. m.) y se obtiene sumando los valores de sensibilidad de cada familia de macroinvertebrados bentónicos presente en cada punto de muestreo (Tabla 5.21).

Tabla 5.21. Puntajes de sensibilidad asignadas a las familias de macroinvertebrados bentónicos para la obtención del índice ABI

Orden / Clase	Familia	Puntaje	Orden / Clase	Familia	Puntaje
Turbellaria	*	5	Trichoptera	Polycentropodidae	8
Hirudinea	*	3		Xiphocentronidae	8
Oligochaeta	*	1		Glossosomatidae	7
Gasteropoda	Ancylidae	6		Limnephilidae	7
	Hydrobiidae	3		Hydroptilidae	6
	Limnaeidae	3		Hydropsychidae	5
	Physidae	3	Lepidoptera	Pyralidae	4
	Planorbidae	3	Coleoptera	Dryopidae	5
Bivalvia	Sphaeriidae	3		Elmidae	5
Amphipoda	Hyalellidae	6		Hydraenidae	5
Hydracarina	*	4		Lampyridae	5
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	10		Psephenidae	5
	Oligoneuridae	10		Ptilodactylidae	5
	Leptohyphidae	7		Scirtidae(helodidae)	5
	Baetidae	4		Gyrinidae	3
Odonata	Polythoridae	10		Dytiscidae	3
	Calopterygidae	8		Hydrophilidae	3
	Gomphidae	8		Staphylinidae	3
	Aeshnidae	6	Diptera	Blepharoceridae	10
	Coenagrionidae	6		Athericidae	10
	Libellulidae	6		Simuliidae	5
Plecoptera	Perlidae	10		Tipulidae	5
	Gripopterygidae	10		Ceratopogonidae	4
Heteroptera	Corixidae	5		Dixidae	4

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

Orden / Clase	Familia	Puntaje	Orden / Clase	Familia	Puntaje
	Gerridae	5		Dolichopodidae	4
	Naucoridae	5		Empididae	4
	Notonectidae	5		Limoniidae	4
	Veliidae	5		Stratiomyidae	4
	Belostomatidae	4		Tabanidae	4
Trichoptera	Anomalopsychidae	10		Psychodidae	3
	Calamoceratidae	10		Chironomidae	2
	Helicopsychidae	10		Culicidae	2
	Odontoceridae	10		Ephydriidae	2
	Hydrobiosidae	8		Muscidae	2
	Leptoceridae	8		Syrphidae	1
	Philopotamidae	8		*	

*: La categoría taxonómica familia no presenta puntuación, por ende, la categoría taxonómica superior (Orden / Clase) es la que otorga la puntuación.

Fuente: Acosta *et al.* (2009)

Para obtener el respectivo valor de calidad biológica, dichos valores fueron comparados con la siguiente escala (Tabla 5.22).

Tabla 5.22. Valoración de la calidad biológica con el índice ABI

Puntuación	Calidad hidromorfológica
>74	Excelente
45 – 74	Buena
27 – 44	Moderada
11 – 26	Mala
<11	Pésima

Fuente: Acosta *et al.* (2009)

La calidad ecológica se obtuvo combinando las valoraciones de calidad hidromorfológica y calidad biológica. Por ejemplo: si el resultado de combinar las 2 evaluaciones es azul, entonces la calidad ecológica del río es excelente; si es verde, es buena; si es amarilla, es moderada; si es naranja, es mala; y por último si es roja, es pésima. Otras combinaciones también son posibles (Tabla 5.23).

Tabla 5.23. Escala de calidad ecológica

		Calidad Biológica				
		Excelente	Buena	Moderada	Mala	Pésima
Calidad hidromorfológica	Excelente	Excelente	Buena	Moderada	Mala	Pésima
	Buena	Buena	Buena	Moderada	Mala	Pésima
	Moderada	Buena	Moderada	Moderada	Mala	Pésima
	Mala	Moderada	Moderada	Moderada	Mala	Pésima
	Pésima	Moderada	Mala	Mala	Pésima	Pésima

Fuente: Encalada *et al.*, 2011

Adicionalmente, para estimar el grado de perturbación de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, se recategorizan las especies registradas a grupos bioindicadores, definidos referencialmente a partir de la clasificación de familias del índice ABI (Acosta *et al.*, 2009), considerando 3 grupos: el primero corresponde a las especies que se agrupan dentro de familias sensibles, que presentan un alto nivel de sensibilidad



según las categorías del ABI (entre 8 y 10); el segundo grupo corresponde a las especies que se agrupan dentro de familias facultativas, que según las condiciones pueden tener un grado intermedio de sensibilidad/tolerancia (entre 4 y 7); finalmente, el tercer grupo comprende a las especies que se agrupan dentro de familias tolerantes, que presentan un bajo nivel de sensibilidad (entre 1 y 2).

c. Análisis Cluster

Para el análisis de agrupamiento y asociación se utilizó el coeficiente de similitud de Bray-Curtis con base en la similitud de especies entre puntos de muestreo para cada comunidad de macroinvertebrados bentónicos y perifiton (microalgas). Para determinar el índice de Bray-Curtis se empleó la fórmula:

$$IBC = 1 - \frac{(\sum x_i - y_i)}{(\sum x_i + y_i)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde:

IBC = índice de Bray-Curtis.

x_i = abundancia o densidad de especies i en un conjunto 1.

y_i = abundancia de las especies en el otro.

Para facilitar el análisis de los valores de similitud de manera visual, se procedió a la elaboración de dendogramas mediante la unión de pares promedio (Sokal y Michener, 1958; OEA, 1983) mediante el software Paleontological Data Analysis PAST, versión 3.15 (programa estadístico PAST). Esta gráfica resume la similitud de las especies entre los puntos de muestreo.

d. Análisis de componentes principales (ACP)

Este análisis es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de número de variables (Fuentes, 2011; Cuadras, 2014). Lo cual permite determinar la gradiente de presiones que posiblemente afecta a las comunidades del perifiton y macroinvertebrados bentónicos.

Estas variables corresponderán a los parámetros en agua tomados *in situ*; como son: pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica; concentraciones de parámetros fisicoquímicos y todos los metales totales y disueltos que fueron reportados por el laboratorio, lo que incluye los parámetros en agua que se registran en los ECA para agua 2008 Cat.3: Riego de vegetales y bebida de animales; asimismo, se contempló los metales en sedimentos que se encuentran establecidos en la guía canadiense de sedimento.

Es importante mencionar que antes de realizar dicho análisis se hizo una prueba de normalidad de Shapiro Wilk con la finalidad de descartar parámetros de aguas superficial y sedimentos que no cumplen la normalidad y que necesitan pruebas no paramétricas.

e. Análisis de correspondencia canónica

El análisis de correspondencia canónico (ACC) es un método multivariado para dilucidar las relaciones entre los conjuntos biológicos de especies y su entorno (Ter Braak y Verdonschot, 1995). Para determinar la relación entre las variables ambientales y las comunidades hidrobiológicas de los macroinvertebrados bentónicos y perifiton, se realizó el análisis de correspondencia canónica (ACC) utilizando el software Paleontological Data Analysis PAST v3.15. Dicho análisis aportó la información sobre el porcentaje de la



relación o asociación de las comunidades de macroinvertebrados y microalgas que puede ser explicado por el efecto de las variables ambientales.

Para el análisis fueron seleccionadas aquellas especies de macroinvertebrados bentónicos categorizados como sensibles, facultativas y tolerantes, además de las especies de microalgas que se desarrollan en ambientes perturbados y no perturbados. Mientras que, las variables ambientales en agua y sedimentos seleccionados correspondieron a los que se encuentran en el primer componente del ACP el cual explicó la mayor variabilidad de datos, pero que a su vez también los que incumplieron los ECA para agua categoría 3 y la norma canadiense.

f. Análisis multivariado por permutaciones PERMANOVA

Se seleccionó este método de análisis multivariado dado que i) permite hacer análisis complejos y ii) considera valores reales más que rangos; a diferencia de los que permite un análisis tradicional se similaridad ANOSIM.

Con la finalidad de contrastar las asociaciones espaciales sobre la proximidad o distancia para los distintos grupos y/o puntos de muestreo, según el factor definido, se empleó el método de análisis multivariado por permutaciones PERMANOVA+® (Anderson *et al.*, 2008).

Se empleó el método de permutación no restringido de datos (*unrestricted permutation of raw data*), considerando que los resultados podrían verse afectados y las estimaciones por permutación podrían no ser precisas ya que no todos los niveles por factores poseen un número alto de muestras. En los casos donde el número de permutaciones fue inferior a 100, se realizó el *test* de Monte Carlo, prefiriendo en estos casos su valor P (P-values) estadístico, por encima del valor P proveniente del análisis PERMANOVA (Anderson *et al.*, 2008), dado que un número bajo de muestras puede promover un número bajo de permutaciones para algunos niveles (factor cuerpo de agua).

Este análisis permite probar la hipótesis general multivariada de diferencias en la composición entre los puntos de muestreo con influencia y sin influencia de los componentes mineros.

5.2.6. Agua subterránea

La metodología para la toma de muestras de agua subterránea contempla la ubicación de puntos de muestreo, los parámetros, los métodos de análisis, los equipos, el aseguramiento de la calidad, los criterios de comparación y el análisis de datos; estos procedimientos se detallan en los siguientes ítems.

5.2.6.1. Guías utilizadas para la evaluación

Debido a que no se cuenta con un protocolo nacional para el monitoreo y evaluación de agua subterránea, se utilizó referencialmente las guías indicadas en la Tabla 5.24.

Tabla 5.24. Guías utilizadas para evaluación de la calidad del agua subterránea

Referencia	País	Institución	Año	Sección
Manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados, muestreo de aguas subterráneas	Perú	Ministerio del Ambiente (Minam)	2016	Parte 2
National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data (NFM). Book 9	Estados Unidos	U.S. Geological Survey	2015	Capítulos del A1 al A6



Referencia	País	Institución	Año	Sección
Guía para la toma, conservación y transporte de muestras de agua subterránea. Versión 1	Uruguay	Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA)	2004	Toda la guía

5.2.6.2. Ubicación de puntos de muestreo

Los puntos de muestreo de agua subterránea se establecieron tomando como referencia los piezómetros declarados en el instrumento de gestión ambiental del administrado «Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de Operaciones a 18,000 TMD de Sociedad Minera El Brocal S.A.A. aprobado mediante Resolución Directoral N.º 361-2012-MEM-AAM», asimismo, producto del reconocimiento de campo se determinó un punto de muestreo en manantial.

Se establecieron 4 puntos de muestreo de agua subterránea distribuidos en el ámbito de estudio en relación a la influencia que puedan tener los componentes mineros de la UF Colquijirca. En la Tabla 5.25 se detalla la ubicación y descripción de los puntos de muestreo. La distribución espacial de los puntos se puede observar en los mapas de ubicación en el Anexo A.

Tabla 5.25. Ubicación de los puntos de muestreo de agua subterránea

N.º	Código IGA*	Código OEFA	Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		
1	--	MHua-2	357797	8811222	4199	Manantial Huachuacaja, ubicado aproximadamente a 610 m de la poza R4
2	PM-H-2	--	359113	8807013	4152	Piezómetro ubicado a 40 m al oeste de las pozas de infiltración del depósito de relaves Huachuacaja
3	PM-H-1	--	359113	8807015	4153	Piezómetro ubicado a 170 m al sur de las pozas de infiltración del depósito de relaves Huachuacaja
4	SDH-03	--	358692	8807644	4193	Piezómetro ubicado aproximadamente a 60 m al oeste del depósito de relaves Huachuacaja

*: Tomado de la Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de Operaciones a 18,000 TMD de Sociedad Minera El Brocal S.A.A., aprobado mediante Resolución Directoral N.º 361-2012-MEM-AAM

--: No aplica

5.2.6.3. Parámetros y métodos de análisis

La Tabla 5.26 presenta los parámetros inorgánicos en agua subterránea y la metodología de análisis empleada por el laboratorio acreditado por el Inacal.

Asimismo, en los puntos de muestreo de agua subterránea se midieron los parámetros de campo: temperatura (T), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y potencial redox (ORP).

Tabla 5.26. Parámetros y metodologías para agua subterránea

N.º	Parámetro	Unidad	Método de ensayo
1	Cianuro Total	mg/L	Método Colorimétrico
2	Cianuro Wad	mg/L	Método Colorimétrico
3	Sólidos totales suspendidos (SST)	mg/L	Gravimetría



N.º	Parámetro	Unidad	Método de ensayo
4	Sólidos totales disueltos (STD)	mg/L	Gravimetría
5	Carbonatos	mg/L	Método de titulación
6	Bicarbonatos	mg/L	Método de titulación
7	Cloruros	mg/L	Cromatografía iónica
8	Fluoruros	mg/L	Cromatografía iónica
9	Nitratos	mg/L N-NO ₃	Cromatografía iónica
10	Nitritos	mg/L N-NO ₂	Cromatografía iónica
11	Sulfatos	mg/L	Cromatografía iónica
12	Metales totales + mercurio	mg/L	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
13	Metales disueltos + mercurio	mg/L	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
14	Cromo hexavalente	mg/L	espectrometría ultravioleta-visible (UV-VIS)

Fuente: Reporte de campo (Anexo A) y reporte de resultados (Anexo B)

5.2.6.4. Equipos utilizados

Los equipos utilizados, los certificados de calibración, los registros de verificación y las herramientas para la evaluación ambiental se muestran en el Anexo A.

5.2.6.5. Aseguramiento de la calidad

Para el aseguramiento de calidad de los resultados de laboratorio, se tomó un duplicado del parámetro metales totales, de acuerdo a lo que indica la Dirección Nacional del Medio Ambiente (DINAMA) del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) de Uruguay, en su Guía para la Toma, Conservación y Transporte de Muestras de Agua Subterránea del 2004: «Se recomienda tomar un duplicado por cada 10 muestras o menos muestras colectadas».

5.2.6.6. Procesamiento de datos

Los resultados obtenidos fueron digitalizados y ordenados en una base de datos (hojas de cálculo), para luego ser comparados referencialmente, mediante el uso de gráficos de líneas o barras.

Se realizó la caracterización hidroquímica para clasificar las facies (tipo de agua) y los procesos químicos en el agua subterránea, considerando la concentración de los iones mayoritarios como calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y parámetros de campo como la conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto y pH. De igual modo, permitirá conocer la influencia y el medio de transporte de posibles contaminantes provenientes de los procesos de tratamiento de aguas de mina.

5.2.6.7. Criterios de evaluación

Para agua subterránea no se cuenta con estándares nacionales de calidad ambiental, por tal motivo, los resultados de los piezómetros serán comparados, referencialmente, con los ECA para agua 2008 Cat.3, según las consideraciones del IGA¹³ del administrado.

¹³

Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de Operaciones a 18,000 TMD de Sociedad Minera El Brocal S.A.A., aprobado mediante Resolución Directoral N.º 361-2012-MEM-AAM.



Además, se realizó la caracterización hidroquímica de las aguas superficiales evaluadas, considerando lo descrito en el ítem 5.1.1.7 Criterios de evaluación.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presenta los resultados detallados por objetivo empleado en la evaluación ambiental de causalidad para la determinar la influencia del depósito de relaves Huachuacaja y planta de tratamiento de aguas residuales industriales de la UF Colquijirca, sobre el agua superficial, agua subterránea, sedimento y comunidades hidrobiológicas.

Los resultados de todas las matrices evaluadas se encuentran en el reporte de resultados (Anexo B).

6.1. Objetivo específico 1: Identificar las infiltraciones del dique de contención del depósito de relaves Huachuacaja y su efecto en el acuífero libre de la quebrada Huachuacaja

6.1.1. Agua residual industrial el ámbito de la relavera Huachuacaja

El ámbito de la relavera Huachuacaja se recolectaron 2 muestras de agua residual industrial (ARI), una ubicada en la sobrenadante del depósito de relaves Huachuacaja y otra en la poza de colección de aguas de subdrenaje del depósito de relaves Huachuacaja (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Resultados de parámetros evaluados en agua residual industrial

Parámetros	Unidades de pH	DRHua-1	E-13
Parámetros fisicoquímicos			
pH	Unidades de pH	6,82	7,28
Conductividad eléctrica	mg/L	2400	1064
Aniones			
Cloruros	mg/L	12,9	3,08
Fluoruros	mg/L	0,53	0,39
Nitratos	mg/L NO ₃	3,75	4,54
Nitritos	mg/L NO ₂	0,37	< 0,03
Sulfatos	mg SO ₄ -2/L	1673	403
Metales totales			
Cobre	mg/L	0,1145	< 0,0003
Cadmio	mg/L	< 0,00001	<0,00003
Plomo	mg/L	0,09671	< 0,00006
Hierro	mg/L	0,17	3,4
Zinc	mg/L	1,83	0,054
Arsénico	mg/L	0,00184	0,00906
Calcio	mg/L	529	147
Manganeso	mg/L	5,5891	2,9613

Fuente: Reporte de resultados (Anexo B)

Además, de las 2 ARI mencionadas, se evaluaron 4 filtraciones (AF5, AF6, AF7 y ESP-8), cuya caracterización de los metales totales, disueltos y suspendidos se detalla en la Tabla 6.2. Los resultados resaltados de color celeste representan el predominio del metal en forma disuelta y el color verde representa el predominio del metal en forma suspendida.

**Tabla 6.2.** Caracterización de los metales en el agua residual industrial y las filtraciones

Parámetros	Unidades	AF5			AF6		
		MT	MD	MS	MT	MD	MS
Arsénico (As)	mg/L	0,01744	29,30%	70,70%	0,01826	46,93%	53,07%
Cadmio (Cd)	mg/L	0,000005	100,00%	0,00%	0,000005	100,00%	0,00%
Cobre (Cu)	mg/L	0,0176	100,00%	0,00%	0,0113	91,15%	8,85%
Hierro (Fe)	mg/L	1,3	1,15%	98,85%	0,98	1,53%	98,47%
Plomo (Pb)	mg/L	0,02277	0,13%	99,87%	0,00881	0,34%	99,66%
Mercurio (Hg)	mg/L	0,000035	100,00%	0,00%	0,000035	100,00%	0,00%
Zinc (Zn)	mg/L	0,07	50,00%	50,00%	0,034	91,18%	8,82%
Parámetros	Unidades	AF7			ESP-8		
		MT	MD	MS	MT	MD	MS
Arsénico (As)	mg/L	0,01561	44,91%	55,09%	0,00647	89,80%	10,20%
Cadmio (Cd)	mg/L	0,000005	100,00%	0,00%	0,000005	100,00%	0,00%
Cobre (Cu)	mg/L	0,0105	99,05%	0,95%	0,00015	100,00%	0,00%
Hierro (Fe)	mg/L	2	0,75%	99,25%	4,8	97,92%	2,08%
Plomo (Pb)	mg/L	0,00972	0,31%	99,69%	0,00207	1,45%	98,55%
Mercurio (Hg)	mg/L	0,000035	100,00%	0,00%	0,000035	100,00%	0,00%
Zinc (Zn)	mg/L	0,046	100,00%	0,00%	0,235	87,66%	12,34%
Parámetros	Unidades	DRHua-1			E-13		
		MT	MD	MS	MT	MD	MS
Arsénico (As)	mg/L	0,00184	72,83%	27,17%	0,00906	66,89%	33,11%
Cadmio (Cd)	mg/L	0,00509	93,32%	6,68%	0,000005	100,00%	0,00%
Cobre (Cu)	mg/L	0,1145	70,48%	29,52%	0,00015	100,00%	0,00%
Hierro (Fe)	mg/L	0,17	8,82%	91,18%	3,4	52,94%	47,06%
Plomo (Pb)	mg/L	0,09671	47,46%	52,54%	0,00003	100,00%	0,00%
Mercurio (Hg)	mg/L	0,000035	100,00%	0,00%	0,000035	100,00%	0,00%
Zinc (Zn)	mg/L	1,83	94,54%	5,46%	0,054	87,04%	12,96%

Fuente: Informe de Ensayo del laboratorio AGQ PERU, S.A. C. N.º SAA-20/01193, A-20/121890, A-20/119893, SAA-20/01101, SAA-20/01169, SAA-20/01209,

MT: metales totales. MD: metales disueltos, MS: metales en suspensión

La caracterización hidroquímica se realizó en base a la información de los puntos de muestreo de agua residual industrial evaluados en octubre de 2020. Además, se realizó el análisis de las concentraciones de cationes mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+}) y aniones (HCO_3^{-} , CO_3 , SO_4^{2-} y Cl^{-}), obtenidos a partir de los análisis de laboratorio (Anexo B), con los cuales se elaboraron el diagrama de Piper y un mapa hidroquímico en base a los gráficos de Stiff. Asimismo, se utilizó la suma de los metales disueltos (zinc, cobre, cadmio, plomo, cobalto, níquel, hierro y manganeso) y el potencial de hidrógeno para ubicar las muestras en un diagrama de Ficklin para la caracterización de las aguas.

Las aguas residuales industriales del ámbito de la relavera Huachuacaja (E-13 y DRHua-1) se clasificaron como «sulfatada cálcica» los diagramas de Piper y Stiff (Figura 6.1 y Tabla 6.3 respectivamente), de acuerdo al diagrama de Ficklin (Figura 6.2) se clasificaron como «cercano a neutral con alto contenido de metales». Las aguas residuales industriales de filtración (AF5, AF6, AF7 y ESP-8) se clasificaron como «sulfatada cálcica» según el diagrama de Piper y Stiff (Figura 6.3 y Tabla 6.4 respectivamente), de acuerdo al diagrama de Ficklin (Figura 6.4) se clasificaron como «cercano a neutral con alto contenido de metales».

Agua residual industrial – Ámbito de relavera Huachuacaja

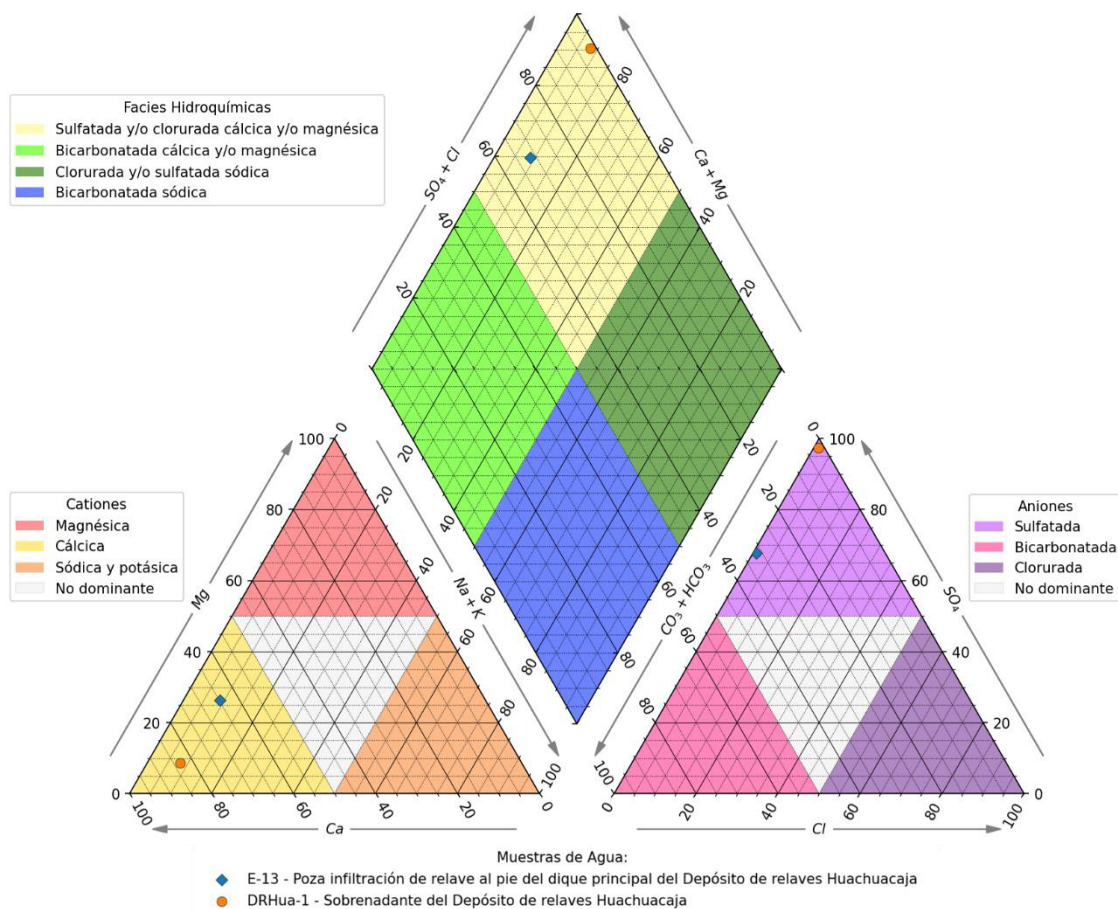


Figura 6.1. Diagrama de Piper de las muestras de agua residual industrial en el ámbito de la relavera Huachuacaja

Tabla 6.3. Clasificación de las muestras de agua residual industrial de componentes según diagramas de Stiff

Cuerpo de agua	Muestra	Error balance iónico	Clasificación	Diagramas Stiff
Depósito de relaves Huachuacaja (al pie del dique principal)	E-13	3.93	Sulfatada Cálcida	E-13 : Sulfatada Cálcida
Depósito de relaves Huachuacaja	DRHua-1	6.96	Sulfatada Cálcida	DRHua-1 : Sulfatada Cálcida



Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

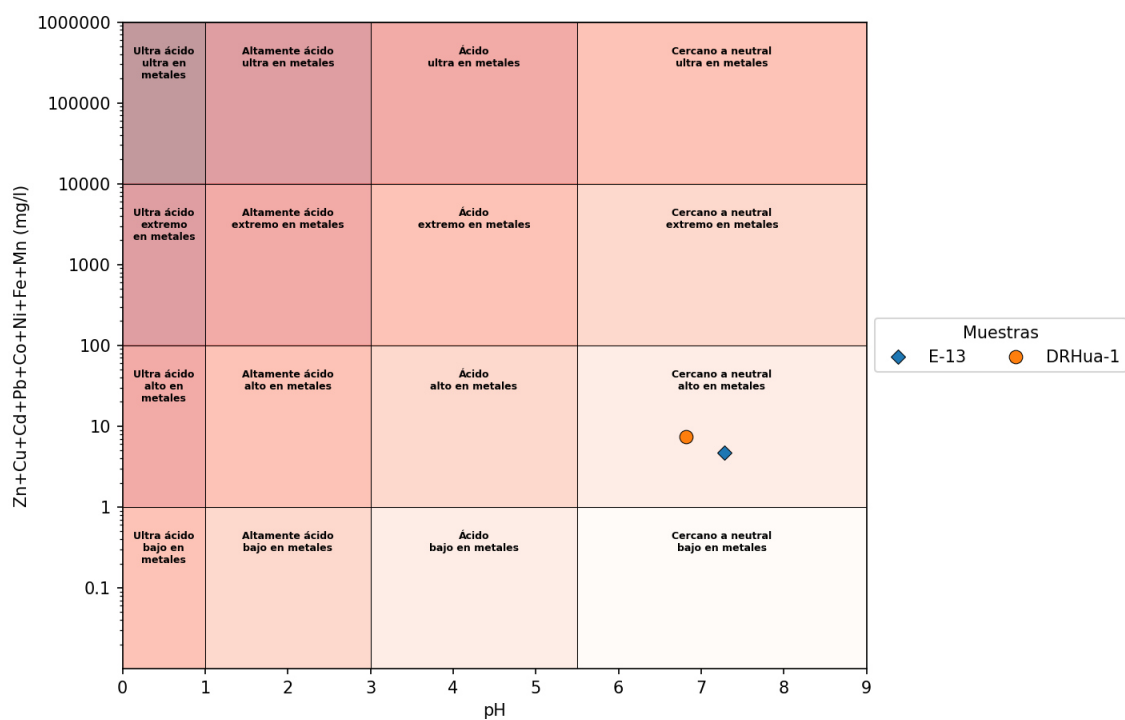


Figura 6.2. Clasificación de las muestras de agua residual industrial de componentes según el diagrama de Ficklin

Agua residual industrial – Filtraciones

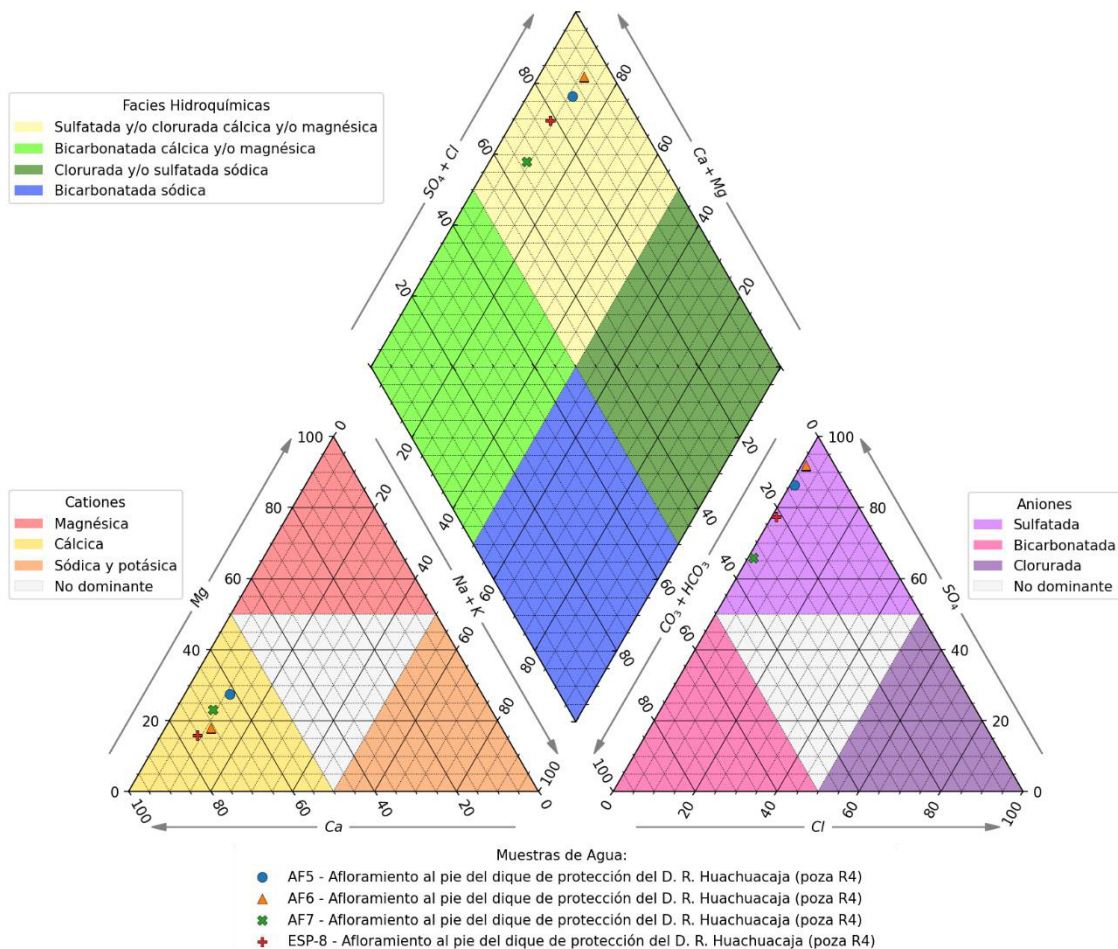


Figura 6.3. Diagrama de Piper de las muestras de agua residual industrial de filtraciones

Tabla 6.4. Clasificación de las muestras de agua residual industrial de filtraciones según diagramas de Stiff

Cuerpo de agua	Muestra	Error balance iónico	Clasificación	Diagramas Stiff
Afloramiento de agua al pie del dique de protección de depósito de relaves Huachuacaja (lado derecho de poza R4)	AF5	8.39	Sulfatada Cálcica	AF5 : Sulfatada Cálcica
Afloramiento de agua al pie del dique de protección de depósito de relaves Huachuacaja (lado derecho de poza R4)	AF6	7.55	Sulfatada Cálcica	AF6 : Sulfatada Cálcica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

Cuerpo de agua	Muestra	Error balance iónico	Clasificación	Diagramas Stiff
Afloramiento de agua al pie del dique de protección de depósito de relaves Huachuacaja (lado derecho de poza R4)	AF7	4.44	Sulfatada Cálctica	AF7 : Sulfatada Cálctica
Afloramientos de agua al pie del dique de protección de depósito de relaves Huachuacaja (lado derecho de poza R4)	ESP-8	4.02	Sulfatada Cálctica	ESP-8 : Sulfatada Cálctica

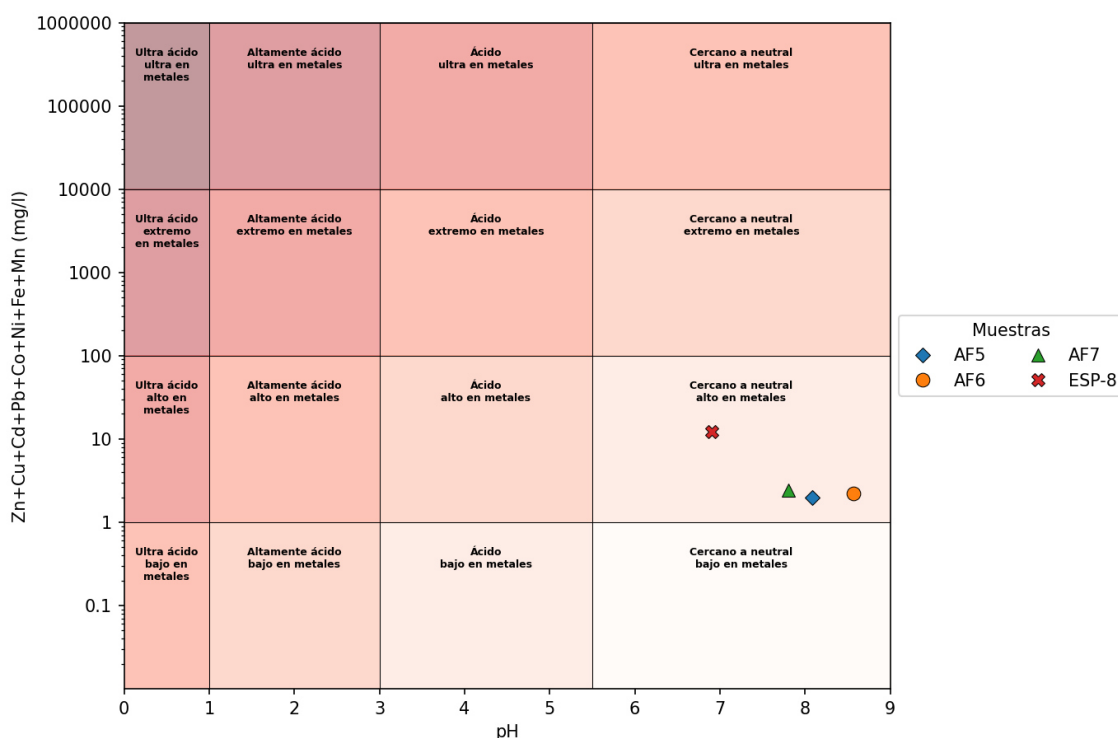


Figura 6.4. Clasificación de las muestras de agua residual industrial de filtraciones según el diagrama de Ficklin

6.1.2. Tomografía de resistividad eléctrica

Como parte del estudio de prospección geofísica, se ejecutaron 4 líneas de tomografía de resistividad eléctrica 2D, distribuidos en el sector dique de protección del depósito de relaves Huachuacaja-quebrada Huachuacaja (ERT-05, ERT-06, ERT-07, ERT-08).

La mayoría de las líneas de tomografía de resistividad eléctrica se realizaron en depósitos cuaternarios antrópicos con material de relleno, depósito aluvial, y depósitos aluvial glaciar (Figura 6.5).

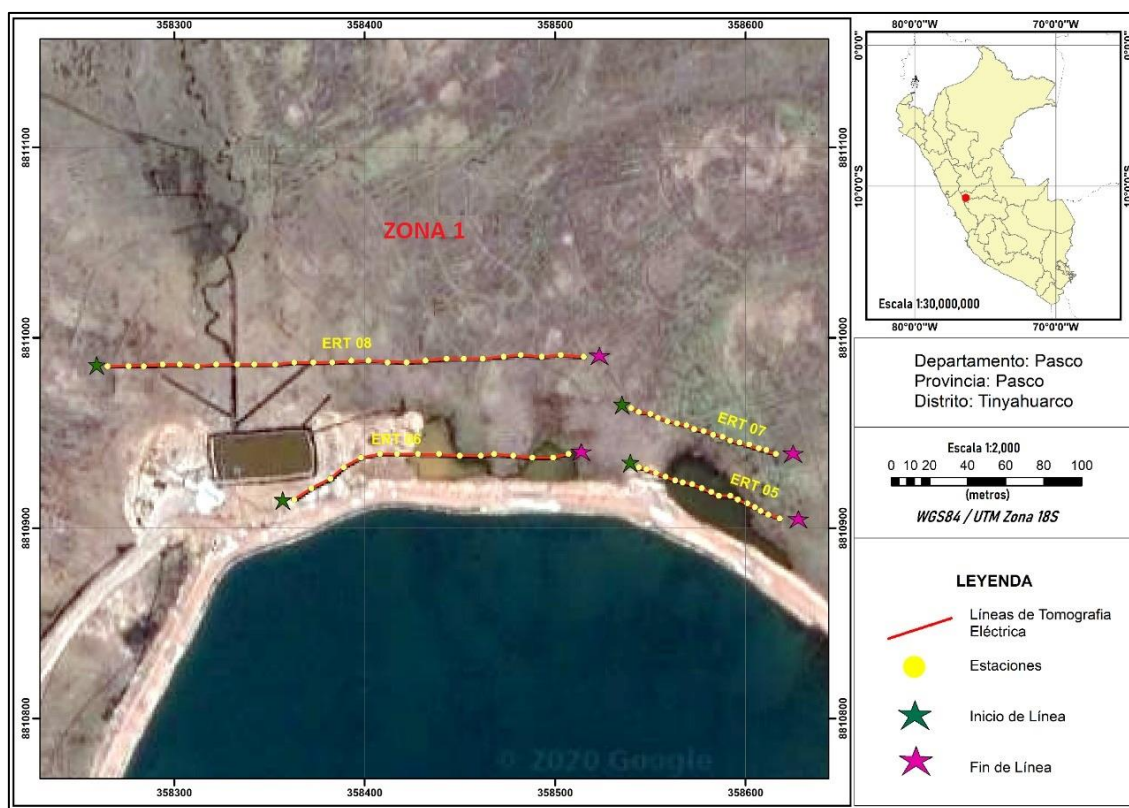


Figura 6.5. Ubicación de las líneas de tomografía de resistividad eléctrica en el ámbito de la relavera Huachuacaja

La interpretación de las secciones de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) consistió en diferenciar zonas (A, B y C) en función a valores de resistividades similares. Las características y resultados se presentan en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5. Características de las líneas de tomografía de resistividad eléctrica ejecutadas en el ámbito del depósito de relaves Huachuacaja

Ubicación	Línea de tomografía	Longitud (m)	Separación de electrodos (m)	Profundidad promedio de investigación (m)	Rango de resistividades (Ohm.m)		
					Zona A	Zona B	Zona C
Sector dique de protección del depósito de relaves Huachuacaja – quebrada Huachuacaja	ERT-05	80	5	21	20 - 36	37 - 60	61 - 397
	ERT-07	80	5	21	18 - 36	37 - 139	NA
	ERT-06	150	10	43	17 - 40	41 - 310	NA
	ERT-08	250	10	43	22 - 40	41 - 95	NA

NA: No aplica

A continuación, se describe la interpretación de la TRE en el sector dique de protección del depósito de relaves Huachuacaja-quebrada Huachuacaja

6.1.2.1. Líneas ERT-5 y ERT-7

La sección de la línea de tomografía de resistividad eléctrica ERT-5 (Figura 6.6), presentó 3 zonas (A, B y C). La zona A con resistividades en el rango de 20 a 36 Ohm.m, ubicadas en la estación 35 a 10 m de profundidad, estaciones 53 y 70 a 3 m de profundidad, las cuales se asocian a depósitos glaciar-fluvial y arcillas con saturación de agua y presencia de lixiviados y soluciones diluidas de sales. La zona B presentó resistividades de

37 a 60 Ohm.m, ubicadas entre las estaciones 60 y 80 y que profundiza diagonalmente hacia el noroeste correspondiendo al depósito glacial-fluvial con saturación de agua. Finalmente, la zona C presentó resistividades entre 61 a 397 Ohm.m, ubicada entre las estaciones 0 y 60, alcanzando 10 m, de profundidad; relacionados a material de relleno compactado del dique de protección.

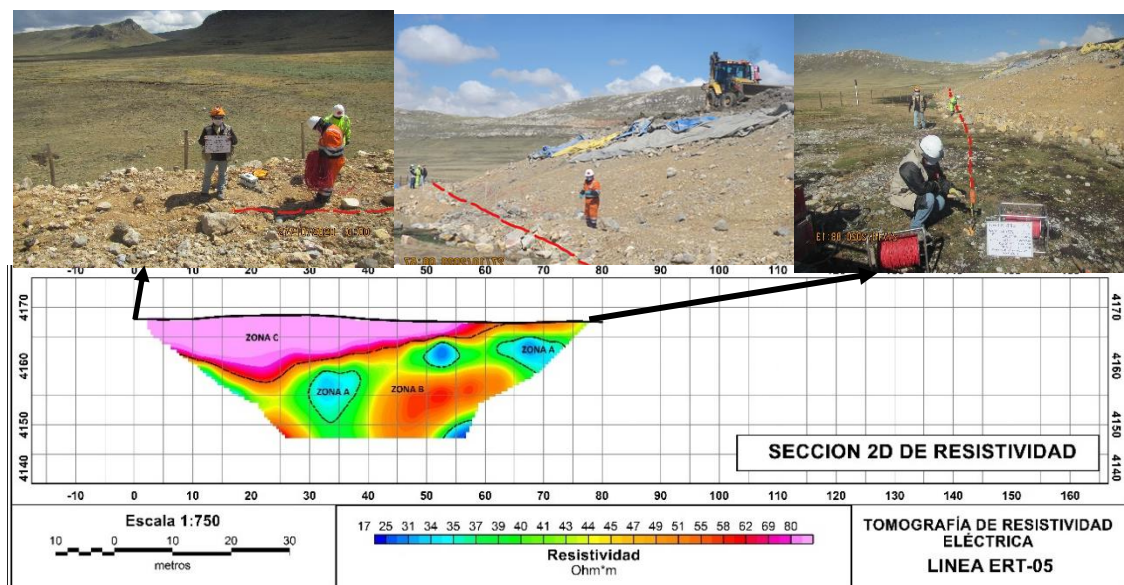


Figura 6.6. Línea de tomografía de resistividad eléctrica ERT-05

La sección de la línea de tomografía de resistividad eléctrica ERT-07 (Figura 6.7), presentó 2 zonas (A y B). La zona A con resistividades en el rango de 18 a 36 Ohm.m, ubicadas en la estación 25 a 5 m de profundidad y las estaciones 40 y 70 a 3 m de profundidad, las cuales se asocian a depósitos glacial-fluvial y arcillas con saturación de agua y presencia de lixiviados y soluciones diluidas de sales. La zona B presentó resistividades de 37 a 139 Ohm.m, ubicadas entre las estaciones 0 y 80 y que profundiza hasta los 15 m en la estación 20, de 20 a 80 una profundidad de 3 a 4 m; asimismo en la estación 40 y 60 alcanza una profundidad aproximada de 14 m correspondiendo al depósito glacial-fluvial con saturación de agua.

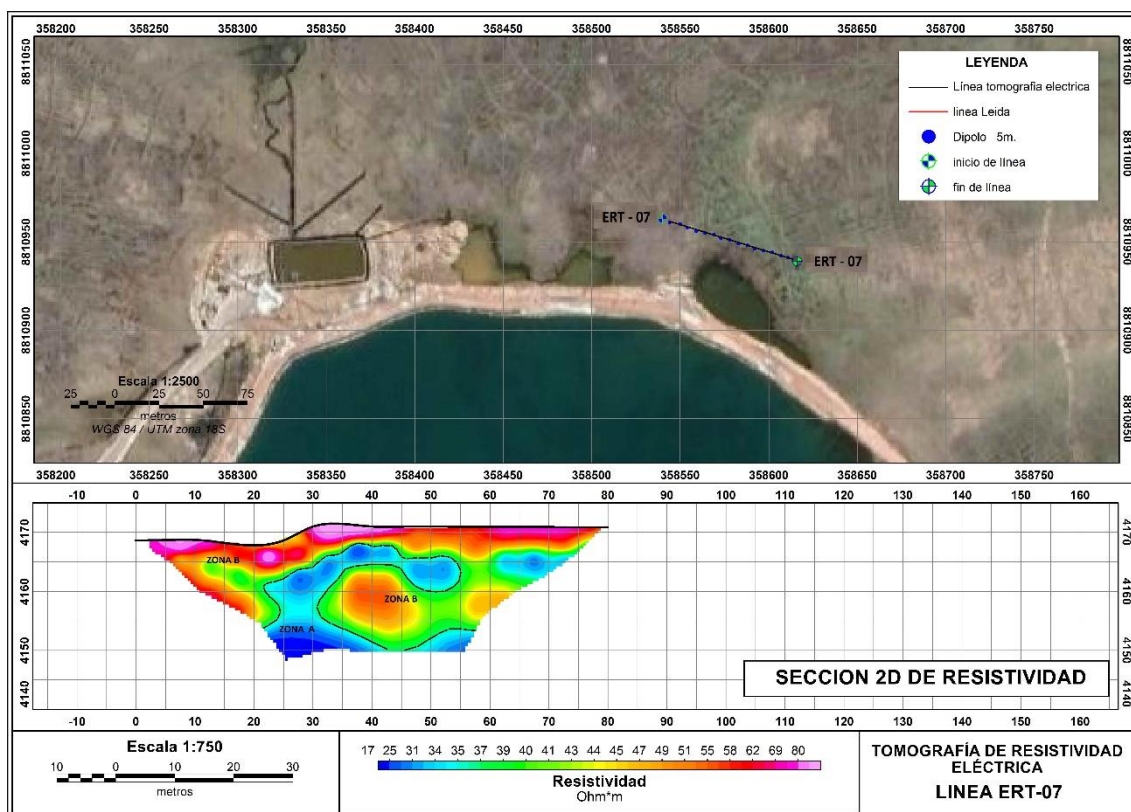


Figura 6.7. Línea de tomografía de resistividad eléctrica ERT-07

6.1.2.2. Líneas ERT-06 y ERT-08

La sección de la línea de tomografía de resistividad eléctrica ERT-6 (Figura 6.8), presentó 2 zonas (A y B). La zona A con resistividades en el rango de 17 a 40 Ohm.m, ubicadas desde la parte superficial estación 0 profundizando diagonalmente hasta los 30 m aproximadamente en la estación 70 asociados a material de relleno del dique en la parte superficial y glaciar fluvial y arcillas en profundidad los cuales se asocian a la presencia de lixiviados y soluciones diluidas de sales. La zona B presentó resistividades de 41 a 310 Ohm.m, ubicadas entre las estaciones 20 a 140 y que profundiza hasta los 21 m aproximadamente entre las estaciones 40 a 90 relacionados a material de relleno compactado del dique de protección en parte superficial y en profundidad asociado depósito glaciar-fluvial con saturación de agua.

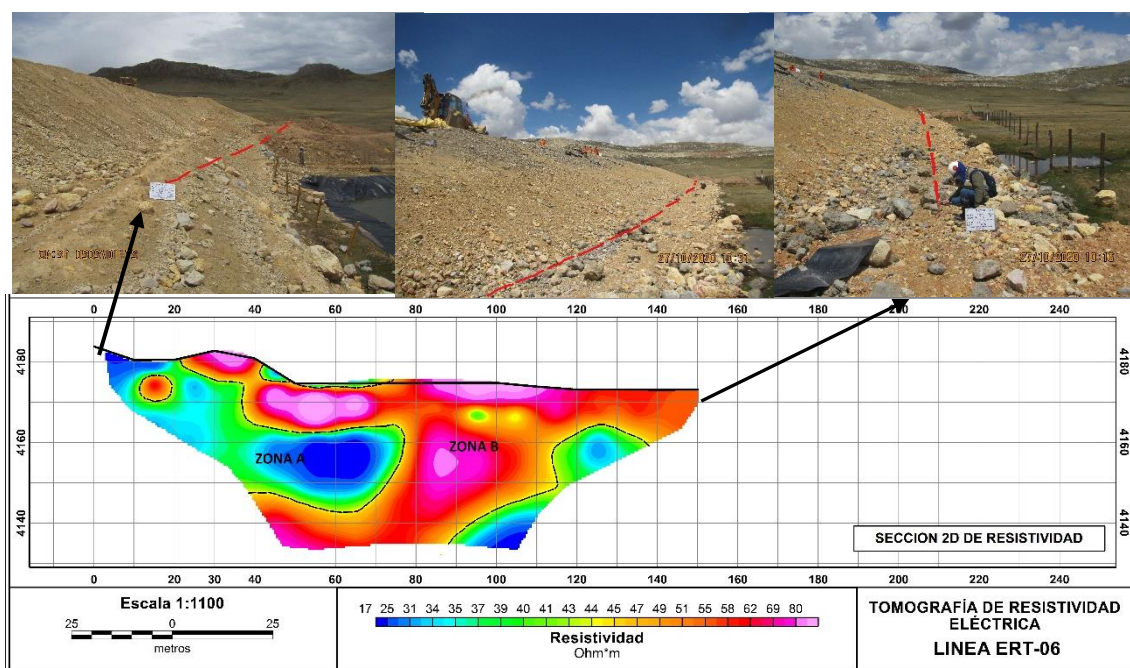


Figura 6.8. Línea de tomografía de resistividad eléctrica ERT-06

En la ERT-08 (Figura 6.9) se presentaron 2 zonas (A y B) La zona a con resistividades de 22 a 40 ohm.m, ubicada en la estación 40 a 30 metros de profundidad asimismo entre las estaciones 41 a 140 se ubica a una profundidad 5 a 12 metros y en las estaciones 140 y 210 aproximadamente a una profundidad de 28 a 30 m asociado a deposito glacial fluvial con arcillas y saturado de agua libre , por otra parte, la zona presento B resistividades 41 a 95 Ohm.m ubicados desde la superficie alcanzando profundidad 30 m en la estación 40 y 140 y 210 asociado a depósitos glacial fluvial con menor saturación.

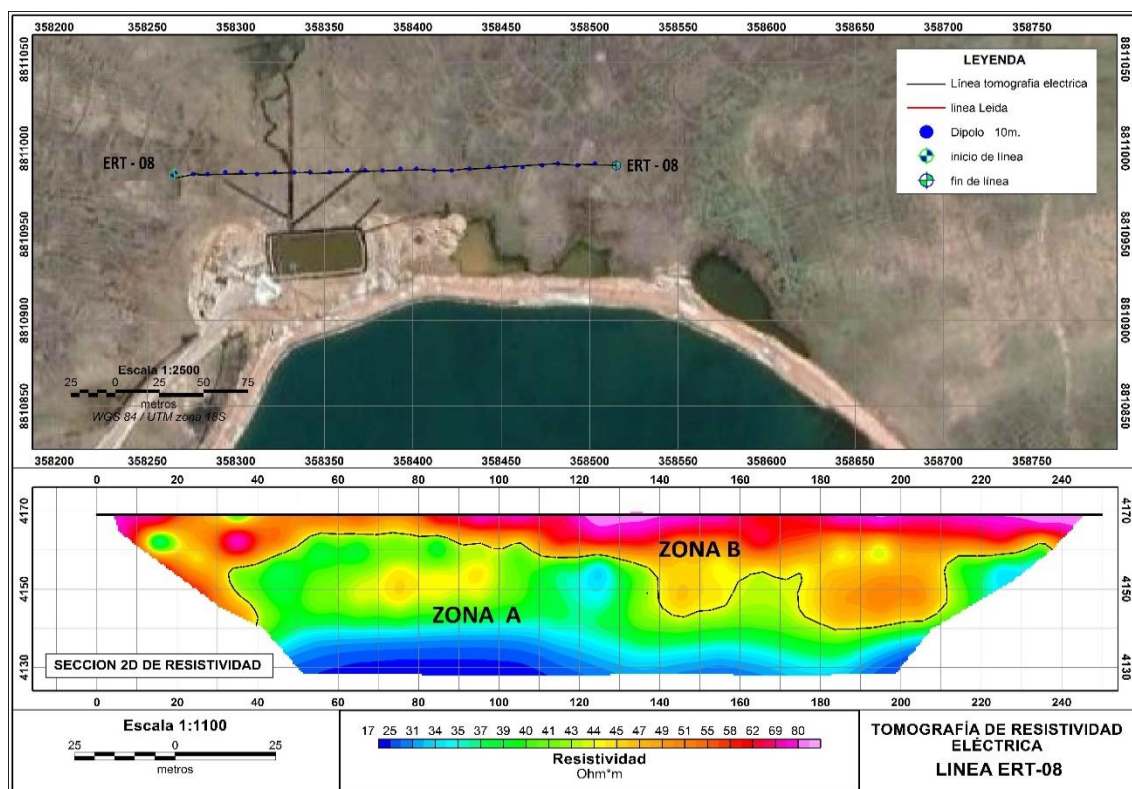


Figura 6.9. Línea de tomografía de resistividad eléctrica ERT-08

6.2. Objetivo específico 2: Determinar la influencia de los elementos o compuestos de preocupación del efluente minero de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en la quebrada Andacancha

6.2.1. Caracterización geológica local

El desarrollo de este ítem contiene la descripción de las unidades litoestratigráficas, rocas volcánicas y el contexto estructural en el ámbito del UF Colquijirca.

El basamento corresponde a las rocas sedimentarias clásticas del Grupo Mitu de edad Pérmico-Triásico, el cual se encuentra deformado debido al efecto de diferentes eventos tectónicos. Sobre estas rocas y en discordancia yacen las calizas del Grupo Pucará de edad Triásico-Jurásico. Posteriormente, durante el Eoceno se depositaron sedimentos clásticos de la Formación Pocobamba – Miembro Shuco (conglomerados con clastos de calizas, y areniscas rojas), seguido de niveles calcáreos y volcánicos (Formación Calera). Durante el Mioceno se emplazó las rocas del Complejo volcánico Marcapunta caracterizado por domos y piroclastos. Finalmente, se depositó material cuaternario glaciar, glaciar-fluvial, aluvial, coluvial-deluvial, biogénico y antropogénico como PAM colonial, componente minero, cantera de agregado, material de relleno, PAM Colquijirca y otros materiales (Figura 6.8).



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

STEC: Subdirección Técnica
Científica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

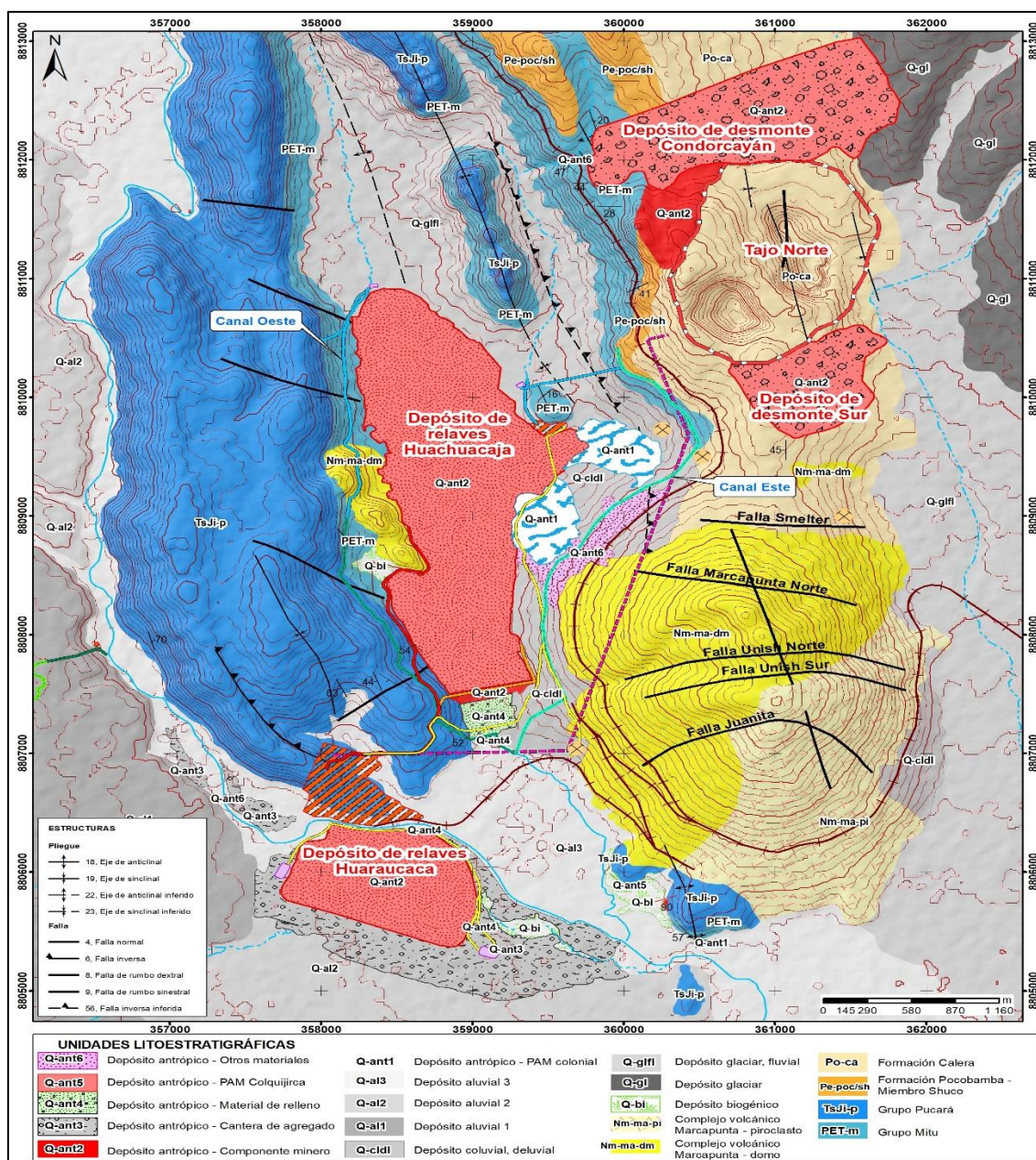


Figura 6.10. Mapa geológico del ámbito de influencia del UF Colquijirca



A continuación, se describen las unidades litoestratigráficas, rocas volcánicas y estructuras identificadas en la caracterización geológica.

6.2.1.1. Litoestratigrafía

a. Grupo Mitu (PET-m)

En el cuadrángulo de Ambo (21-k), Mc Laughlin (1924) definido como grupo Mitu a secuencias detrítica de color rojo que aflora en la localidad de Mitu. En el cuadrángulo de Cerro de Pasco la base de este grupo fue identificado en la hacienda Huanca, donde yace en discordancia angular sobre las rocas del Grupo Tarma-Copacabana y/o al Grupo Ambo; asimismo, al oeste del tajo norte de la UM Colquijirca, el Grupo Mitu yace directamente sobre las rocas metamórficas del Grupo Cabanillas, antiguamente considerado como Grupo Excelsior (Jenks, 1951; Ángeles, 1999; Cobbing et al., 2006).

Litológicamente se encuentra compuesto por intercalación de areniscas rojas, lutitas rojas y conglomerados. Las areniscas son feldespáticas y los conglomerados presentan clastos de cuarzo lechoso, areniscas grises y cuarcitas, además de, estructuras sedimentarias de canal y laminación cruzada (puntos CG-COL6, CG-COL12, CG-COL13, CG-COL14, CG-COL15 y CG-COL19).

b. Grupo Pucará (TsJi-p)

Esta unidad se encuentra compuesta por calizas calizas wackestone-packstone de color beige, blanca y pardos, intercalado con niveles de calizas wackestone grises. Presenta óxidos de hierro y óxidos de manganeso en fracturas y nódulos de calcita (puntos CG-COL1, CG-COL9, CG-COL10 y CG-COL11).

En la margen izquierda del río Andacancha afloran zonas de brechas sedimentarias y volcánicas con presencia de alteración argílica, silicificación y oxidación. (puntos CG-COL7 y CG-COL8)

c. Formación Pocobamba – Miembro Shuco (Pe-sh)

Esta formación fue descrita por Mc Laughlin (1924); luego, Jenks (1951) la asume como Formación Casapalca y la divide en tres miembros: miembro inferior, conglomerado Shuco y miembro Calera; posteriormente, Cobbing et al. (1996) siguen la nomenclatura de Jenks. Poco tiempo después, Ángeles (1999) redefine la estratigrafía cenozoica de Cerro de Pasco, la cual está conformada por la Formación Pocobamba (dividida en dos miembros: Cacuán y Shuco) y la Formación Calera. En la publicación del boletín del cuadrángulo de Cerro de Pasco 22-k, Rodríguez, Cueva y Carlotto (2011) mantienen la denominación de Ángeles (1999) en el sector de Cerro de Pasco y lo extienden hacia Huayllay y la laguna Punrún, en base a estudios de Cueva (2008) y Cueva *et al.* (2008).

Estas secuencias sedimentarias afloran en el lado oeste del tajo Norte. Se encuentran constituidos por conglomerados calcáreos con clastos de calizas (2 a 50 cm de diámetro), englobado en matriz calcárea. Yace sobre niveles de areniscas rojas (punto CG-COL16).



d. Formación Calera (Po-ca)

Estas secuencias afloran en el borde sureste del depósito de desmonte Sur. Se encuentra constituido por calizas grises intercaladas con niveles delgados de calizas negras y niveles de óxidos de hierro. Los estratos son delgados y se encuentran altamente fracturados.

e. Depósitos cuaternarios (Q)

El área de estudio presenta depósitos cuaternarios de origen glacial, glacial-fluvial, aluvial, coluvial-deluvial, biogénico y antropogénico (PAM colonial, componente minero, cantera de agregado, material de relleno, PAM Colquijirca y otros materiales), dispuestas en laderas y en terrazas en el fondo de los valles, desarrollados sobre las rocas precedentes descritas anteriormente.

El depósito **glacial** se encuentra en el extremo noreste del C.P. Colquijirca, formando una morrena extensa dispuesta de noreste a suroeste, constituida por bloques y gravas heterométricos y subredondeados de calizas y otros fragmentos clásticos, englobados en matriz arcillo-limosa y limo-arenosa, originados a partir de los procesos glaciares (avance y retroceso del hielo).

El depósito **glacial-fluvial** predomina ampliamente en ambas márgenes de las quebradas Ocshapampa, Andacancha y Huachuacaja. Se encuentran formando laderas denudadas de pendiente moderada. Presenta predominio de matriz respecto a los fragmentos (matriz soportada); los fragmentos son subredondeados de caliza, arenisca, chert y conglomerados, y se encuentran, englobados en matriz limoarenosa gris a gris oscura.

El depósito **aluvial** aflora ampliamente en ambas márgenes del río San Juan. Fue subdividido en 3 secuencias: Q-al1, Q-al2 y Q-al3, diferenciado en terrazas de diferente nivel topográfico y litológico condicionado los procesos de maduración de un valle aluvial. Litológicamente se encuentra compuesto por material clasto soportado compuesto por gravas, cantos y arenas; los clastos corresponden a calizas, andesita, conglomerado, granodiorita, en matriz arenosa (puntos CG-COL3, CG-COL4 y CG-COL5). Adicionalmente presenta niveles de gravas matriz soportada, heterométrica (<15 cm de diámetro) y con presencia de estructuras sedimentarias de canales. Los clastos corresponden a andesita subvolcánica, toba de cristales, calizas grises fosilíferas y calizas arenosas y margosas, englobado en matriz arenolimosa (CG-COL2).

El depósito coluvial-deluvial se encuentra dispuesto en las laderas este y oeste del cerro Marcapunta. Presenta material de coloración naranja compuesto por fragmentos de dacita porfídica.; los clastos se encuentran argilizados y presentan hematita, ojos de cuarzo, caolín y plagioclasa rosada (CG-COL20 y CG-COL21).

El depósito biogénico se encuentra en la margen izquierda del río Andacancha, aledaño a las bocaminas Borges y Santa María. Presenta niveles de limos y arcillas con esporádicos fragmentos de rocas volcánicas y sedimentarias.

6.2.1.2. Rocas volcánicas

Estas rocas corresponden al Complejo volcánico Marcapunta, emplazadas durante el Mioceno. La parte central de este evento volcánico se ubica en el cerro Marcapunta, donde se diferenció dos zonas, la primera en el lado sureste asociado a flujos piroclásticos, y la



segunda, a domos de dacita y andesita los cuales abarcan el lado noroeste del cerro Marcapunta y se extienden hacia el borde oeste del DR Huachuacaja.

En el punto CG-COL18 se reconoció un cuerpo de dacita/andesita porfídica compuesto por cristales de plagioclasa, hornblenda y ojos de cuarzo. Los cristales máficos presentan alteración a epidota y se encuentran oxidados. Las fracturas presentan óxidos de hierro y manganeso.

6.2.1.3. Contexto estructural

Las estructuras identificadas en el área de estudio consisten en fallas, lineamientos y discordancias en el contacto de las unidades litoestratigráficas.

La zona de estudio presenta fallas de dirección oeste a este (sector Marcapunta) y noroeste a sureste (sector planta de tratamiento Huaracaca), en el primer caso se encuentran asociados a la actividad volcánica del centro volcánico Marcapunta, y en el segundo, a rocas sedimentarias del Grupo Pucará. Adicionalmente, se interpretó pliegues (anticlinales y sinclinales) de dirección norte a sur, asociado al Grupo Mitu y Grupo Pucará, ubicadas en las quebradas Andacancha y Huachuacaja, por otra parte, se interpretó pliegues norte sur en el tajo Norte asociados a las rocas de la Formación calera.

6.2.1. Efluente minero

El monitoreo de efluente minero se realizó el 19 de octubre de 2020, dicho efluente (R-5) descarga a la quebrada Andacancha.

Los resultados del efluente minero fueron comparados con los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas, aprobados mediante Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM, tal cual se establece en los instrumentos de gestión ambiental del administrado, los cuales no superaron sus valores establecidos en la norma en mención (Tabla 6.6). La totalidad de los resultados de la evaluación del efluente minero se presentan en el Anexo B.

Tabla 6.6. Resultados de parámetros fisicoquímicos en efluentes comparado con los LMP para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas

Código		R-5	Límites Máximos Permisibles para la Descarga de Efluentes Líquidos de Actividades Minero - Metalúrgicas D.S. N.º010-2010-MINAM
Fecha de muestreo		19/10/2020	
Hora de muestreo		15:50	
N.º de informe de ensayo		A-20/117199 52875/2020	
Parámetro	Unidad	Parámetros físico - químicos	Límite en cualquier momento
Potencial de hidrógeno (pH)*	Unid. de pH	8,36	6 - 9
Conductividad eléctrica (CE)*	µS/cm	2380	--
Oxígeno disuelto (OD)*	mg/L	6,89	--
Potencial REDOX (ORP)*	mv	147,1	--
Cianuro Total	mg/L	< 0,001	1
Cianuro Wad	mg/L	< 0,001	--
Cloruros	mg/L	12,8	--
Fluoruros	mg/L	0,43	--
Nitratos	mg/L NO3	3,90	--
Nitratos	mg/L N-NO3	17,3	--
Nitritos	mg/L NO2	0,21	--
Nitritos	mg/L N-NO2	0,69	--
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	1735	--
Arsénico Total	mg/L	0,00069	0,1
Cadmio Total	mg/L	0,00007	0,05
Cobre Total	mg/L	0,0041	0,5

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

Código	R-5	Límites Máximos Permisibles para la Descarga de Efluentes Líquidos de Actividades Minero - Metalúrgicas D.S. N.º 010-2010-MINAM
Fecha de muestreo	19/10/2020	
Hora de muestreo	15:50	
N.º de informe de ensayo	A-20/117199 52875/2020	
Parámetro	Unidad	Parámetros físico - químicos
Mercurio Total	mg/L	< 0,000070
Plomo Total	mg/L	0,00028
Zinc Total	mg/L	0,051
Hierro Disuelto	mg/L	< 0,03
		Límite en cualquier momento

(--) Parámetro no aplica para esta norma / (<) Parámetro por debajo del límite de detección

En la Tabla 6.7 se presenta la caracterización de los metales caracterización de los metales totales, disueltos y suspendidos del efluente minero. Asimismo, los resultados resaltados de color celeste representan el predominio del metal en forma disuelta y el color verde representa el predominio del metal en forma suspendida.

Tabla 6.7. Caracterización de los metales en el efluente minero

Parámetros	Unidades	R-5		
		Efluente minero		
		MT	MD	MS
Arsénico (As)	mg/L	0,00069	97,10%	2,90%
Cadmio (Cd)	mg/L	0,00007	7,14%	92,86%
Cobre (Cu)	mg/L	0,0041	43,90%	56,10%
Hierro (Fe)	mg/L	0,04	37,50%	62,50%
Plomo (Pb)	mg/L	0,00028	25,00%	75,00%
Mercurio (Hg)	mg/L	0,000035	100,00%	0,00%
Zinc (Zn)	mg/L	0,051	49,02%	50,98%

Fuente: Informe de Ensayo del laboratorio AGQ PERÚ, S.A. C. N.º A-20/119909

MT: metales totales. MD: metales disueltos, MS: metales en suspensión

La caracterización hidroquímica se realizó en base a la información de los puntos de muestreo de efluente minero de los muestreos efectuados en octubre de 2020. Además, se realizó el análisis de las concentraciones de cationes mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+}) y aniones (HCO_3^{-} , CO_3 , SO_4^{2-} y Cl^{-}), obtenidos a partir de los análisis de laboratorio (ver Anexo B), con los cuales se elaboraron el diagrama de Piper y un mapa hidroquímico en base a los gráficos de Stiff. Asimismo, se utilizó la suma de los metales disueltos (zinc, cobre, cadmio, plomo, cobalto, níquel, hierro y manganeso) y el potencial de hidrógeno para ubicar las muestras en un diagrama de Ficklin para la caracterización de las aguas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el efluente minero se clasificó como «sulfatada cálcica» según el diagrama de Piper y Stiff (Figura 6.11 y Tabla 6.8 respectivamente), de acuerdo al diagrama de Ficklin (Figura 6.12) se clasifica como «cercano a neutral con bajo contenido de metales».



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

STEC: Subdirección Técnica
Científica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

Efluente minero – Ámbito de la quebrada y río Andacancha

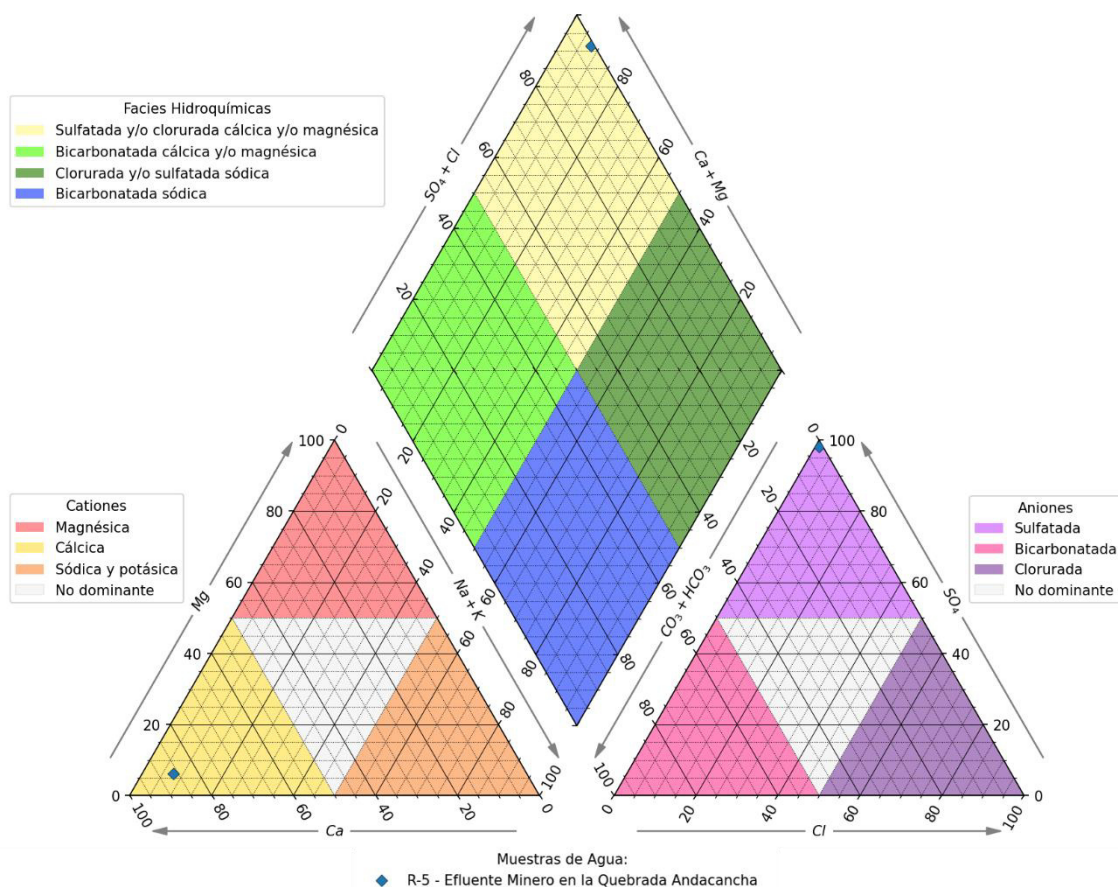


Figura 6.11. Diagrama de Piper de las muestras del efluente minero en el ámbito de la quebrada y río Andacancha

Tabla 6.8. Clasificación de las muestras del efluente según diagramas de Stiff

Cuerpo de agua	Muestra	Error balance iónico	Clasificación	Diagramas Stiff
Efluente Minero	R-5	8.02	Sulfatada Cálcica	



Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

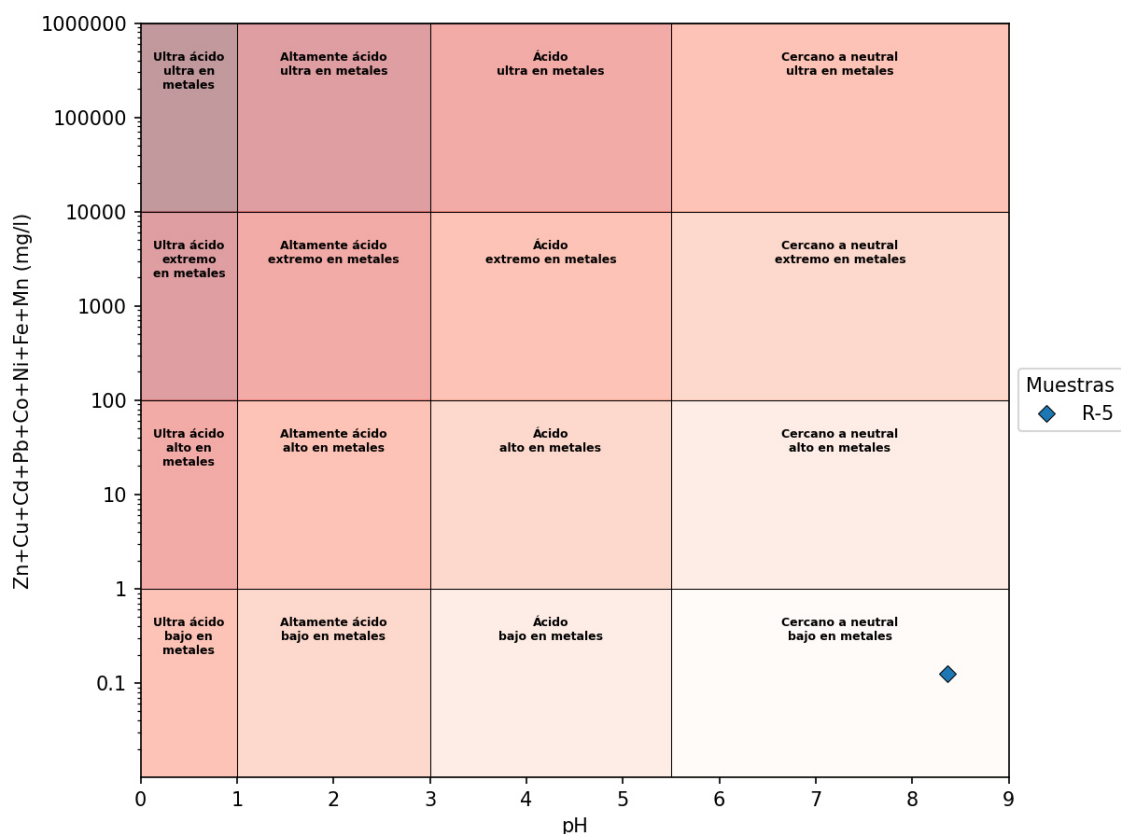


Figura 6.12. Clasificación de las muestras de agua de efluente según el diagrama de Ficklin

6.2.2. Agua superficial

Se muestreó 9 puntos de agua superficial, de los cuales un punto se muestreó en la quebrada Huachuacaja (QHua), 2 puntos se encuentran en la quebrada Andacancha (QAnda, QHE-2), un punto a la salida de un canal el cual llega a la quebrada Andacancha (RAnda6), 3 puntos en el río Andacancha (RAnda5, A-2, E-11) y 2 puntos en un bofedal (B-1, B-1A).

Los resultados de la evaluación de agua superficial en la quebrada Huachuacaja y quebrada y río Andacancha, obtenidos de la evaluación en octubre de 2020 fueron comparados con los ECA para agua 2018 Cat.3: riego de vegetales y bebida de animales, tal cual se establece en los instrumentos de gestión ambiental del administrado (Tablas 6.9 y 6.10). La totalidad de los resultados de la evaluación del agua superficial se presentan en el Anexo B.

**PERÚ**Ministerio
del AmbienteOrganismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFASTEC: Subdirección Técnica
CientíficaDecenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud**Tabla 6.9.** Resultados de parámetros fisicoquímicos en agua superficial comparados con los ECA para agua 2018 Cat.3

Cuerpo de agua		Quebrada Huachuacaja	Quebrada Andacancha			Río Andacancha			Bofedal		Categoría 3: Riego de vegetales y Bebidas de animales	
Código		QHua	QAnda	QHE-2	RAnda6	RAnda5	A-2	E-11	B-1A	B-1		
Fecha de muestreo		21/10/2020	19/10/2020	19/10/2020	19/10/2020	19/10/2020	19/10/2020	16/10/2020	21/10/2020	16/10/2020		
Hora de muestreo		12:10	17:20	14:50	11:45	11:00	09:00	09:30	10:20	11:00		
N.º de informes de ensayo		A-20/117494	A-20/117208	A-20/117207	A-20/117206	A-20/117205	A-20/117204	A-20/116222	SAA-20/01159	A-20/116224		
Parámetros fisicoquímicos	Unidad	Valores									Riego de vegetales	Bebida de animales
Temperatura (T)*	°C	11,8	10,7	16	18,9	16,3	11,2	13,3	12,6	13,9	--	--
Potencial de hidrógeno (pH)*	Unid. de pH	8,53	8,32	8,32	8,03	8,02	8,29	7,81	7,97	8,42	6,5 - 8,5	6,5 - 8,4
Conductividad eléctrica (CE)*	µS/cm	351	394	2370	2310	2310	2380	2390	281	298	<2000	<=5000
Oxígeno disuelto (OD)*	mg/L	6,39	6,3	6,27	5,88	5,51	6,36	5,74	5,13	5,87	>=4	>5
Potencial REDOX (ORP)*	mv	139,8	189,4	147,3	171,2	131,1	---	---	---	---	--	--
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	8,2	80	1709	1760	1733	1758	1507	41	33	300	500

Fuente: Informes de ensayo AGQ Perú S.A.C.

(-- Parámetro no aplica para esta norma / (---) parámetro no analizado / (<) Parámetro por debajo del límite de detección / (*) Parámetros medidos in situ

: Parámetros que superan/están por debajo/fuera del rango de los ECA Agua Cat. 3 Riego de vegetales y Bebida de animales

: Parámetros que superan/están por debajo/fuera del rango de los ECA Agua Cat. 3 Riego de vegetales

: Parámetros que superan/están por debajo/fuera del rango de los ECA Agua Cat. 3 Bebida de animales

(1) Comparado con el instrumento de gestión ambiental del administrado Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de Operaciones a 18,000 TMD de Sociedad Minera El Brocal S.A.A., aprobado mediante RD 361-2012-MEM-AAM

**PERÚ**Ministerio
del AmbienteOrganismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFASTEC: Subdirección Técnica
CientíficaDecenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud**Tabla 6.10.** Resultados de metales totales en agua superficial comparados con los ECA para Agua 2008

Ámbito de estudio		Relavera Huachuacaja									Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua D.S. N.º002-2008-MINAM (1)	
Cuerpo de agua	Quebrada Huachuacaja	Quebrada Andacancha			Río Andacancha			Bofedal				
Código	QHua	QAnda	QHE-2	RAnda6	RAnda5	A-2	E-11	B-1A	B-1			
Fecha de muestreo	20/10/2020	19/10/2020	19/10/2020	19/10/2020	19/10/2020	19/10/2020	16/10/2020	21/10/2020	16/10/2020			
Hora de muestreo	12:10	17:20	14:50	11:45	11:00	09:00	09:30	10:20	11:00			
N.º de informe de ensayo		SAA-20/01159	SAA-20/01159	SAA-20/01159	SAA-20/01159	SAA-20/01159	SAA-20/01159	SAA-20/01102	SAA-20/01159	SAA-20/01107	Categoría 3: Riego de vegetales y Bebidas de animales	
Parámetro	Unid ad	Metales totales									Riego de vegetales	Bebida de animales
Arsénico Total	mg/L	0,00153	0,00789	0,00098	0,00205	0,00245	0,00242	0,00668	0,01735	0,01319	0,05	0,1
Cadmio Total	mg/L	< 0,00001	0,00013	0,00025	0,00026	0,00026	0,00022	0,00031	0,00016	0,00014	0,005	0,01
Calcio Total	mg/L	36	50	530	522	519	516	513	42	43	200	--
Cobre Total	mg/L	0,0016	0,0118	0,0046	0,0116	0,0121	0,0115	0,0134	0,0225	0,0178	0,2	0,5
Hierro Total	mg/L	0,06	0,16	0,05	0,09	0,09	0,08	0,1	0,14	0,1	1	1
Manganeso Total	mg/L	0,00781	0,01337	0,12423	0,16344	0,16291	0,14564	0,17777	0,02026	0,00922	0,2	0,2
Mercurio Total	mg/L	< 0,000070	< 0,000070	< 0,000070	< 0,000070	< 0,000070	< 0,000070	0,000199	0,000747	0,000218	0,001	0,001
Plomo Total	mg/L	0,00068	0,00593	0,00034	0,00112	0,00159	0,00108	0,00981	0,0308	0,02505	0,05	0,05
Zinc Total	mg/L	0,018	0,055	0,067	0,064	0,078	0,057	0,053	0,071	0,069	2	24

Fuente: Informes de ensayo AGQ Perú S.A.C.

(-) Parámetro no aplica para esta norma / (<) Parámetro por debajo del límite de detección

: Parámetros que superan/están por debajo/fuera del rango de los ECA Agua Cat. 3 Riego de vegetales

(1) Comparado con el instrumento de gestión ambiental del administrado Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de Operaciones a 18,000 TMD de Sociedad Minera El Brocal S.A.A., aprobado mediante RD 361-2012-MEM-AAM



En la Tabla 6.11 se presenta la caracterización de los metales totales, disueltos y suspendidos en agua superficial. Asimismo, los resultados resaltados de color celeste representan el predominio del metal en forma disuelta y el color verde representa el predominio del metal en forma suspendida.

Tabla 6.11. Caracterización de los metales en agua superficial en el ámbito relavera Huachuacaja

Parámetros	Unidades	QAnda			QHua		
		MT	MD	MS	MT	MD	MS
Arsénico (As)	mg/L	0,00789	51,33%	48,67%	0,00153	97,39%	2,61%
Cadmio (Cd)	mg/L	0,00013	38,46%	61,54%	0,000005	100,00%	0,00%
Cobre (Cu)	mg/L	0,0118	41,53%	58,47%	0,0016	37,50%	62,50%
Mercurio (Hg)	mg/L	0,000035	100,00%	0,00%	0,000035	100,00%	0,00%
Plomo (Pb)	mg/L	0,00593	3,37%	96,63%	0,00068	4,41%	95,59%
Zinc (Zn)	mg/L	0,055	34,55%	65,45%	0,018	77,78%	22,22%
Parámetros	Unidades	QHE-2			Randa6		
		MT	MD	MS	MT	MD	MS
Arsénico (As)	mg/L	0,00098	91,84%	8,16%	0,00205	66,83%	33,17%
Cadmio (Cd)	mg/L	0,00025	76,00%	24,00%	0,00026	84,62%	15,38%
Cobre (Cu)	mg/L	0,0046	50,00%	50,00%	0,0116	50,00%	50,00%
Mercurio (Hg)	mg/L	0,000035	100,00%	0,00%	0,000035	100,00%	0,00%
Plomo (Pb)	mg/L	0,00034	32,35%	67,65%	0,00112	2,68%	97,32%
Zinc (Zn)	mg/L	0,067	56,72%	43,28%	0,064	53,13%	46,88%
Parámetros	Unidades	RAnda5			A-2		
		MT	MD	MS	MT	MD	MS
Arsénico (As)	mg/L	0,00245	63,67%	36,33%	0,00242	66,12%	33,88%
Cadmio (Cd)	mg/L	0,00026	88,46%	11,54%	0,00022	90,91%	9,09%
Cobre (Cu)	mg/L	0,0121	52,89%	47,11%	0,0115	60,87%	39,13%
Mercurio (Hg)	mg/L	0,000035	100,00%	0,00%	0,000035	100,00%	0,00%
Plomo (Pb)	mg/L	0,00159	3,77%	96,23%	0,00108	11,11%	88,89%
Zinc (Zn)	mg/L	0,078	44,87%	55,13%	0,057	91,23%	8,77%
Parámetros	Unidades	B-1A					
		MT	MD	MS			
Arsénico (As)	mg/L	0,01735	64,09%	35,91%			
Cadmio (Cd)	mg/L	0,00016	50,00%	50,00%			
Cobre (Cu)	mg/L	0,0225	48,89%	51,11%			
Mercurio (Hg)	mg/L	0,000747	4,69%	95,31%			
Plomo (Pb)	mg/L	0,0308	18,93%	81,07%			
Zinc (Zn)	mg/L	0,071	64,79%	35,21%			

Fuente: Informe de Ensayo del laboratorio AGQ PERU, S.A. C. N.º A-20/117494, A-20/117208, A-20/117207, A-20/117206, A-20/117205, A-20/117204, SAA-20/01159

MT: metales totales. MD: metales disueltos, MS: metales en suspensión

La caracterización hidroquímica se realizó en base a la información de los puntos de muestreo de agua superficial de los muestreos efectuados en octubre del 2020. Además, se realizó el análisis de las concentraciones de cationes mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) y aniones (HCO_3^- , CO_3 , SO_4^{2-} y Cl^-), obtenidos a partir de los análisis de laboratorio (Anexo B), con los cuales se elaboraron el diagrama de Piper y un mapa hidroquímico en base a los gráficos de Stiff. Asimismo, se utilizó la suma de los metales disueltos (zinc, cobre, cadmio, plomo, cobalto, níquel, hierro y manganeso) y el potencial de hidrógeno para ubicar las muestras en un diagrama de Ficklin para la caracterización de las aguas.

En cuanto a las aguas superficiales, según los diagramas de Piper y Stiff (Figura 6.13 y Tabla 6.12 respectivamente), los puntos QAnda y QHua se clasificaron como «bicarbonatada cálcica» y «bicarbonatada magnésica» respectivamente, el resto de puntos (QHE-2, RAnda6, RAnda5, A-2 y E-11) se clasificaron como «sulfatada cálcica». Según el diagrama de Ficklin (Figura 6.14) se clasifican como «cercano a neutral con bajo contenido de metales».

Agua superficial

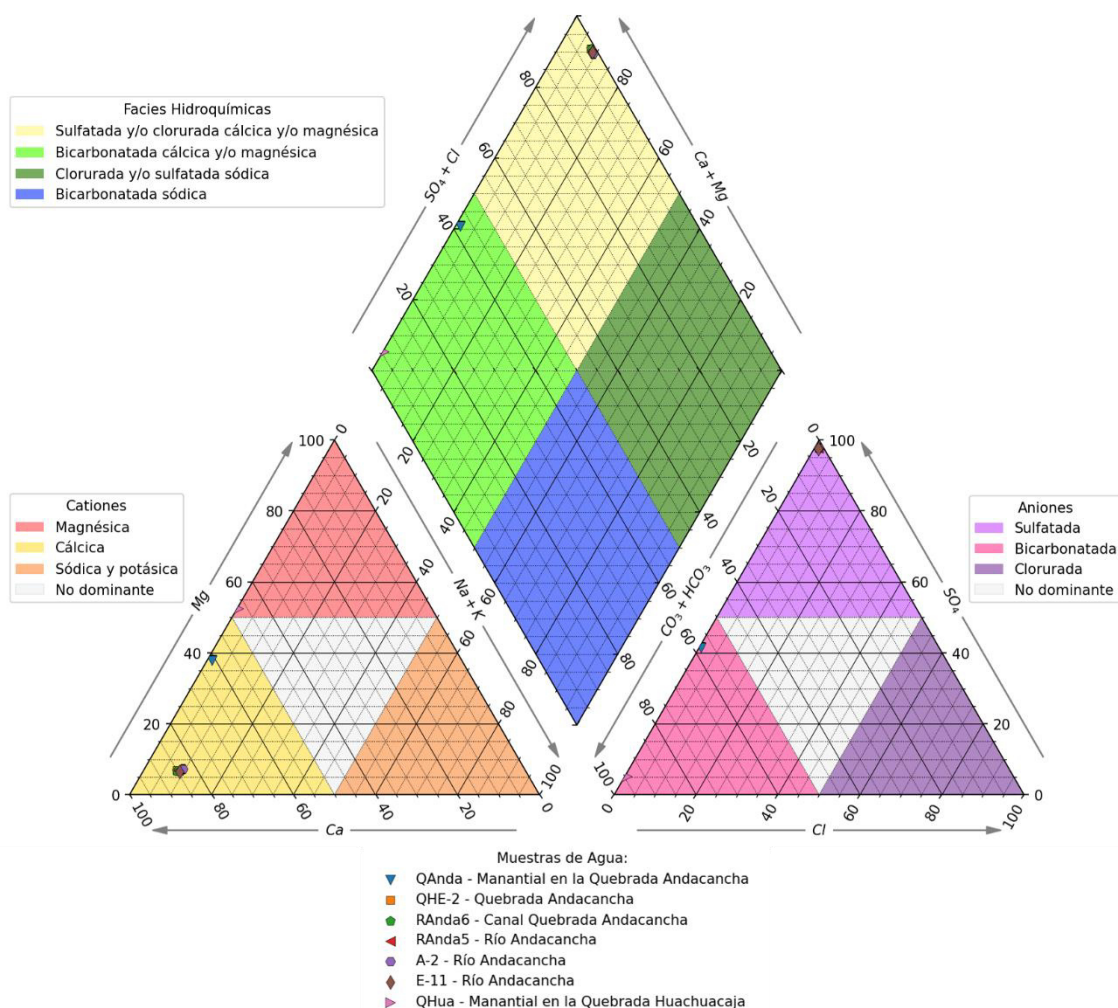


Figura 6.13. Diagrama de Piper de las muestras de agua superficial

**PERÚ**Ministerio
del AmbienteOrganismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFASTEC: Subdirección Técnica
CientíficaDecenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud**Tabla 6.12.** Clasificación de las muestras de agua superficial según diagramas de Stiff

Cuerpo de agua	Muestra	Error balance iónico	Clasificación	Diagramas Stiff
Quebrada Andacancha	QAnda	1.22	Cálcica Bicarbonatada	QAnda : Cálcica Bicarbonatada
Quebrada Andacancha	QHE-2	9.27	Sulfatada Cálcica	QHE-2 : Sulfatada Cálcica
Quebrada Andacancha	RAnda6	10.74	Sulfatada Cálcica	RAnda6 : Sulfatada Cálcica
Río Andacancha	RAnda5	11.05	Sulfatada Cálcica	RAnda5 : Sulfatada Cálcica
Río Andacancha	A-2	14.56	Sulfatada Cálcica	A-2 : Sulfatada Cálcica
Río Andacancha	E-11	3.88	Sulfatada Cálcica	E-11 : Sulfatada Cálcica



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

STEC: Subdirección Técnica
Científica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

Cuerpo de agua	Muestra	Error balance iónico	Clasificación	Diagramas Stiff
Quebrada Huachuacaja	QHua	2.03	Bicarbonatada Magnésica	QHua : Bicarbonatada Magnésica

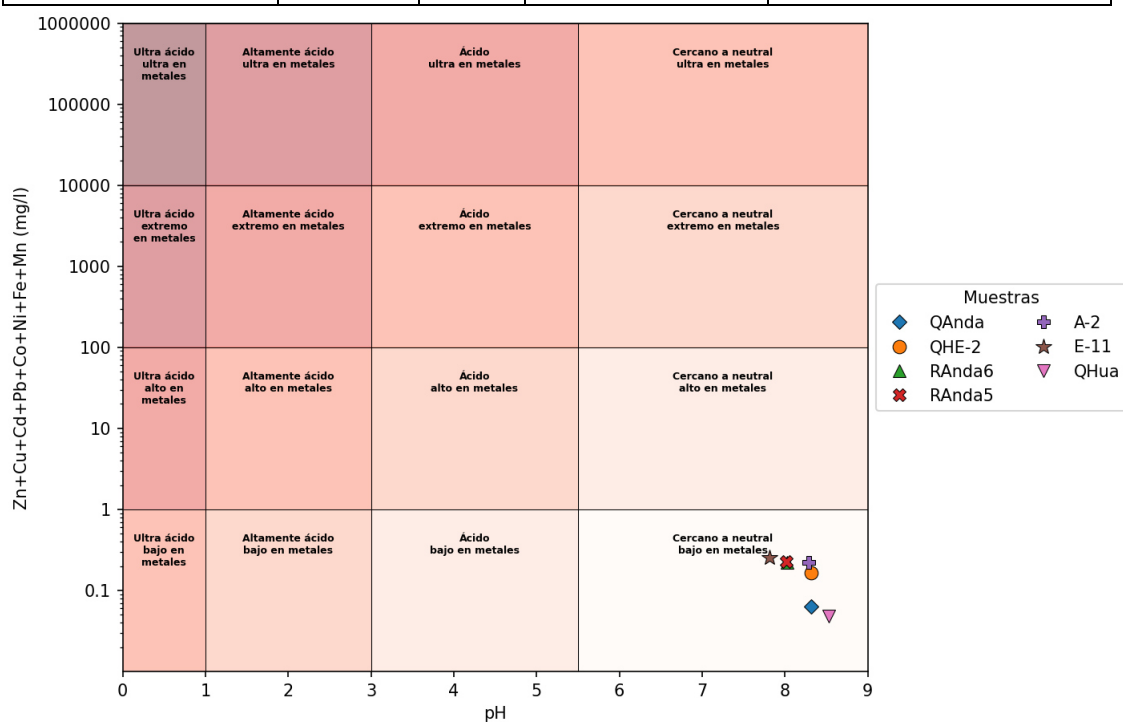


Figura 6.14. Clasificación de las muestras de agua superficial de filtraciones según el diagrama de Ficklin



6.2.3. Hidrobiología

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis de las comunidades hidrobiológicas en el ámbito de la UM Colquijirca, evaluada en octubre de 2020.

Para un mejor entendimiento, las gráficas están diseñadas de acuerdo con el recorrido altitudinal de cada cuerpo de agua (ríos, quebradas, flujo de agua y bofedal) el cual está influenciado por los vertimientos y componentes mineros.

a. Macroinvertebrados bentónicos

- **Composición, riqueza, densidad (abundancia) y diversidad alfa**

La comunidad de macroinvertebrados bentónicos en la zona 1 estuvo representada por 27 taxones, agrupada en 4 phyla, 8 clases, 13 órdenes, 19 familias y 27 géneros (Anexo B).

En las Figuras 6.15a y 6.15b se observa el comportamiento y distribución de la densidad y riqueza de los macroinvertebrados bentónicos a nivel de orden taxonómico, respectivamente, donde se registró lo siguiente:

En la quebrada Huachuacaja (QHua), ubicado como punto control o pristino, se registró densidad de 630 individuos/0,27m² y riqueza de 16 taxones; siendo mayor representado por los taxones *Austrelimnobia* sp. y Haplotaxidae n.d. de los órdenes Coleoptera y Tubificida respectivamente.

En la quebrada Andacancha (QAnda), ubicado como punto control o pristino se registró densidad de 798 individuos/0,27m² y riqueza de 20 taxones; siendo mayor representado por los taxones Sarcophagidae n.d. y *Cricotopus* sp. de los órdenes Sarcophagidae y Díptera respectivamente.

En el Bofedal (B-1A), ubicado en el margen izquierdo del recorrido del río Andacancha, se registró densidad de 582 individuos/0,27m² y riqueza de 18 taxones; siendo mayor representado por los taxones *Physidae* n.d. y *Rhantus* sp. de los órdenes Basommatophora y Coleoptera respectivamente.

En el río Andacancha el punto E-11 registró la mayor densidad con 184 individuos/0,27m² y riqueza de 7 taxones, con respecto a los puntos Randa5 y A-2; siendo mayor representado por el taxón Haplotaxidae n.d. del orden Tubificida.

En la Tabla 6.13 se observa la diversidad alfa de macroinvertebrados bentónicos registrada en los cuerpos de agua; donde en los puntos control o prístinos tales como QHua, QAnda y B-1A se registraron los mayores valores de diversidad verdadera N1 (7,12 a 8,64), con respecto a los puntos en el río Andacancha tales como Randa5, A-2 y E-11, ubicados aguas abajo del vertimiento R-5. Esto se vio reflejado en los bajos valores de dominancia de Simpson en los puntos control (0,15 a 0,19), lo que indica una baja dominancia de ciertos grupos de taxones; asimismo se registraron entre moderado a altos valores de equidad de Pielou (0,69 a 0,74) en los puntos control con respecto a los puntos en el río Andacancha, lo que indica que existe una moderada y alta distribución homogénea de ciertos grupos de taxones en el ecosistema acuático.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

STEC: Subdirección Técnica
Científica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

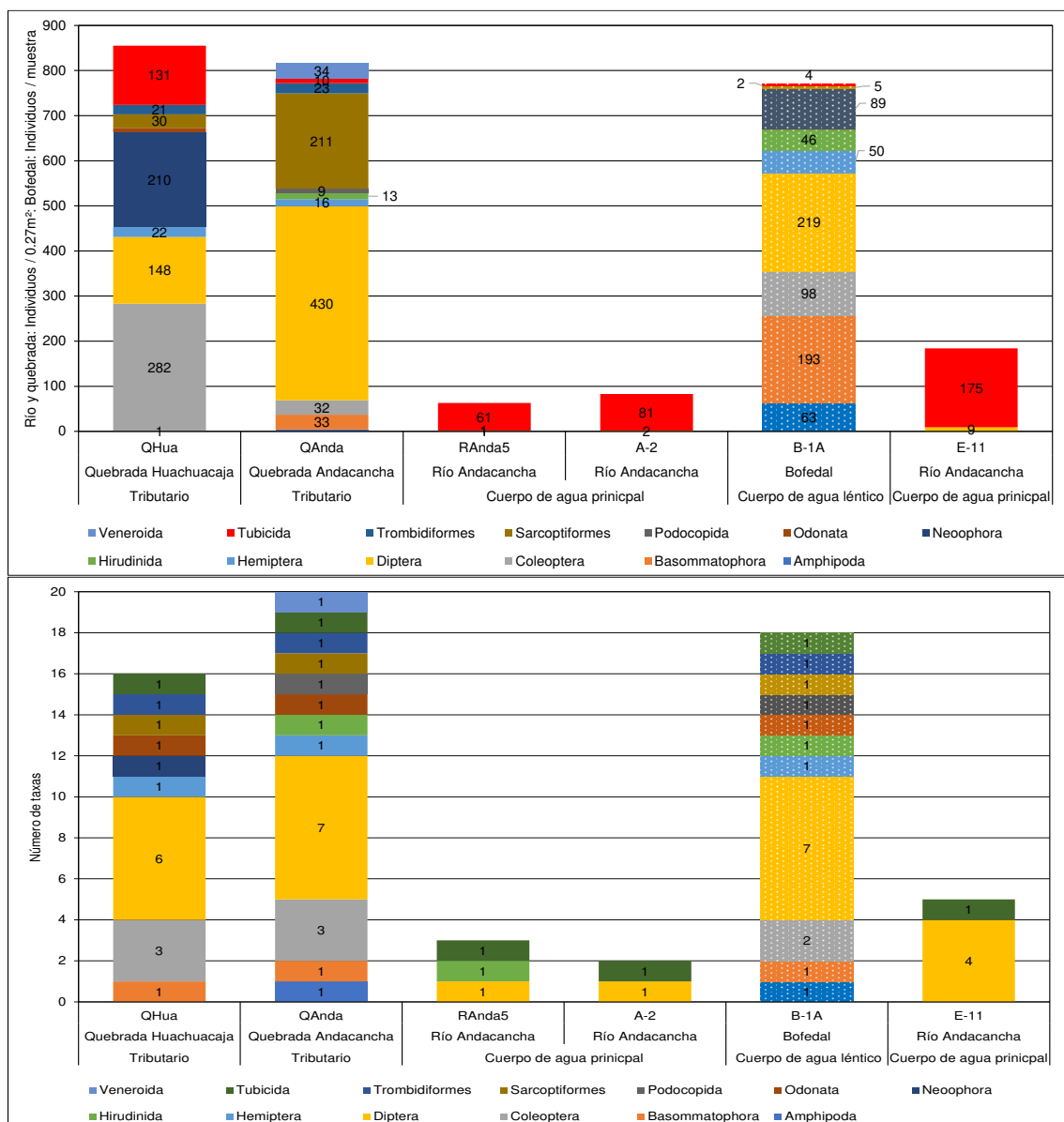


Figura 6.15. a) Densidad (abundancia), b) Riqueza (número de especies distintas) con respecto al orden taxonómico de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos

Tabla 6.13. Diversidad alfa de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos

Diversidad alfa	Quebrada Huachuacaja	Quebrada Andacancha	Río Andacancha	Río Andacancha	Bofedal	Río Andacancha
	QHua	QAnda	RAnda5	A-2	B-1A	E-11
Diversidad verdadera (N1)	7,122	7,919	1,177	1,12	8,643	1,294
Equidad de Pielou (J')	0,7081	0,6907	0,1482	0,1639	0,7462	0,16
Dominancia de Simpson (Y)	0,1951	0,1753	0,938	0,953	0,1501	0,9053



• Resultados del protocolo CERA-S modificado

En la Tabla 6.14 se observa los resultados obtenidos del análisis de la calidad ecológica según el protocolo CERA-S modificado.

Para la calidad hidromorfológica, se obtuvo moderada calidad en el 100 % en los puntos muestreados. Esta evaluación es importante porque nos permite medir el grado de degradación del canal fluvial y de la vegetación de ribera adyacente

Para la calidad biológica (ABI) en los puntos de muestreo se obtuvo moderada calidad en el 25 %, buena calidad en el 25 % y pésima calidad en el 50 %. Esta evaluación nos permite medir el grado de impacto en el cuerpo de agua a través de la tolerancia o sensibilidad de especies macroinvertebrados.

Finalmente, el estado ecológico se obtuvo a través de una recombinación de la calidad hidromorfológica y la calidad biológica registrando una pésima calidad en el 100% de los puntos registrados. Esta evaluación es importante porque nos permite hacer una medición integral del estado en el que se encuentra el ecosistema e incluye la evaluación tanto de los alrededores del río como del ambiente acuático.

Tabla 6.14. Resultados de la calidad ecológica según el protocolo CERA-S modificado

Cuerpo de agua	Puntos de muestreo	CERA-S		
		Calidad hidromorfológica	Calidad Biológica (ABI)	Estado ecológico
Quebrada Huachuacaja	QHua	-	Moderado	-
Quebrada Andacancha	QAnda	-	Bueno	-
Río Andacancha	RAnda5	Moderada	Pésimo	Pésimo
Río Andacancha	A-2	Moderada	Pésimo	Pésimo
Bofedal	B-1 A	-	-	-
Río Andacancha	E-11	Moderada	Pésimo	Pésimo

:- No determinado debido a que los cuerpos de agua presentaron gran parte condiciones de ambientes lénticos retribuida por la época seca

b. Microorganismos

• Composición, riqueza, densidad (abundancia) y diversidad alfa

En la zona 1 se registró la composición de microorganismos registradas en los tributarios (Quebrada Huachuacaja y Quebrada Andacancha) y cuerpo principal del río Andacancha, representada por 6 especies, agrupada en 3 phyla, 2 clases, 2 órdenes, 4 familias y 5 géneros. Debido la baja abundancia y riqueza de microorganismos los resultados de las métricas se pueden observar directamente en el Anexo B.

c. Microalgas

• Composición, riqueza, densidad (abundancia) y diversidad alfa

La comunidad de macroinvertebrados bentónicos en la zona 1 estuvo representada por 107 taxones, agrupada en 5 phyla, 6 clases, 24 órdenes, 41 familias y 59 géneros (Anexo B).



En las Figuras 6.16a y 6.16b se observa el comportamiento y distribución de la densidad y riqueza respectivamente de las especies de microalgas a nivel de phylum taxonómico registrados en los cuerpos de agua, donde se registró lo siguiente:

En la quebrada Huachuacaja (QHua), ubicado como punto control o pristino, se registró densidad de 43016 organismos/ cm² y riqueza de 32 especies; siendo mayor representado por las especies *Nitzschia gracilis* y *Kamptonema formosum* de los phyla Bacillariophyta y Cyanobacteria respectivamente.

En la quebrada Andacancha (QAnda), ubicado como punto control o pristino se registró densidad de 159 751 / 75 cm² y riqueza de 38 especies; siendo mayor representado por las especies *Epithemia adnata*, *Staurosira sp. 1PAS* y *Cyanothece aeruginosa* de los phyla Bacillariophyta y Cyanobacteria respectivamente.

En el Bofedal (B-1A), ubicado en el margen izquierdo del recorrido del río Andacancha, se registró densidad de 101 490 organismos/cm² y riqueza de 44 especies; siendo mayor representado por las especies *Fragilaria capuccina* de y *Cylindrospermum sp.* los phyla Bacillariophyta y Cyanobacteria respectivamente.

En el recorrido del río Andacancha el punto A-2 registró la mayor densidad de 338 017 organismos/cm² con respecto a los puntos RAnda5 y E-11; siendo mayor representado por la especie *Fragilaria capuccina*. del phylum Bacillariophyta. Así mismo se observa un ligero incremento de número de especies desde el punto Randa5 al E-11.

En la Tabla 6.15 se observa la diversidad alfa de microalgas registradas en los cuerpos de agua; donde en los puntos controles o prístinos tales como QHua, QAnda y B-1A registraron los mayores valores de diversidad verdadera – N1 (14,3 a 27,3), con respecto a los puntos en el río Andacancha tales como Randa5, A-2 y E-11, ubicados aguas abajo del vertimiento R-5. Esto se vió reflejado en los bajos valores de dominancia de Simpson en los puntos controles (0,04 a 0,11), lo que indica una baja dominancia de ciertos grupos de especies; asimismo se registró moderado a altos valores de equidad de Pielou (0,73 a 0,87) en los puntos controles con respecto a los puntos en el río Andacancha, lo que indica que existe una moderada y alta distribución homogénea de ciertos grupos de taxones en el ecosistema acuático.

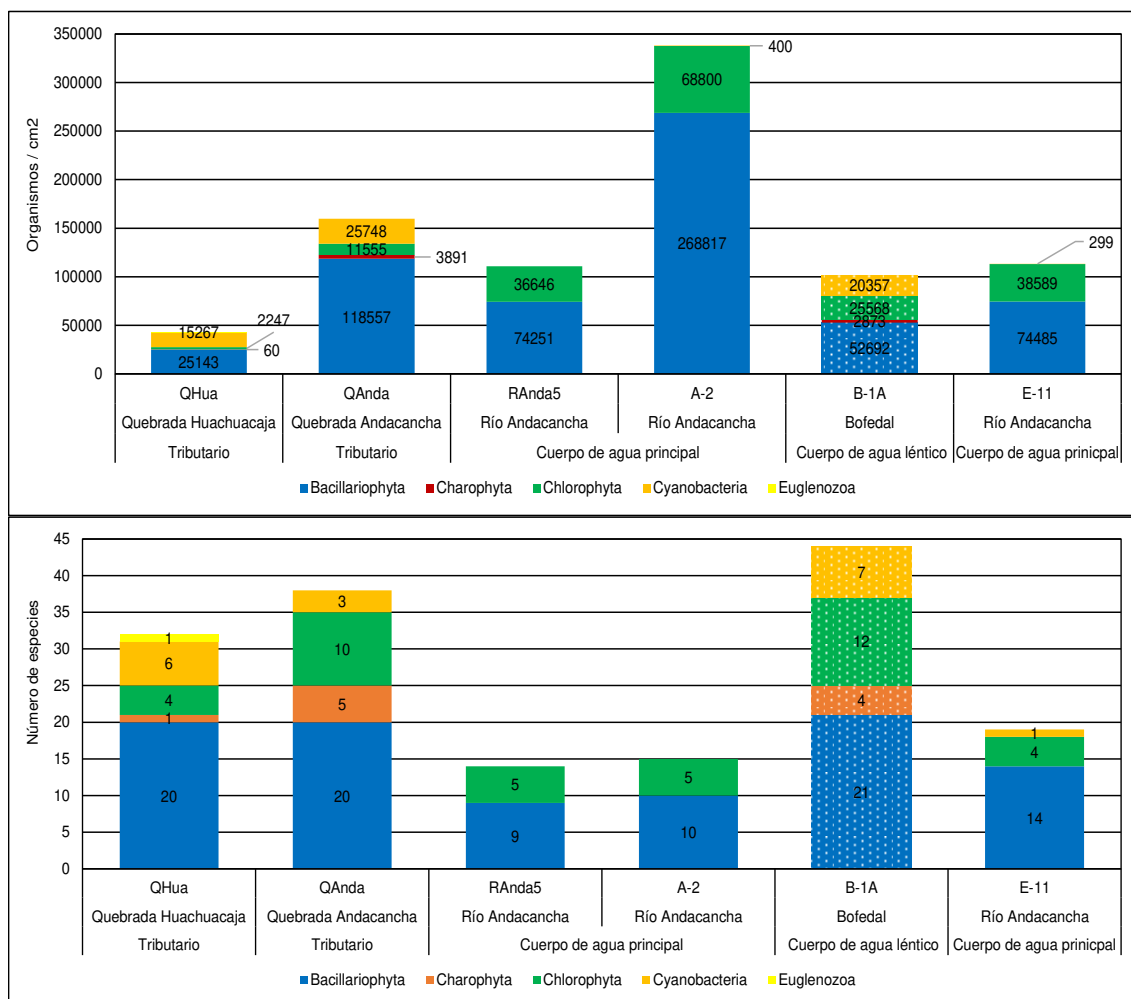
Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

Figura 6.16. a) Densidad (abundancia), **b)** Riqueza (número de especies distintas) con respecto al orden taxonómico de la comunidad de microalgas

Tabla 6.15. Diversidad alfa de la comunidad de microalgas

Diversidad alfa	Quebrada Huachuacaja	Quebrada Andacancha	Río Andacancha	Río Andacancha	Bofedal	Río Andacancha
	QHua	QAnda	RAnda5	A-2	B-1 ^a	E-11
Diversidad verdadera (N1)	20,41	14,3	4,393	6,879	27,2	5,269
Equidad de Pielou (J')	0,8703	0,7313	0,5608	0,7121	0,8729	0,5644
Dominancia de Simpson (Y)	0,0645	0,1133	0,281	0,1665	0,0474	0,2604

d. Peces

• Composición, riqueza, densidad (abundancia) y diversidad alfa

En la zona 1 solo se registró peces en la quebrada Huachuacaja (QHua) representada por 1 especie (*Orestia* sp.), agrupada en 1 phyla, 1 clase, 1 orden, 1 familia y 1 género. Debido a la baja abundancia y riqueza de peces los resultados de las métricas se pueden observar directamente en el Anexo B. Cabe mencionar que en el río Andacancha (E-11) se hizo el esfuerzo de pesca, sin embargo, no se colectó ningún espécimen.

**6.2.4. Agua subterránea**

Se muestreó un total de 4 puntos de agua subterránea en el ámbito del depósito de relaves Huachuacaja (en adelante, DR Huachuacaja), siendo estos: MHua-2, SDH-03, PMH-02 y PMH-01.

Los resultados de la evaluación de agua subterránea en el ámbito del DR Huachuacaja, obtenidos de la evaluación en octubre de 2020, fueron comparados, referencialmente, con los ECA para agua 2018 Cat.3: riego de vegetales y bebida de animales, tal cual se establece en los instrumentos de gestión ambiental del administrado (Tablas 6.16 y 6.17). La totalidad de los resultados de la evaluación del agua subterránea se presentan en el Anexo B.

Tabla 6.16. Resultados de parámetros fisicoquímicos en agua subterránea comparados referencialmente con los ECA para agua 2018 Cat.3

Ámbito de estudio		Relavera Huachuacaja				Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua D.S. N.º002-2008-MINAM (1)	
Código		MHua-2	SDH-03	PMH-02	PMH-01		
Fecha de muestreo		20/10/2020	24/10/2020	23/10/2020	24/10/2020		
Hora de muestreo		14:10	13:50	16:00	12:35		
N.º de informe de ensayo		A-20/117495	SSA-20/01194	SAA-20/01170	SSA-20/01194	Categoría 3: Riego de vegetales y Bebidas de animales	
Parámetro	Unidad	Valores				Riego de vegetales	Bebida de animales
Temperatura (T)*	°C	11,9	13,3	9,3	16,9	--	--
Potencial de hidrógeno (pH)*	Unid. de pH	7,47	7,62	6,98	7,47	6,5 - 8,5	6,5 - 8,4
Conductividad eléctrica (CE)*	µS/cm	473	491	1584	546	<2000	<=5000
Oxígeno disuelto (OD)*	mg/L	5,07	4,79	3,16	3,24	>=4	>5
Potencial REDOX (ORP)*	mV	173,4	179,7	48,6	68,3	--	--
Sulfatos	mg SO ₄ ⁻² /L	10	18	719	82	300	500

Fuente: Informes de ensayo AGQ Perú S.A.C.

(--) Parámetro no aplica para esta norma / (<) Parámetro por debajo del límite de detección

: Parámetros que superan/están por debajo/fuera del rango de los ECA Agua Cat. 3 Riego de vegetales y Bebida de animales

: Parámetros que superan/están por debajo/fuera del rango de los ECA Agua Cat. 3 Bebida de animales

(1) Comparado, referencialmente, con el instrumento de gestión ambiental del administrado Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de Operaciones a 18,000 TMD de Sociedad Minera El Brocal S.A.A., aprobado mediante RD 361-2012-MEM-AAM

**PERÚ**Ministerio
del AmbienteOrganismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFASTEC: Subdirección Técnica
CientíficaDecenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud**Tabla 6.17.** Resultados de metales totales en agua subterránea comparados referencialmente con los ECA para Agua 2008

Ámbito de estudio		Relavera Huachuacaja				Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua D.S. N.°002-2008-MINAM (1)	
Código		MHua-2	SDH-03	PMH-02	PMH-01		
Fecha de muestreo		20/10/2020	24/10/2020	23/10/2020	24/10/2020	Categoría 3: Riego de vegetales y Bebidas de animales	
Hora de muestreo		14:10	13:50	16:00	12:35		
N.° de informe de ensayo		SAA-20/01160	SAA-20/01194	SAA-20/01170	SAA-20/01194	Riego de vegetales	Bebida de animales
Parámetro	Unidad	Metales totales					
Arsénico Total	mg/L	0,00142	0,00213	0,16252	0,00099	0,05	0,1
Cadmio Total	mg/L	< 0,00001	0,0001	0,00012	< 0,00001	0,005	0,01
Calcio Total	mg/L	59	69	272	74	200	--
Cobre Total	mg/L	0,0008	0,0113	0,0011	0,0023	0,2	0,5
Hierro Total	mg/L	< 0,03	0,45	30	0,34	1	1
Manganeso Total	mg/L	0,00044	0,02151	10,364	0,0146	0,2	0,2
Mercurio Total	mg/L	< 0,000070	< 0,000070	< 0,000070	< 0,000070	0,001	0,001
Plomo Total	mg/L	0,00006	0,03582	0,0036	0,00332	0,05	0,05
Zinc Total	mg/L	0,021	0,046	0,014	0,021	2	24

Fuente: Informes de ensayo AGQ Perú S.A.C.

(--) Parámetro no aplica para esta norma / (<) Parámetro por debajo del límite de detección

: Parámetros que superan/están por debajo/fuera del rango de los ECA Agua Cat. 3 Riego de vegetales y Bebida de animales

: Parámetros que superan/están por debajo/fuera del rango de los ECA Agua Cat. 3 Riego de vegetales

(1) Comparado, referencialmente, con el instrumento de gestión ambiental del administrado Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de Operaciones a 18,000 TMD de Sociedad Minera El Brocal S.A.A., aprobado mediante RD 361-2012-MEM-AAM



En la Tabla 6.18 se presenta la caracterización de los metales totales, disueltos y suspendidos en agua subterránea. Asimismo, los resultados resaltados de color celeste representan el predominio del metal en forma disuelta y el color verde representa el predominio del metal en forma suspendida.

Tabla 6.18. Caracterización de los metales en agua subterránea en el ámbito de estudio relavera Huachuacaja

Parámetros	Unidades	MHua-2			SDH-03		
		MT	%MD	%MS	MT	MD	MS
Calcio (Ca)	mg/L	59	98,31%	1,69%	69	100,00%	0,00%
Hierro (Fe)	mg/L	0,015	100,00%	0,00%	0,45	3,33%	96,67%
Manganeso (Mn)	mg/L	0,00044	90,91%	9,09%	0,02151	17,15%	82,85%
Parámetros	Unidades	PMH-01			PMH-02		
		MT	MD	MS	MT	MD	MS
Calcio (Ca)	mg/L	74	98,65%	1,35%	272	98,53%	1,47%
Hierro (Fe)	mg/L	0,34	4,41%	95,59%	30	93,33%	6,67%
Manganeso (Mn)	mg/L	0,0146	99,86%	0,14%	10364	97,91%	2,09%
Manganeso (Mn)	mg/L	0,0146	99,86%	0,14%			

Fuente: Informe de Ensayo del laboratorio AGQ PERU, S.A. C. N.º SAA-20/01160, SAA-20/01194, SAA-20/01170

MT: metales totales. MD: metales disueltos, MS: metales en suspensión

La caracterización hidroquímica se realizó en base a la información de los puntos de muestreo de agua subterránea (piezómetros y manantial) de los muestreos efectuados en octubre de 2020. Además, se realizó el análisis de las concentraciones de cationes mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) y aniones (HCO_3^- , CO_3 , SO_4^{2-} y Cl^-), obtenidos a partir de los análisis de laboratorio (Anexo B), con los cuales se elaboraron el diagrama de Piper y un mapa hidroquímico en base a los gráficos de Stiff. Asimismo, se utilizó la suma de los metales disueltos (zinc, cobre, cadmio, plomo, cobalto, níquel, hierro y manganeso) y el potencial de hidrógeno para ubicar las muestras en un diagrama de Ficklin para la caracterización de las aguas.

Respecto a las aguas subterráneas, los piezómetros SDH-03, PMH-01 y el manantial MHua-2, se clasificaron como «bicarbonatada cálcica» de acuerdo a los diagramas de Piper y Stiff (Figura 6.17 y Tabla 6.19), según el diagrama de Ficklin (Figura 6.18) se clasifican como «cercano a neutral con bajo contenido de metales». a diferencia del piezómetro PMH-02 que se clasificó como «sulfatada cálcica», «cercano a neutral con extremo contenido de metales» respectivamente.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

STEC: Subdirección Técnica
Científica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

Agua Subterránea

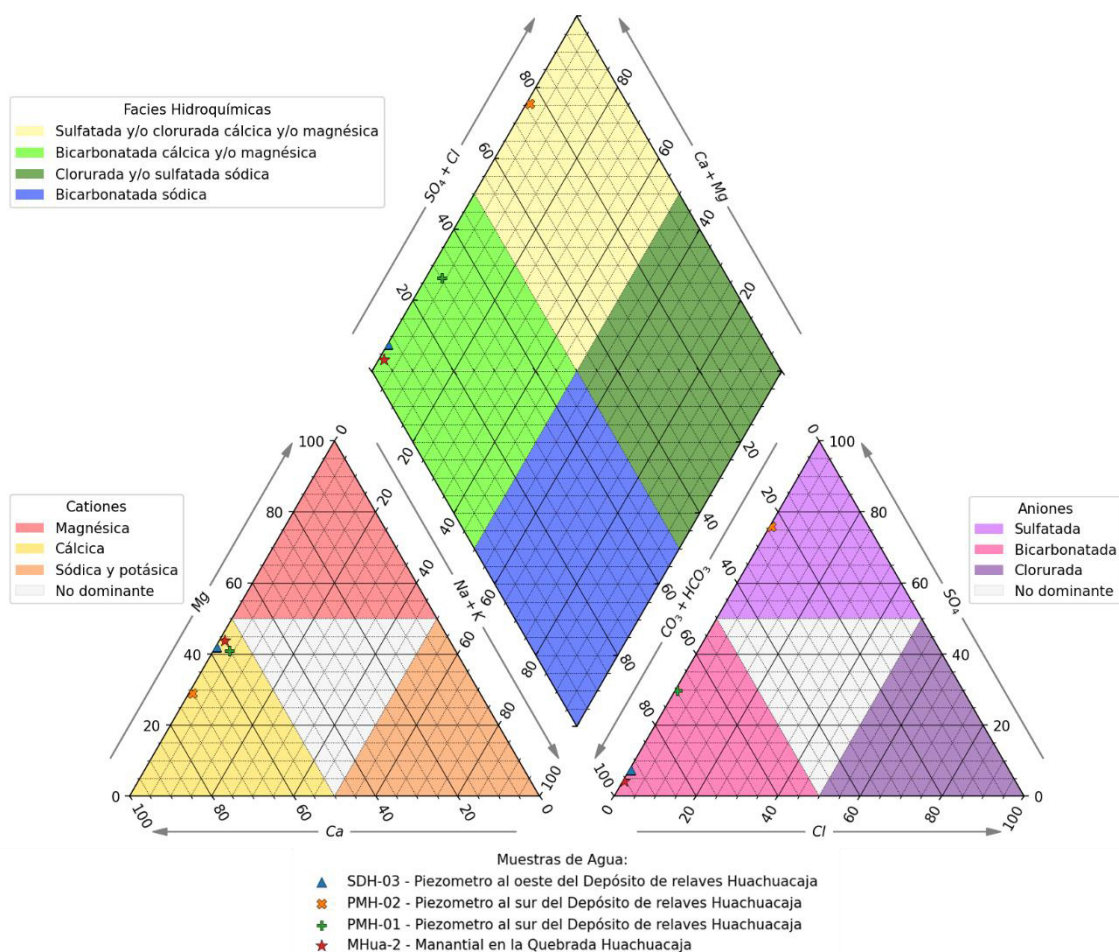


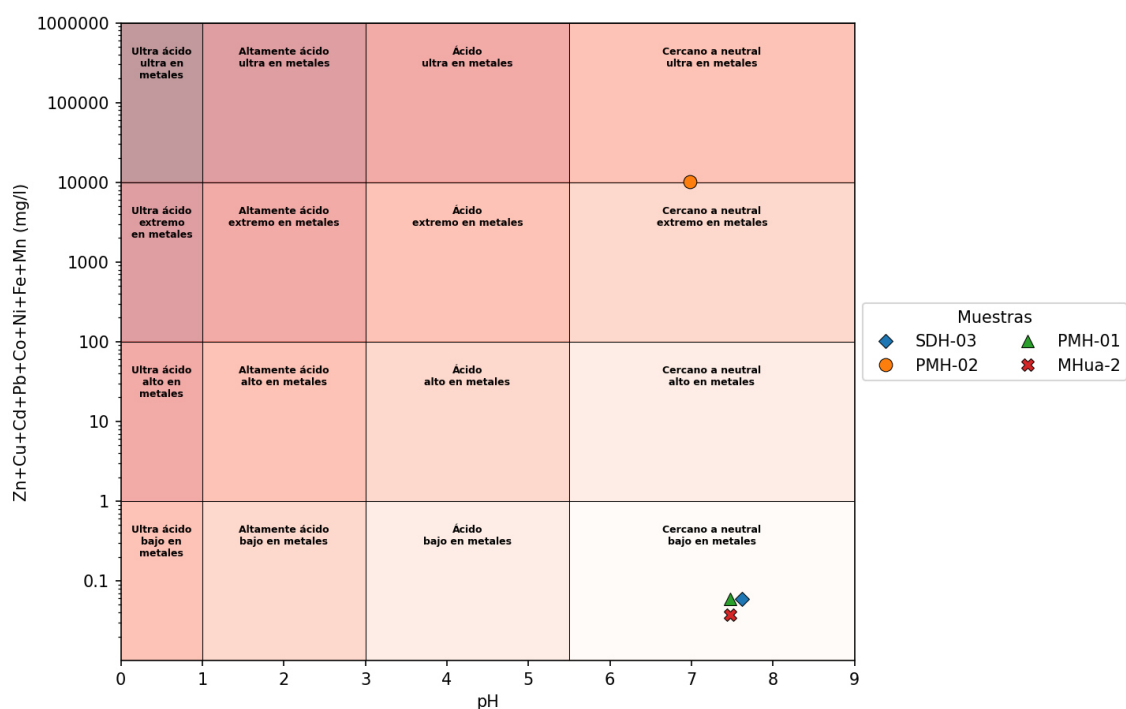
Figura 6.17. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea

Tabla 6.19. Clasificación de las muestras de agua subterránea según diagramas de Stiff

Cuerpo de agua	Muestra	Error balance iónico	Clasificación	Diagramas Stiff
Depósito de relaves Huachuacaja	SDH-03	8.46	Bicarbonatada Cálcica	SDH-03 : Bicarbonatada Cálcica
Depósito de relaves Huachuacaja	PMH-02	90.34	Sulfatada Cálcica	PMH-02 : Sulfatada Cálcica

**PERÚ**Ministerio
del AmbienteOrganismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFASTEC: Subdirección Técnica
CientíficaDecenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

Cuerpo de agua	Muestra	Error balance iónico	Clasificación	Diagramas Stiff
Depósito de relaves Huachuacaja	PMH-01	6.03	Bicarbonatada Cálcida	PMH-01 : Bicarbonatada Cálcida
Manantial (quebrada Huachuacaja)	MHua-2	3.38	Bicarbonatada Cálcida	MHua-2 : Bicarbonatada Cálcida

**Figura 6.18.** Clasificación de las muestras de agua subterránea según el diagrama de Ficklin

6.2.5. Sedimento

En total se muestrearon 6 puntos de sedimento que se distribuyeron en la quebrada Andacancha, río Andacancha y un bofedal.

En el ámbito de la quebrada y río Andancha se muestreo 6 puntos, de los cuales 2 se encuentran en la quebrada Andacancha (QAnda, QHE-2), 3 puntos en el río Andacancha (RAnda5, A-2 y E-11) y uno en un bofedal (B-1A).

**6.2.5.1. Metales, materia orgánica, granulometría y potencial de hidrógeno**

En este ítem se pondrá énfasis en los resultados de metales en sedimento que superaron, referencialmente, los valores de la guía de calidad ambiental canadiense para sedimentos de aguas continentales (Canadian Environmental Quality Guidelines – Sediment Quality Guidelines for Protection of Aquatic Life of freshwater CEQG-SQG), en adelante denominada guía canadiense. La totalidad de los resultados de la evaluación del sedimento se presentan en el Anexo B.

A continuación, se muestran los resultados de los parámetros evaluados en el río San Juan y flujo de agua, comparados con los valores ISQG y PEL de la guía canadiense (Tabla 6.20).

Las concentraciones de arsénico total, cadmio total, cobre total, mercurio total, plomo total y zinc total del sedimento encontrado en los puntos QAnda, QHE-2, RAnda5, A-2, E-11 y B-1A superaron los valores PEL de la guía canadiense de sedimento al ser comparados con estos, excepto el mercurio total en el punto A-2 que solo superó el valor ISQG de dicha norma.

Tabla 6.20. Resultados de parámetros de los sedimentos comparados referencialmente con los valores ISQG y PEL de la guía canadiense de sedimento

Cuerpo de agua		Quebrada Andacancha		Río Andacancha		Bofedal	Río Andacancha	CEQG-SQG	
Código		QAnda	QHE-2	RAnda5	A-2	B-1A	E-11		
Fecha de muestreo		19/10/2020	19/10/2020	19/10/2020	19/10/2020	21/10/2020	16/10/2020		
Hora de muestreo		17:20	14:50	11:00	09:00	10:20	09:30		
Parámetro	Unidad	Metales totales						ISQG	PEL
Arsénico Total	mg/kg PS	73.2	1081	1344	41,9	1733	944	5,9	17,0
Cadmio Total	mg/kg PS	7,3575	6,1109	5,5045	3,8724	12,221	11,165	0,6	3,5
Cobre Total	mg/kg PS	641	3310	3291	605	3203	3986	35,7	197,0
Cromo Total	mg/kg PS	4,942	13,2	16,6	24,6	9,171	11,7	37,3	90,0
Mercurio Total	mg/kg PS	0,673	1,78	1,94	0,290	638	129	0,17	0,486
Plomo Total	mg/kg PS	329	1094	960	269	5902	2651	35,0	91,30
Zinc Total	mg/kg PS	1900	3309	2850	1585	2825	4819	123,0	315,0

Fuente: Anexo B

Canadian Sediment Quality Guidelines (CCME, 2012) CEQG-SQG: Canadian Environmental Quality Guidelines- *Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life for Fresh water*

ISQG (Interim Sediment Quality Guidelines): Límite por debajo el cual ocurre rara vez efectos biológicos adversos sobre los ecosistemas acuáticos.

PEL (Probable Effect Level): Límite por encima del cual ocurre frecuentemente efectos biológicos adversos sobre los ecosistemas acuáticos.

	Parámetros que supera el ISQG y PEL
	Parámetros que supera el ISQG

La Tabla 6.21 presenta los resultados de metaloides, metales y potencial de hidrogeno, con los que se realizó un análisis de cluster es y de componentes principales. En esta tabla se observa que el mayor porcentaje de materia orgánica está en el sedimento del punto QAnda (17,9 %) el cual está ubicado en la naciente de la quebrada Andacancha, los otros puntos presentaron porcentaje de materia orgánica entre 0,5 % y 0,9 %.

El análisis granulométrico en el sedimento dio como resultado que los puntos QHE-2 (ubicado en la quebrada Andacancha después de la descarga del efluente R-5), el punto A-2 (ubicado en el río Andacancha y aguas abajo del antiguo punto de control V-1) limo y



arena; y los puntos E-11 (río Andacancha andes de su confluencia con el río San Juan) y B-1A (bofedal sin nombre) están compuesta mayoritariamente por limo y arena; el punto RAnda5 (ubicado en el río Andacancha y aguas abajo del depósito de relaves Huachuacaja) por grava, arena y limo.

Tabla 6.21. Resultados de metaloides, metales y parámetros físicos en el sedimento

Cuerpo de agua		Quebrada Andacancha		Río Andacancha		Bofedal	Río Andacancha
Código		QAnda	QHE-2	RAnda5	A-2	B-1A	E-11
Parámetro	Unidad	Valores					
Aluminio Total	mg/kg PS	3436	11944	10816	20662	10207	10369
Antimonio Total	mg/kg PS	13,29	5289	10,59	0,1491	59,95	9.766
Arsénico Total	mg/kg PS	73,2	1081	1344	41,9	1733	944
Bario Total	mg/kg PS	109,8	244,4	219,1	229,4	753,4	863,8
Berilio Total	mg/kg PS	0,283	0,684	0,781	0,860	0,627	0,710
Boro Total	mg/kg PS	25,53	12,03	13,50	10,47	6.662	9912,000
Cadmio Total	mg/kg PS	73.575	61.109	55.045	38.724	12.221	11.165
Calcio Total	mg/kg PS	38005	126003	96906	54879	8561	86690
Cobalto Total	mg/kg PS	1.533	9.946	8.893	12,0	4.814	11,9
Cobre Total	mg/kg PS	641	3310	3291	605	3203	3986
Cromo Total	mg/kg PS	4.942	13,2	16,6	24,6	9.171	11,7
Estaño Total	mg/kg PS	1.179	5.115	7,470	0,3039	5.341	4.211
Estroncio Total	mg/kg PS	36,05	231,6	176,9	88,39	65,94	175,7
Fósforo Total	mg/kg PS	1767	921	679	451	1068	905
Hierro Total	mg/kg PS	6091	36031	34509	18168	55062	46703
Litio Total	mg/kg PS	9.133	14,96	14,69	24,85	16,02	15,43
Magnesio Total	mg/kg PS	2591	9953	7228	2065	1685	8682
Manganeso Total	mg/kg PS	284	2127	2047	2680	720	2200
Mercurio Total	mg/kg PS	0,673	1,78	1,94	0,290	638	129
Molibdeno Total	mg/kg PS	0,815	1.753	2.098	1.381	1.199	2.598
Níquel Total	mg/kg PS	11,7	19,3	18,5	20,4	9,58	28,2
Plata Total	mg/kg PS	3.282	13,39	10,99	1.263	314,4	99,21
Plomo Total	mg/kg PS	329	1094	960	269	5902	2651
Potasio Total	mg/kg PS	1144	2561	1952	2763	970	1885
Selenio Total	mg/kg PS	2.935	3.283	3,310	2,770	4.977	7.439
Sodio Total	mg/kg PS	40,6	242	239	163	109	184
Talio Total	mg/kg PS	0,5488	2.038	1.905	0,8976	2869,000	3.362
Titanio Total	mg/kg PS	36	117	205	31	67	73
Vanadio Total	mg/kg PS	6	40	49	26	38	31
Zinc Total	mg/kg PS	1900	3309	2850	1585	2825	4819
potencial de hidrógeno	ud. pH	7,00	7,10	6,81	7,07	6,70	7,31
Materia orgánica	%	17,9 +/- 2,8	0,6 +/- 0,1	---	0,5 +/- 0,1	0,7 +/- 0,2	0,9 +/- 0,2
Grava	%	---	5,43	35,90	2,50	0,00	0,00
Arena	%	---	30,96	30,96	40,08	17,20	14,52
Limo	%	---	49,49	25,75	44,67	64,41	66,57
Arcilla	%	---	14,10	7,35	12,72	18,39	18,94

Fuente: Reporte de resultados (Anexo B)



En la tabla anterior se observa que los valores de potencial de hidrógeno están cercanos a la neutralidad.

En la Tabla 6.21. se muestran los resultados del análisis de extracción secuencial (6 etapas) de metales (arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc) con el método de Tessier en los sedimentos de la quebrada Andacancha (QAnda y QHE-2), río Andacancha (RAnda5, A-2 y E-11) y bofedal (B-1A).

La etapa 1, está relacionado a la fase extraíble, la etapa 2 a la fase intercambiable y adsorbida, la etapa 3 a la fase ligado a carbonatos, la etapa 4 a la fase fácilmente reducibles y óxidos de hierro, la etapa 5 a la fase ligado a la materia orgánica y la etapa 6 a la fase residual, siendo las últimas etapas las fases donde los metales se encuentran más estables.

Tabla 6.22. Resultados de metales del análisis de extracción (Tessier) en los sedimentos del ámbito de la quebrada y río Andacancha

Cuerpo de agua	Código	Parámetro	Unidad	Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3	Etapas 4	Etapas 5	Etapas 6
Quebrada Andacancha	QAnda	Arsénico (As)	mg/kg	5,43	6,079	10,60	30,96	24,67	2,75
		Cadmio (Cd)	mg/kg	< 0,050	0,137	0,688	3,622	3,210	0,095
		Cromo (Cr)	mg/kg	0,033	< 0,03	< 0,03	0,41	4,07	< 0,05
		Cobre (Cu)	mg/kg	2,09	2,20	1,139	3,256	643,4	42,02
		Mercurio (Hg)	mg/kg	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	0,790
		Plomo (Pb)	mg/kg	< 0,50	0,50	28,19	74,60	186,2	39,80
		Zinc (Zn)	mg/kg	5,3	13,1	228,4	746,2	781,8	34,85
	QHE-2	Arsénico (As)	mg/kg	0,69	1,371	5,04	108,7	108,4	730,8
		Cadmio (Cd)	mg/kg	< 0,050	0,329	1,977	1,245	1,098	1,369
		Cromo (Cr)	mg/kg	< 0,031	< 0,03	0,23	2,92	0,90	5,29
		Cobre (Cu)	mg/kg	0,56	1,06	16,69	1,969	2243	755,8
		Mercurio (Hg)	mg/kg	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	0,484	2,811
		Plomo (Pb)	mg/kg	< 0,50	0,93	216,9	546,3	38,03	414,4
		Zinc (Zn)	mg/kg	< 5,0	< 5,0	356,1	952,2	666,8	883,7
Río Andacancha	A-2	Arsénico (As)	mg/kg	0,62	1,277	5,42	121,9	6,03	1032
		Cadmio (Cd)	mg/kg	< 0,050	0,659	1,824	0,940	0,349	1,354
		Cromo (Cr)	mg/kg	< 0,031	< 0,03	0,25	4,51	0,63	5,49
		Cobre (Cu)	mg/kg	2,03	7,48	147,0	26,94	68,86	810,5
		Mercurio (Hg)	mg/kg	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	0,235	2,223
		Plomo (Pb)	mg/kg	< 0,50	0,73	157,3	430,9	23,07	477,6
		Zinc (Zn)	mg/kg	< 5,0	7,4	371,7	866,3	171,6	813,9
	E-11	Arsénico (As)	mg/kg	0,36	0,902	2,83	48,69	55,80	652,9
		Cadmio (Cd)	mg/kg	< 0,050	3,873	6,555	3,516	1,095	2,169
		Cromo (Cr)	mg/kg	< 0,031	< 0,03	0,32	2,94	1,03	4,30
		Cobre (Cu)	mg/kg	0,94	2,99	24,69	10,56	2725	594,2
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0,066	0,052	0,091	0,090	3,783	205,9
		Plomo (Pb)	mg/kg	0,55	19,31	1311	1288	132,7	574,6
		Zinc (Zn)	mg/kg	< 5,0	14,0	589,0	1453	621,5	1517

Fuente: Reporte de resultados (Anexo B)

La Figura 6.19 muestra de manera gráfica las 6 etapas de disponibilidad del arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc de los resultados de extracción secuencial en el sedimento del punto de muestreo QAnda, donde se aprecia que el arsénico presenta



mayor concentración en la etapa 4 y 5, el cadmio en la etapa 5 y 6, el cromo en la etapa 5, el cobre en la etapa 5, el mercurio en la etapa 6, el plomo en la etapa 5, y el zinc en la etapa 5 y 4.

Es importante mencionar que el arsénico, cobre y zinc presentan concentraciones en la etapa 1, 2 y 3, y el plomo en la etapa 2 y 3.

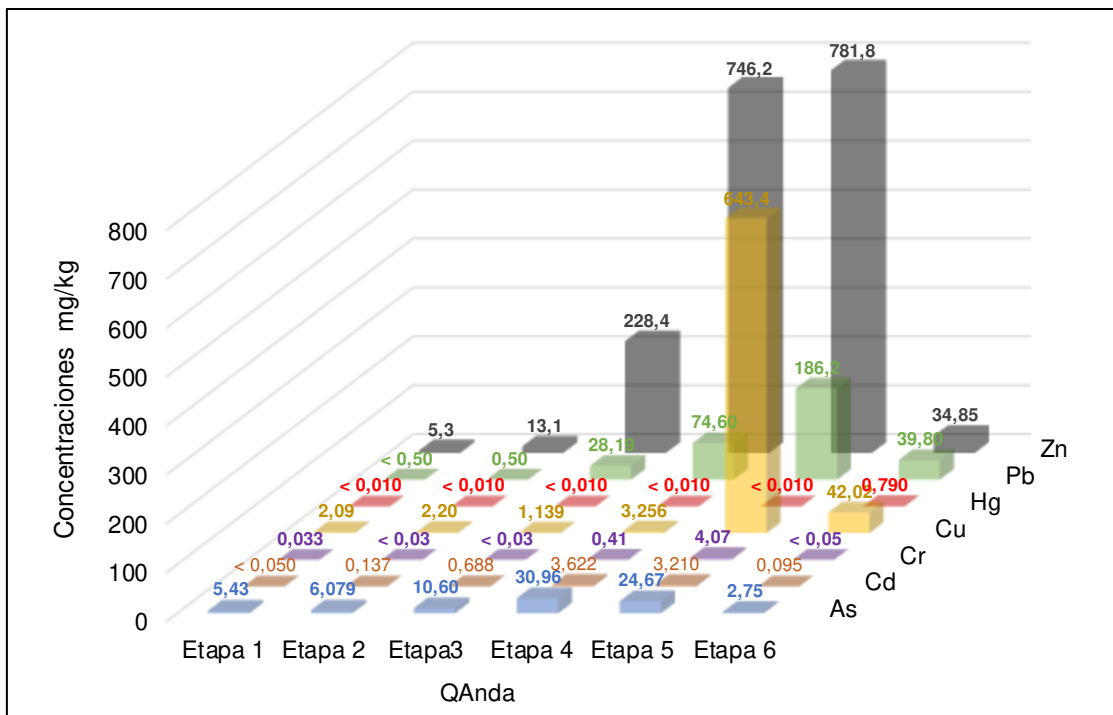


Figura 6.19. Disponibilidad por etapas de arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc en sedimento en el punto de muestreo QAnda

La Figura 6.20 muestra de manera gráfica las 6 etapas de disponibilidad del arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc de los resultados de extracción secuencial en el sedimento del punto de muestreo QHE-2, donde se aprecia que el arsénico presenta mayor concentración en la etapa 6, el cadmio en la etapa 3 y 6, el cromo en la etapa 6, el cobre en la etapa 5 y 6, el mercurio en la etapa 6, el plomo en la etapa 4 y 6, y el zinc en la etapa 4 y 6.

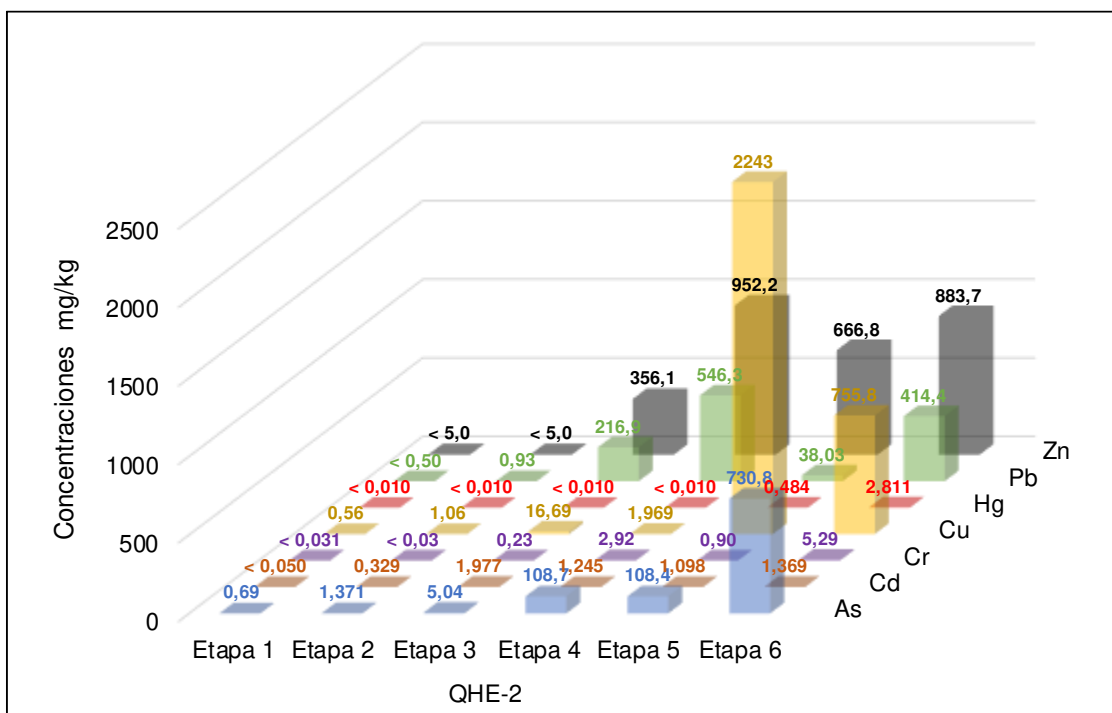


Figura 6.20. Disponibilidad por etapas de arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc en sedimento en el punto de muestreo QHE-2

La Figura 6.21 muestra de manera gráfica las 6 etapas de disponibilidad del arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc de los resultados de extracción secuencial en el sedimento del punto de muestreo A-2, donde se aprecia que el arsénico presenta mayor concentración en la etapa 6 y 4, el cadmio en la etapa 3 y 6, el cromo en la etapa 6 y 5, el cobre en la etapa 6 y 3, el mercurio en la etapa 6, el plomo en la etapa 4 y 6, y el zinc en la etapa 4 y 6.

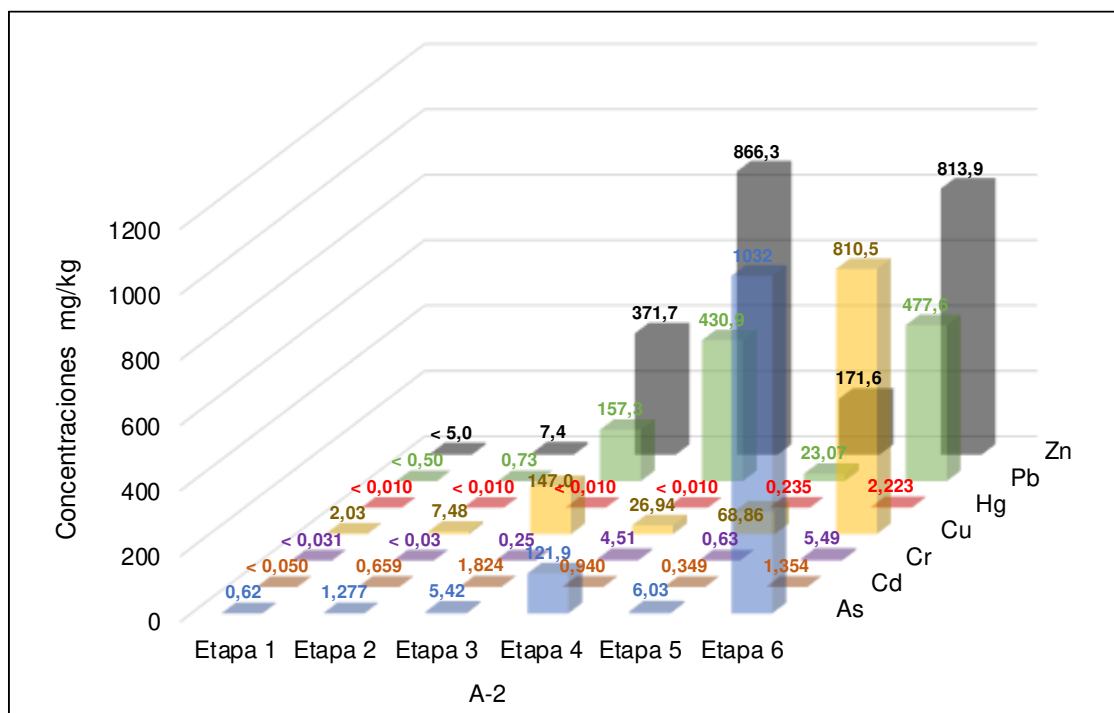


Figura 6.21. Disponibilidad por etapas de arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc en sedimento en el punto de muestreo A-2

La Figura 6.22 muestra de manera gráfica las 6 etapas de disponibilidad del arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc de los resultados de extracción secuencial en el sedimento del punto de muestreo E-11, donde se aprecia que el arsénico presenta mayor concentración en la etapa 6 y 5, el cadmio en la etapa 3, el cromo en la etapa 6, el cobre en la etapa 5 y 6, el mercurio en la etapa 6, el plomo en la etapa 3 y 4, y el zinc en la etapa 6.

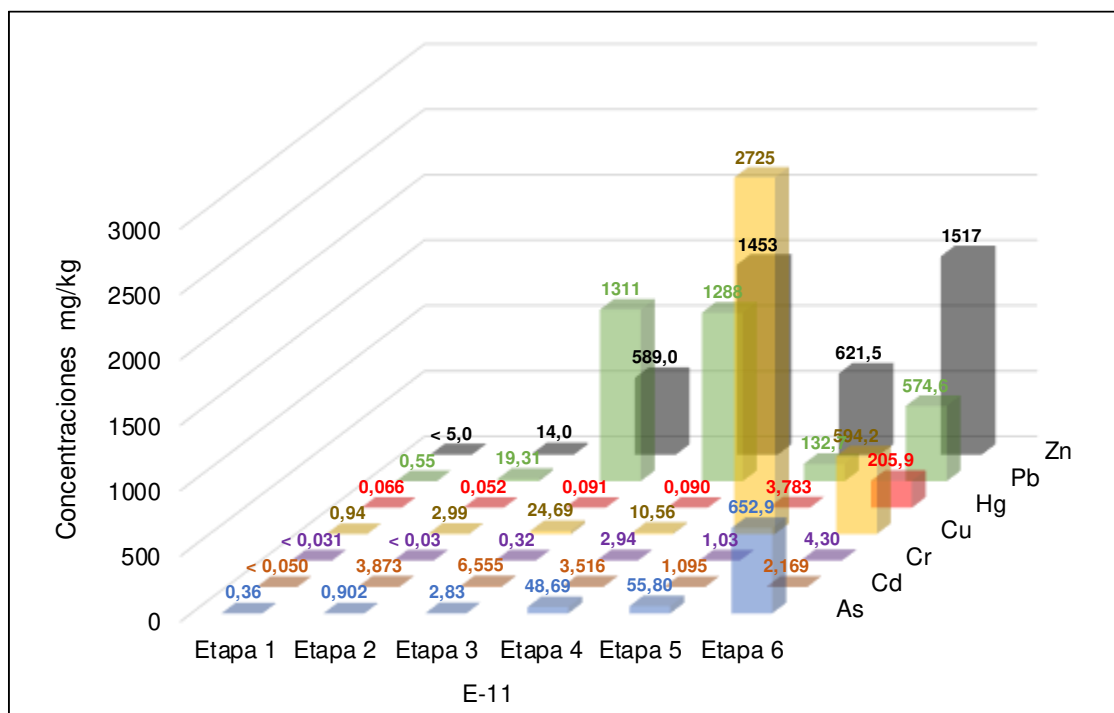


Figura 6.22. Disponibilidad por etapas de arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc en sedimento en el punto de muestreo E-11

La Tabla 6.23 muestra los resultados del análisis de difracción de rayos X en sedimento del punto QAnda, donde se observa que los minerales amorfos se encuentran con el 59 % de presencia, seguidos por los cuarzos (14 %), calcita (13 %), caolinita (7 %) y mica (6 %).

Tabla 6.23. Resultados del análisis de difracción de rayos X en sedimento.

Código			QAnda
N° de informe de ensayo			ILP-001ML-100-LT15
Minerales	Fórmula general	Unidad %	
Cuarzo	SiO ₂	%	14
Calcita	CaCO ₃	%	13
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	%	7
Mica (Muscovita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	%	6
Pirita	FeS ₂	%	< L.D.
Amorfo		%	59

Fuente: Reporte de resultados (Anexo B)

6.2.5.2. Análisis estadístico multivariado

Análisis de componente principales (ACP)

El análisis de componentes principales (ACP) se realizó empleando los resultados de metales totales y potencial de hidrógeno de los 6 puntos de muestreo de sedimento.

Los parámetros se agruparon en 2 componentes principales (PC1 y PC2) que explicaron el 70,693 % de la varianza total en el conjunto de datos (Tabla 6.23). El PC1 presentó una fuerte correlación positiva (> 0,8) con el magnesio total, cobalto



total, sodio total, potasio total, berilio total, calcio total, níquel total, estroncio total; fuerte correlación negativa con el fósforo; moderada correlación positiva ($> 0,5$ a $0,8$) con cromo total, el molibdeno total, magnesio total, aluminio total y litio total, moderada correlación negativa con el antimonio total; y baja correlación positiva ($< 0,5$) con el potencial de hidrógeno titanio total. Mientas que el PC2 presentó fuerte correlación positiva con hierro total, talio total, cobre total, arsénico total, bario total, plomo total y cadmio total; moderada correlación con la plata total, selenio total, zinc total, estaño total, mercurio total y boro total (correlación negativa) y baja correlación positiva con el vanadio total.

Tabla 6.24. Cargas de los componentes principales para los parámetros (variables) del sedimento en el ámbito de la quebrada y río Andacancha

Parámetro (variable)	PC1	PC2
Manganeso Total	0,97	-0,03
Cobalto Total	0,93	0,14
Sodio Total	0,90	0,28
Potasio Total	0,90	-0,34
Berilio Total	0,82	0,25
Fósforo Total	-0,82	-0,16
Calcio Total	0,81	-0,02
Níquel Total	0,81	0,10
Estroncio Total	0,80	0,33
Cromo Total	0,75	-0,26
Molibdeno Total	0,73	0,50
Antimonio Total	-0,67	0,64
Magnesio Total	0,67	0,30
Aluminio Total	0,66	-0,12
Litio Total	0,54	-0,09
Potencial de hidrógeno	0,47	-0,19
Titanio Total	0,45	0,31
Hierro Total	0,13	0,98
Talio Total	0,17	0,96
Arsénico Total	0,01	0,90
Cobre Total	0,32	0,89
Plomo Total	-0,41	0,86
Bario Total	-0,07	0,85
Cadmio Total	-0,49	0,79
Plata Total	-0,49	0,78
Selenio Total	0,04	0,75
Zinc Total	0,33	0,74
Estaño Total	0,22	0,72
Mercurio Total	-0,53	0,72
Boro Total	-0,42	-0,69
Vanadio Total	0,47	0,49
Porcentaje de la varianza explicada (%)	37,134	37,134
Varianza % acumulado	33,559	70,693



Análisis de conglomerados (cluster) y escalamiento multidimensional no métrico (nMDS)

Las semejanzas del análisis de conglomerados para el sedimento del ámbito de la quebrada y río Andacancha, se calculó utilizando la distancia euclidiana al cuadrado y se evaluó la estructura multivariable empleado un análisis de agrupamiento jerárquico. Estos análisis se usan a menudo con el ACP en la identificación de las fuentes de contaminación en muestras ambientales (Zhou *et al.*, 2008); y emplean una medida de disimilitud como la distancia euclidiana (recomendada para variables ambientales).

El agrupamiento de puntos por análisis de conglomerados (cluster) se realizó por el análisis de cluster jerárquicos con el método de Ward usando la medida de distancia euclídea al cuadrado. Para la agrupación de los puntos de muestreo se usaron los mismos parámetros utilizados en el análisis de componentes principales. En la Figura 6.23 se observa el dendrograma con los 4 grupos (cluster) formados antes de una distancia de 8 unidades, y la Figura 6.24. muestra la distribución del cluster en un gráfico de puntuaciones de los componentes principales.

Se observa que el cluster 2 es el único que agrupa 3 puntos de muestreo, los otros cluster es están conformados por un solo punto de muestreo, esto debido a que sus variables no guardan mucha relación.

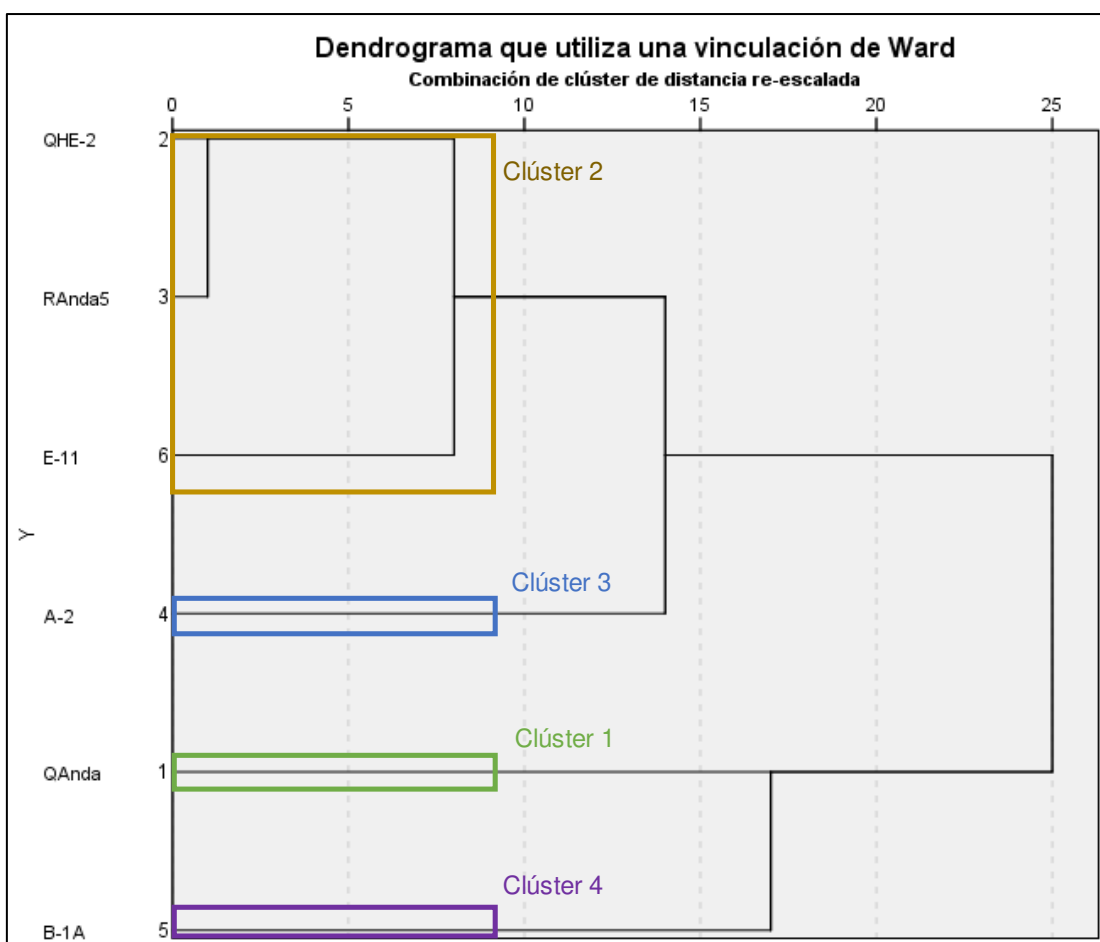


Figura 6.23. Dendrograma que muestra los grupos jerárquicos entre los puntos de muestreo de sedimento del ámbito de la quebrada y río Andacancha (método «Ward»)



Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

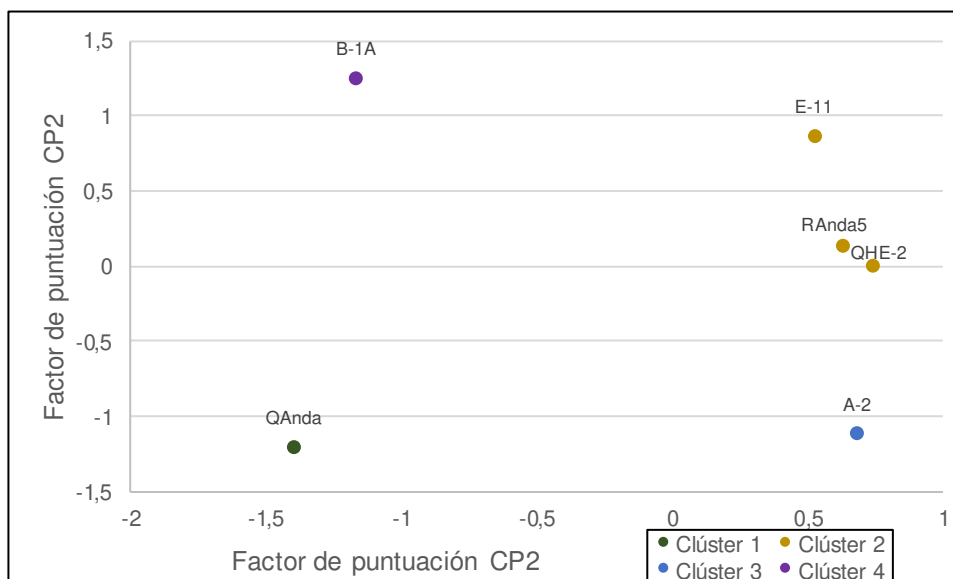


Figura 6.24. Puntuaciones de los componentes principales, con ubicación de los puntos de muestro de sedimento separados por cluster es

En la Figura 6.24 se observa que el cluster 2 (E-11, RAnda5 y QHE-2) está conformado por los puntos que por lo general presentan altas concentraciones en los parámetros con correlación positiva que componen el PC1 y PC2, el cluster 1 (QAnda) presenta las bajas concentraciones de los parámetros con correlación positiva que componen el PC1 y PC2. El cluster 3 (A-2) y cluster 4 (B-1A) tienen a los puntos con los parámetros con alta correlación positiva con los componentes CP1 y CP2, respectivamente.

La Tabla 6.25 muestra las medias de las concentraciones de los parámetros que componen los cluster y la media del total de puntos, donde se observa que el cluster 1 presentó la media más alta para fósforo total; el cluster 2 presentó las mayores medias para calcio total, cobre total, estaño total, estroncio total, magnesio total, molibdeno total, níquel total, sodio total, titanio total, zinc total y potencial de hidrogeno; el cluster 3 presentó las mayores medias para cromo total, litio total, manganeso total, potasio total y potencial de hidrógeno; y el cluster 4 presentó las mayores medias para aluminio total, antimonio total, arsénico total, hierro total, mercurio total, plata total, plomo total, selenio total, talio total; también se observa que los elementos (metales, metaloides) con mayor presencia en el sedimento son el calcio total, hierro total, aluminio total, magnesio total, zinc total, cobre total, potasio total, plomo total, manganeso total, fósforo total, arsénico total, bario total, sodio total, estroncio total y mercurio total.

Tabla 6.25. Tabla de medias de los parámetros que componen los cluster es y del total de puntos de sedimento

Parámetro (variable)	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Total
Aluminio Total	3436,00	11043,00	20662,00	10207,00	11239,00
Antimonio Total	13,29	8,55	0,15	59,95	16,51
Arsénico Total	73,20	1123,00	41,90	1733,00	869,52
Bario Total	109,80	442,43	229,40	753,40	403,32
Berilio Total	0,28	0,73	0,86	0,63	0,66
Boro Total	25,53	11,81	10,47	6,66	13,02
Cadmio Total	7,36	7,59	3,87	12,22	7,71

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

Parámetro (variable)	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Total
Calcio Total	38005,00	103199,67	54879,00	8561,00	68507,33
Cobalto Total	1,53	10,25	12,00	4,81	8,18
Cobre Total	641,00	3529,00	605,00	3203,00	2506,00
Cromo Total	4,94	13,83	24,60	9,17	13,37
Estaño Total	1,18	5,60	0,30	5,34	3,94
Estroncio Total	36,05	194,73	88,39	65,94	129,10
Fósforo Total	1767,00	835,00	451,00	1068,00	965,17
Hierro Total	6091,00	39081,00	18168,00	55062,00	32760,67
Litio Total	9,13	15,03	24,85	16,02	15,85
Magnesio Total	2591,00	8621,00	2065,00	1685,00	5367,33
Manganeso Total	284,00	2124,67	2680,00	720,00	1676,33
Mercurio Total	0,67	44,24	0,29	638,00	128,61
Molibdeno Total	0,82	2,15	1,38	1,20	1,64
Níquel Total	11,70	22,00	20,40	9,58	17,95
Plata Total	3,28	41,20	1,26	314,40	73,76
Plomo Total	329,00	1568,33	269,00	5902,00	1867,50
Potasio Total	1144,00	2132,67	2763,00	970,00	1879,17
Selenio Total	2,94	4,68	2,77	4,98	4,12
Sodio Total	40,60	221,67	163,00	109,00	162,93
Talio Total	0,55	2,44	0,90	2,87	1,94
Titanio Total	36,00	131,67	31,00	67,00	88,17
Vanadio Total	6	36,67	26,00	38	30,00
Zinc Total	1900,00	3659,33	1585,00	2825,00	2881,33
potencial de hidrógeno	7,00	7,07	7,07	6,70	7,00

7. DISCUSIÓN

El análisis de los resultados de las matrices evaluadas en el ámbito del depósito de relaves Huachuacaja se desarrolló considerando los siguientes criterios:

- Zona 1: Filtraciones identificadas en la cola del dique de contención (R4) del depósito de relaves Huachuacaja y su efecto en el acuífero libre de la quebrada Huachuacaja.
- Zona 2: Análisis de la influencia de elementos o compuestos de preocupación del efluente minero R5 de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en la quebrada Andacancha.

En la Figura 7.1 se observa el modelo conceptual de los criterios mencionados.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

STEC: Subdirección Técnica
Científica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

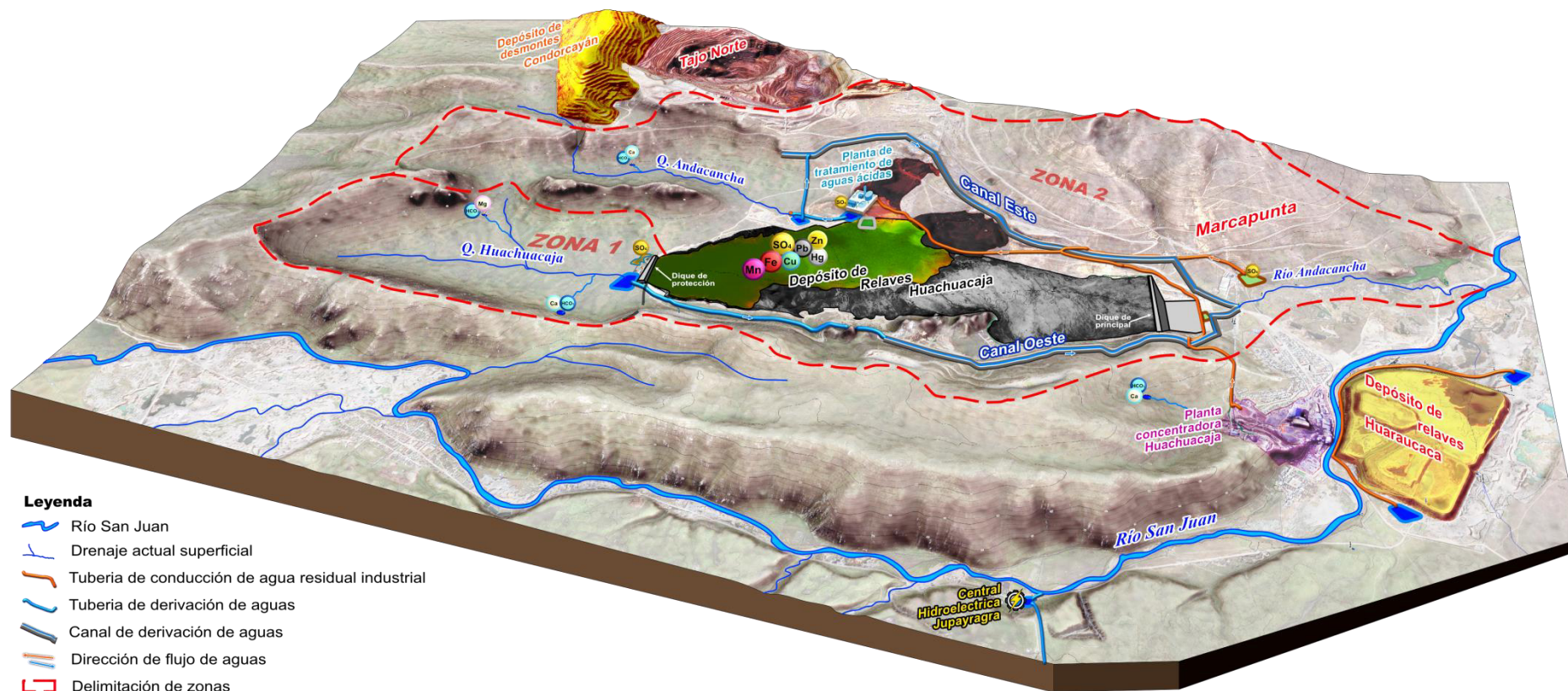


Figura 7.1. Modelo conceptual de las zonas evaluadas en el área de estudio

Zona 1: Filtraciones identificadas en la cola del dique de contención (R4) del depósito de relaves Huachuacaja y su efecto en el acuífero libre de la quebrada Huachuacaja

El depósito de relaves Huachuacaja abarca 4,79 km² y está compuesto por relave grueso y agua reciclada de las actividades productivas de la mina Colquijirca y Marcapunta, en la parte norte y noreste cuenta con un dique de protección, pozas dinámicas y sistemas de impulsión (Figura 7.2) de aproximadamente 650 m de extensión construidos para evitar que las aguas del depósito de relave impacten sobre las aguas de escorrentía de la quebrada Huachuacaja. Además, la UF Colquijirca realizó obras de desviación de aguas de no contacto a los canales de coronación del lado este y oeste del depósito de relaves Huachuacaja¹⁴.

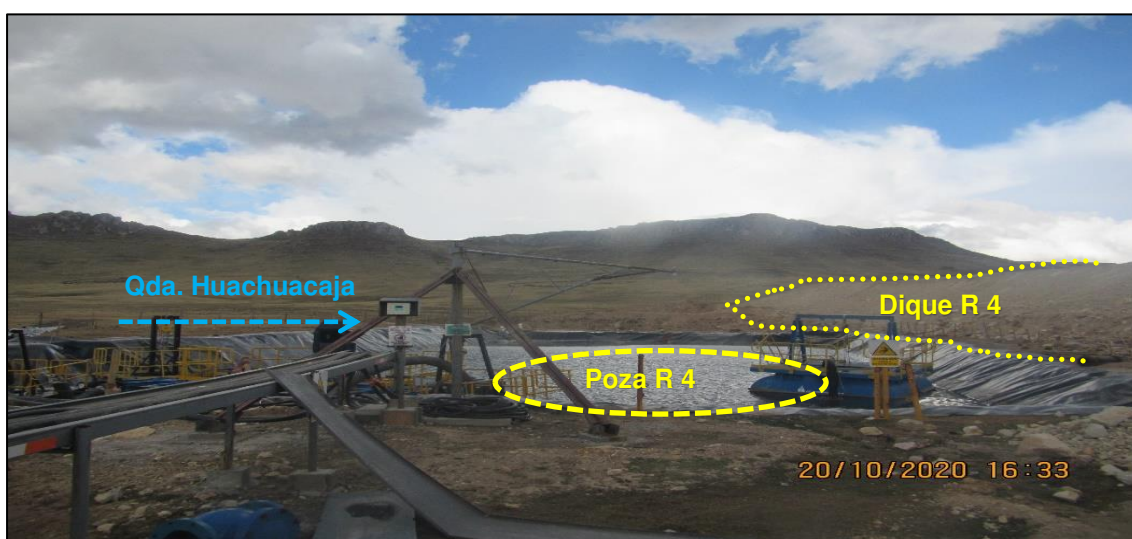


Figura 7.2. Dique de protección y poza R4 de lado norte del depósito de relaves Huachuacaja

Asimismo, la fase sólida del relave se encuentra compuesto principalmente (>1000 mg/kg) por hierro, manganeso, calcio, zinc, magnesio, plomo, aluminio y cobre, y en menor proporción potasio, bario, y arsénico, los cuales se encuentran asociados a pirita, alunita, siderita, dolomita, yeso, caolinita y cuarzo; este material es potencial generador de drenaje ácido y posee la capacidad de lixiviar calcio, manganeso, magnesio, zinc, potasio, sodio, hierro, y sulfatos.

En cuanto a la fase líquida estas aguas fueron sulfatadas cálcicas alcanzando concentraciones de sulfatos de 35 meq/L, y según Ficklin son aguas cercanas a la neutralidad con alta concentración de metales. Asimismo, reportó pH ligeramente ácido, conductividad eléctrica de 2400 µS/cm y altas concentraciones de sulfatos, sólido totales disueltos, calcio, sodio, magnesio, potasio, manganeso, zinc, hierro, cobre y plomo.

El basamento de este sector corresponde a rocas sedimentarias clásticas (areniscas, conglomerados y lutitas) del Grupo Mitu, cuyos estratos se encuentran dispuestos en forma de sinclinal, sobre estas rocas yacen depósitos cuaternarios glaciar-fluvial compuesto por gravas y guijarros englobados en matriz limo arcilloso.

¹⁴ Desviación de aguas de escorrentía a los canales de coronación del lado este y lado oeste del depósito de relaves Huachuacaja, aprobado mediante Resolución Directoral N.º 170-2020-ANA-AAA.

Durante la evaluación se realizó el recorrido en el dique de protección R4, evidenciando filtraciones empozadas (AF5, AF6, AF7) y la filtración ESP-8 con un caudal de 0,12 L/s, al pie del talud externo del dique (Figura 7.3). Estos flujos de agua fueron caracterizados como facies sulfatadas cálcicas alcanzando concentraciones de 35 meq/L de sulfatos. Además, presentó pH neutro (6,9 a 8,57 unidades), conductividad eléctrica entre 1077 y 2260 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y concentraciones de sulfatos, calcio, hierro, magnesio y manganeso que superaron referencialmente los ECA para agua 2018 Cat.3.

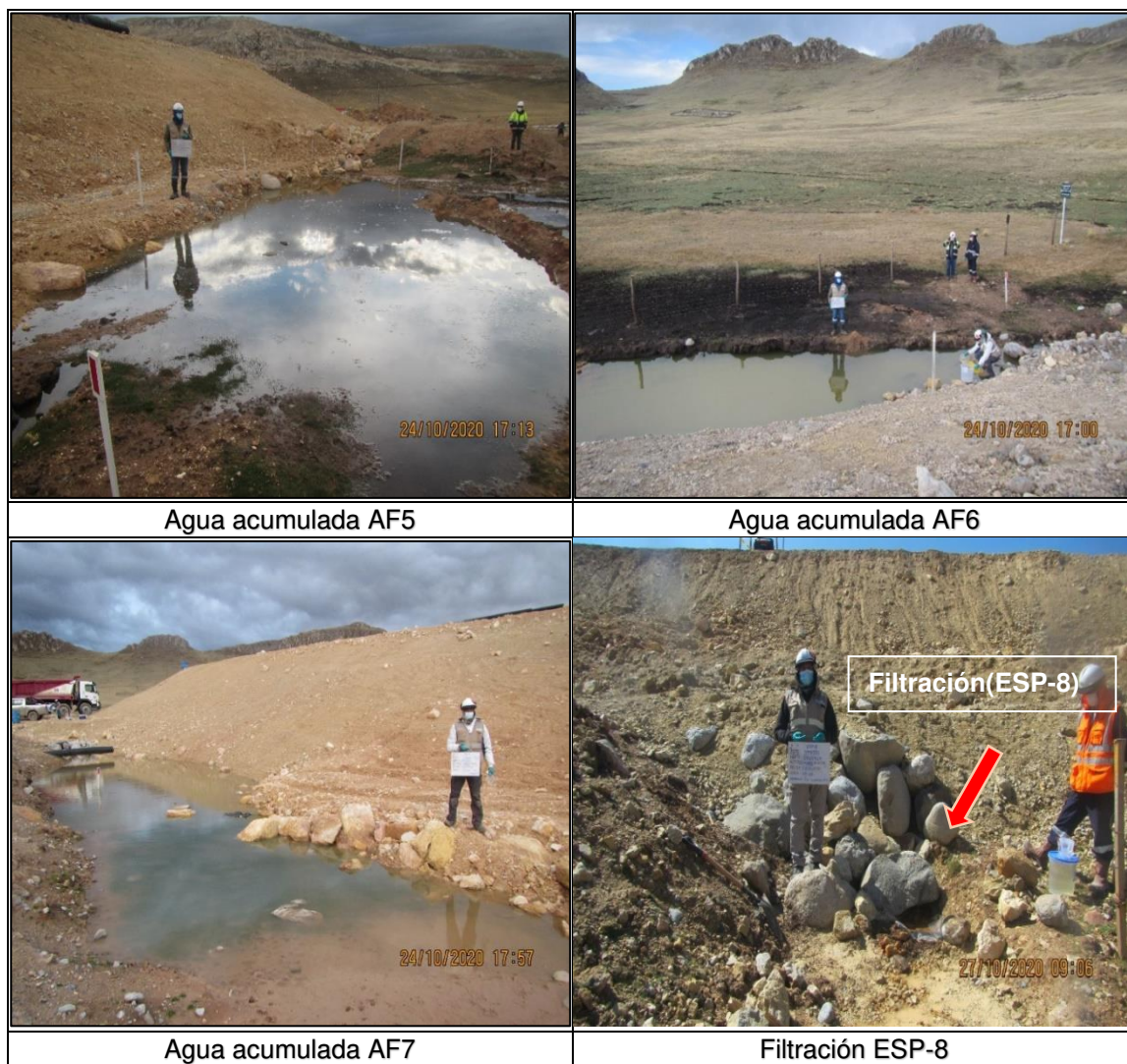


Figura 7.3. Filtraciones empozadas al pie del talud externo del dique R4 del depósito de relaves Huachuacaja

Estas características fisicoquímicas e hidroquímicas fueron similares al agua de la sobrenadante del depósito de relaves Huachuacaja (DRHua-1) y difieren de las características propias de las aguas del sistema hidrogeológico e hidroquímico (naturales), el cual presenta flujos locales de características bicarbonatadas cálcicas en el manantial MHua-2 y bicarbonatadas magnésica-cálcica en la quebrada Huachuacaja (QHua); considerados como puntos blancos, los cuales alcanzaron concentraciones bajas de bicarbonatos (3,08 y 4,62 meq/L) y según Ficklin son aguas neutras con baja concentración de metales disueltos. Además, estas aguas presentan un potencial de

hidrógeno neutro (7,47 a 8,53 unidades de pH), conductividad eléctrica baja (473 a 351 $\mu\text{S}/\text{cm}$), y bajas concentraciones de metales (Figura 7.4).

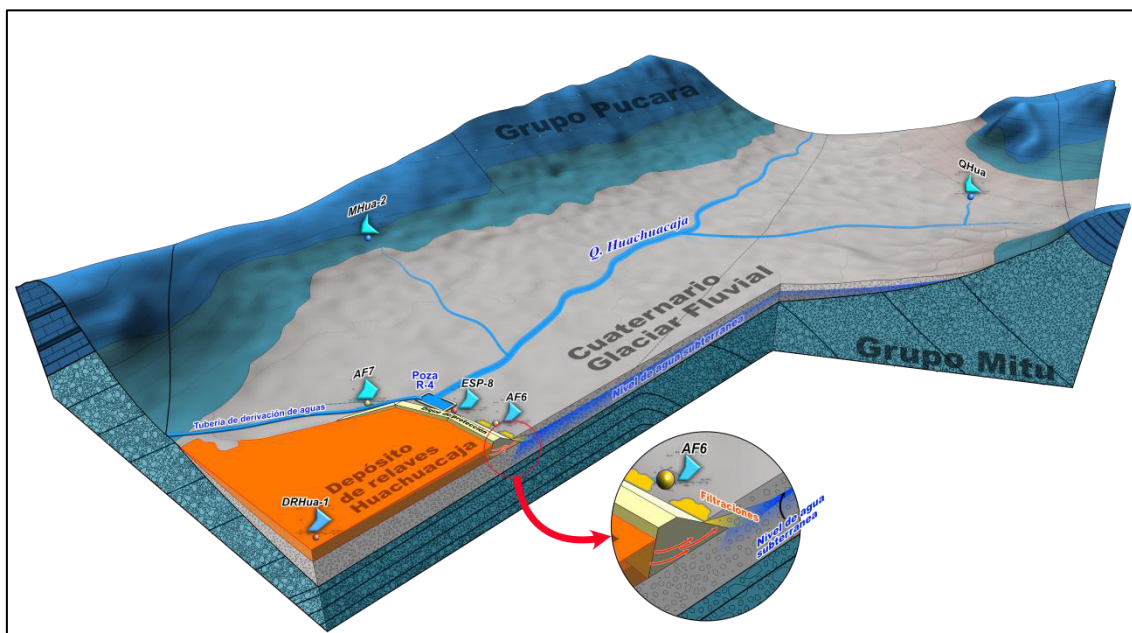


Figura 7.4. Comparación de características hidroquímicas entre la sobrenadante del DR Huachuacaja, filtraciones y puntos blancos en la quebrada Huachuacaja

Según el estudio de geofísica mediante la metodología de tomografía de resistividad eléctrica, realizada en el talud externo del dique de protección (R4) del lado noroeste del DR Huachuacaja (ERT-05 y ERT-06), presentaron zonas de baja resistividad entre 17 y 40 Ohm.m, ubicadas en la parte superficial en la estación 0 a 20 de la sección ERT-06, y a 3 m de profundidad en las estaciones 53 y 70 de la sección ERT-05, los cuales están asociados a zonas de migración de filtraciones provenientes del depósito de relaves Huachuacaja, debido a que se correlaciona con la ubicación de las filtraciones identificadas al pie del talud (ESP-8 y AF-6), con potencial de hidrógeno entre 6,9 y 8,57 unidades de pH y conductividad eléctrica entre 1826 y 1867 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Adicionalmente, las líneas realizadas anteriores a las pozas R4 y empozamientos menores (consideradas como blanco) presentaron resistividades entre 18 a 40 Ohm.m, ubicados debajo de la zona B el cual corresponde a material glaciar- fluvial saturado, lo cual indica que los flujos provenientes del depósito de relaves están influenciando ligeramente el acuífero libre de la zona, sustentado en que las resistividades en este contexto geológico-hidrogeológico (gravas y limos que yacen sobre rocas sedimentarias clásticas), deberían estar en el rango de 10 a 100 Ohm.m (Loke, 1999, en Ravel, 2007), ya que las aguas subterráneas en este sector presentan pH neutro 7,47 y conductividad eléctrica de 473 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (MHua-2), ver Figura 7.5.

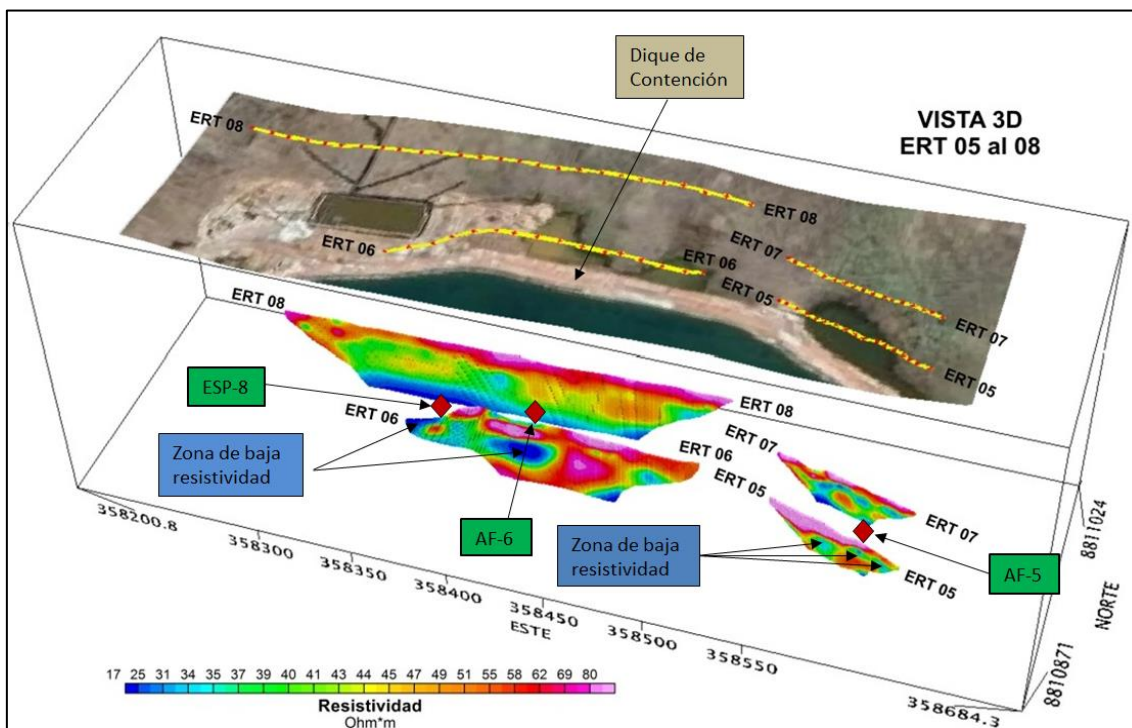


Figura 7.5. Tomografía de resistividad eléctrica en 4 líneas ubicadas en el ámbito del dique de protección R4 en la parte norte del depósito de relaves Huachuacaja

Por otro lado, en la quebrada Huachuacaja (QHua), se registró una alta riqueza y diversidad de taxones y especies de macroinvertebrados bentónicos y microalgas que se desarrollan en ambientes de buenas condiciones tales como *Ectemnostegella* sp., *Austrelmis* sp., *Ulnaria ulna* y *Epithemia adnata*, esta se vio reflejada con una calidad moderada según el índice biótico andino (ABI) (Tabla 6.13, Tabla 6.15 y Figura 7.15). Es importante mencionar que en la quebrada Huachuacaja (QHua) se registró la presencia de peces Chalhuanas (*Orestias* sp.), espécimen que es endémica de los Andes del Perú (Ortega y Hidalgo, 2008) y que la integridad biológica de una comunidad de peces es un indicador sensible de los ecosistemas acuáticos (Fausch *et al.*, 1990).

Zona 2: Análisis de la influencia de elementos o compuestos de preocupación del efluente minero R5 de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en la quebrada Andacancha

El Primer Informe Técnico Sustentatorio para el incremento de la producción de la Planta Concentradora de Huaracaca de 18 000 a 21 600 TMD y Mejora Tecnológica al Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de la Unidad Minera Colquijirca, aprobado mediante Resolución Directoral N.º136-2016-MEM-DGAAM, indica que para la ampliación de la capacidad de la planta de tratamiento de aguas industriales de 200 L/s a 240 L/s se ha seleccionado el proceso HDS (*High Density Sludge*), a fin de complementar su sistema actual, cuya ventaja es aprovechar la adición de lechada de cal al lodo recirculado y mezclarlo con el agua ácida, neutralizando, oxidando y precipitando la mayoría de los metales seguida de la separación de sólidos en un clarificador antes de recircular el lodo asentado en la descarga inferior.

Además, las aguas ácidas que se generan en Marca punta Norte, Marca punta Sur, Mina Tajo, Pasivos Ambientales y el espejo de la relavera contienen valores significativos principalmente de Al, Mn, Fe, Cu, Pb, Zn y Hg. El objetivo de la mejora tecnológica «Sistema de Tratamiento HDS» es remover con una cinética rápida dichos metales pesados por debajo de los límites máximos permisibles; por lo tanto, Sociedad Minera el Brocal S.A.A. realizó pruebas metalúrgicas de neutralización, sedimentación, acidificación y pruebas de redisolución de metales de los lodos. Los resultados del tratamiento HDS a los distintos compósitos de los efluentes tratados, muestran que elevando el potencial de hidrógeno entre 10,5 y 11 unidades de pH en la etapa de alcalinización con lechada de cal al 15 % y un tiempo de residencia de 30 min, es suficiente para reducir significativamente los metales pesados de aluminio, manganeso, cobre, hierro, plomo y zinc, con valores por debajo de los límites máximo permisibles. En la Figura 7.6. se muestra el esquema hídrico del sistema de tratamiento HDS.

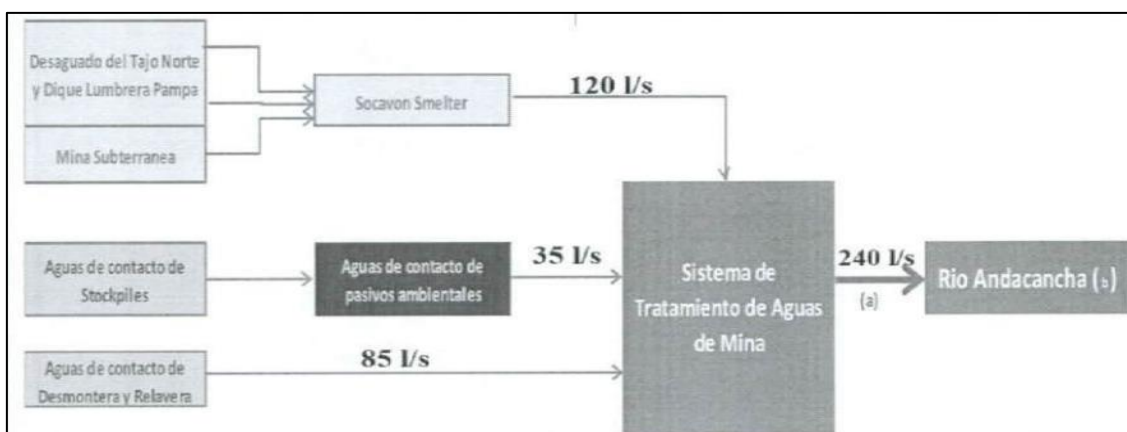


Figura 7.6. Esquema hídrico del sistema de tratamiento HDS

Fuente: Primer Informe Técnico Sustentatorio para el incremento de la producción de la Planta Concentradora de Huaraucaca de 18 000 a 21 600 TMD y Mejora Tecnológica al Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de la Unidad Minera Colquijirca, aprobado mediante R.D. N.º136-2016-MEM-DGAAM

En octubre de 2020 se realizó el muestreo del efluente minero (R-5), quebrada Andacancha (QHE-2, QAnda), canal este de coronación de la relavera Huachuacaja (RAnda6), quebrada Huachuacaja (QHua) y río Andacancha, (RAnda5, A-2, E-11); cabe indicar, que el punto QHE-3 de la quebrada Andacancha, ubicado aproximadamente a 100 m aguas arriba del efluente R-5, se encontró sin flujo de agua, y el punto QAnda ubicado en esta misma quebrada a 1,5 km aproximadamente aguas arriba del efluente R-5 presentó flujo de agua y luego de un pequeño recorrido se infiltró en el suelo.

Los parámetros evaluados en el efluente R-5 cumplieron con los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas, aprobados mediante Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM. Sin embargo, este efluente presentó concentraciones de sulfato (1735 mg/L) y calcio (564 mg/L) que alteran la calidad de la quebrada Andacancha y del río Andacancha, principalmente por el sulfato. La alteración de los cuerpos de agua mencionados se sustenta con las siguientes evidencias:

1.- La quebrada Andacancha en octubre 2020 se forma por la descarga del efluente minero, estas aguas se acumulan en la poza de bombeo R5 para ser derivadas al canal de coronación Este del depósito de relaves Huachuacaja y llegan al río Andacancha. Cabe precisar que, no hubo aporte de agua de la quebrada Huachuacaja hacia el río Andacancha, tal como se observa en la Figura 7.7.



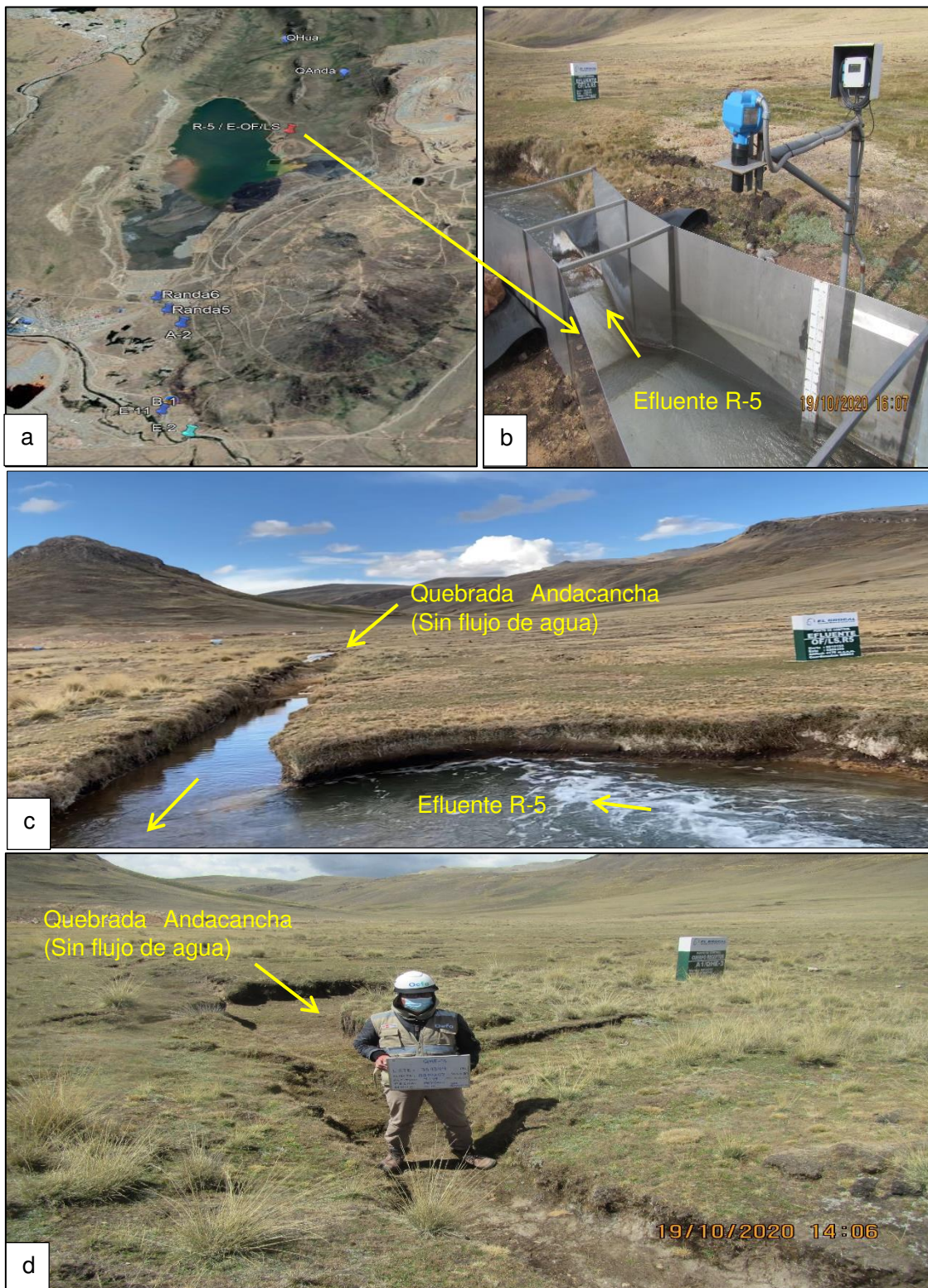
PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

STEC: Subdirección Técnica
Científica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud



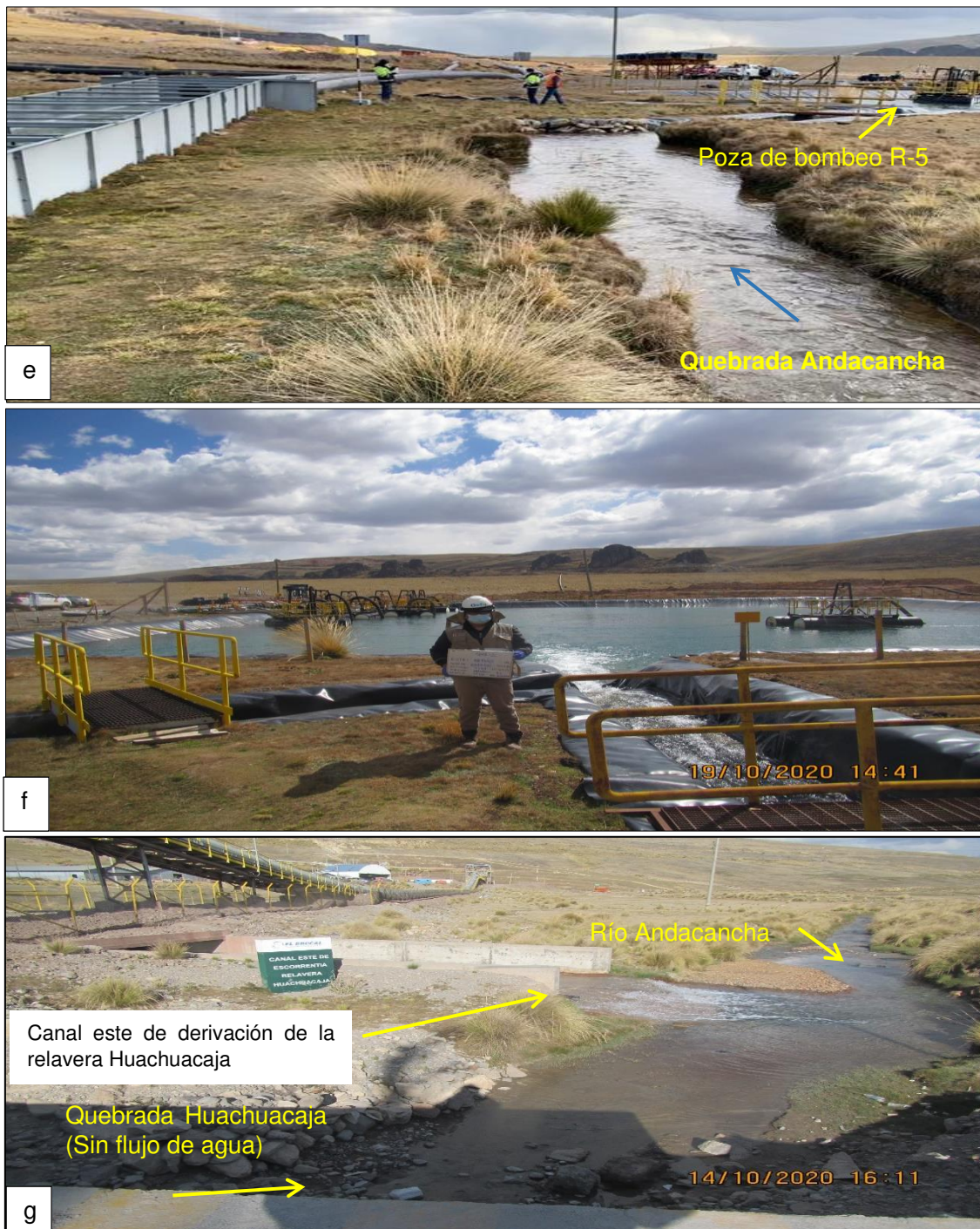


Figura 7.7. a) Vista panorámica de la ubicación del efluente R-5, b) descarga del efluente R-5 a la quebrada Andacancha, c) parte alta de la quebrada Andacancha y efluente R-5 y d) quebrada Andacancha sin flujo de agua (aguas arriba de la descarga del efluente), e) Flujo de agua en dirección a la poza de bombeo R-5, f) poza de bombeo R-5 y g) flujo de agua que sale del canal de coronación Este del depósito de relaves Huachuacaja y llega al río Andacancha y vista de la quebrada Huachuacaja sin flujo de agua

2.- La concentración de sulfato en los puntos QHE-2 (quebrada Andacancha), RAnda6 (canal este de coronación de la relavera Huachuacaja) y RAnda5, A-2, E-11 (río Andacancha) presentaron similares concentraciones a lo registrado en el efluente R-5.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

STEC: Subdirección Técnica
Científica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

Además, al comparar los resultados de todos los puntos ubicados aguas abajo de la descarga del efluente R-5 con los puntos ubicados aguas arriba de este efluente y del depósito de relaves Huachuacaja (QHua y QAnda) se observa el incremento de la conductividad y de las concentraciones de sulfato y calcio, tal como se observa en la Figura 7.8.

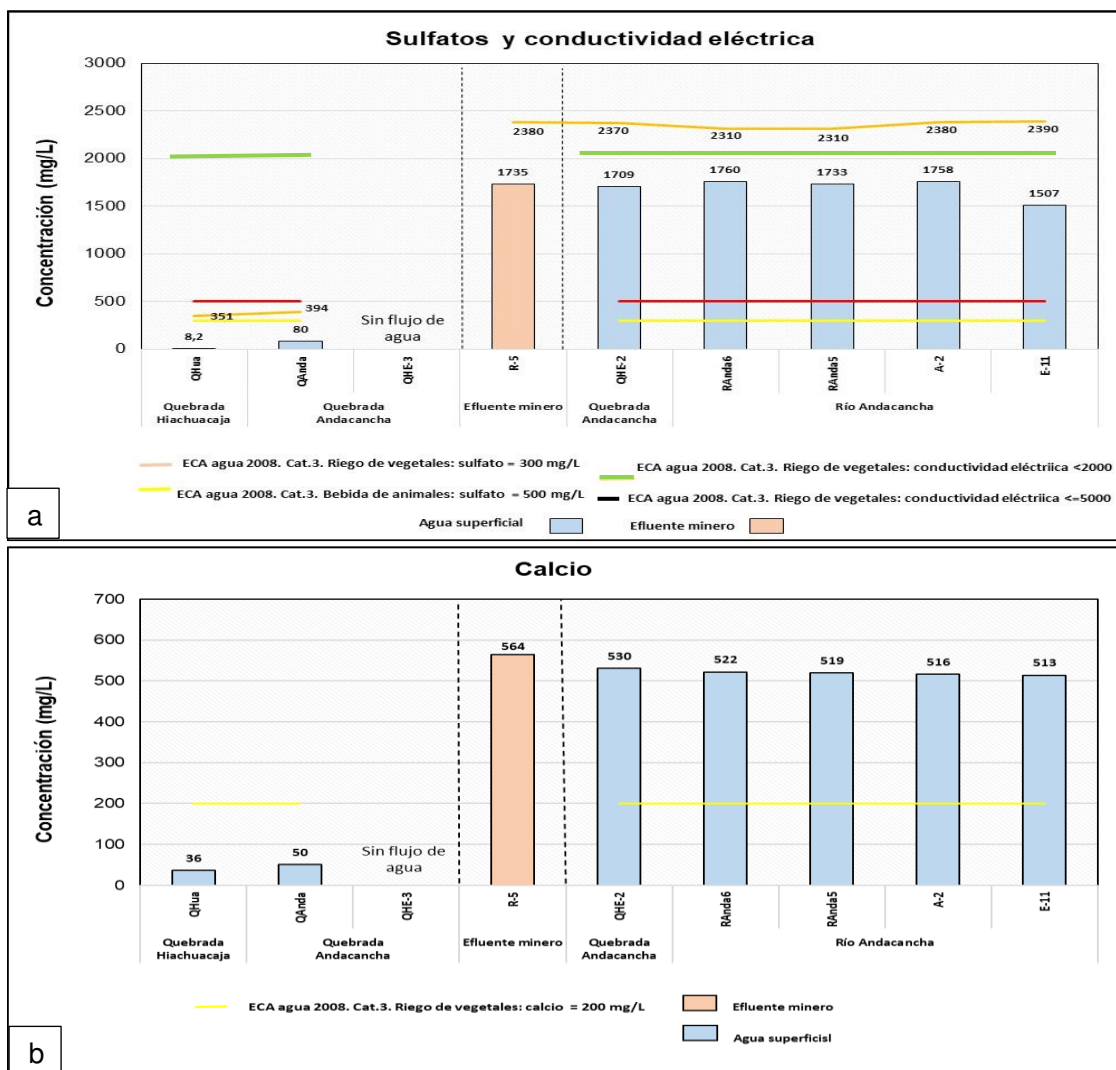


Figura 7.8. Resultados de a) sulfatos y conductividad eléctrica, y b) calcio

En la Figura 7.9 se muestra el comportamiento histórico de la concentración de sulfato desde octubre de 2016 a noviembre de 2020.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

STEC: Subdirección Técnica
Científica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

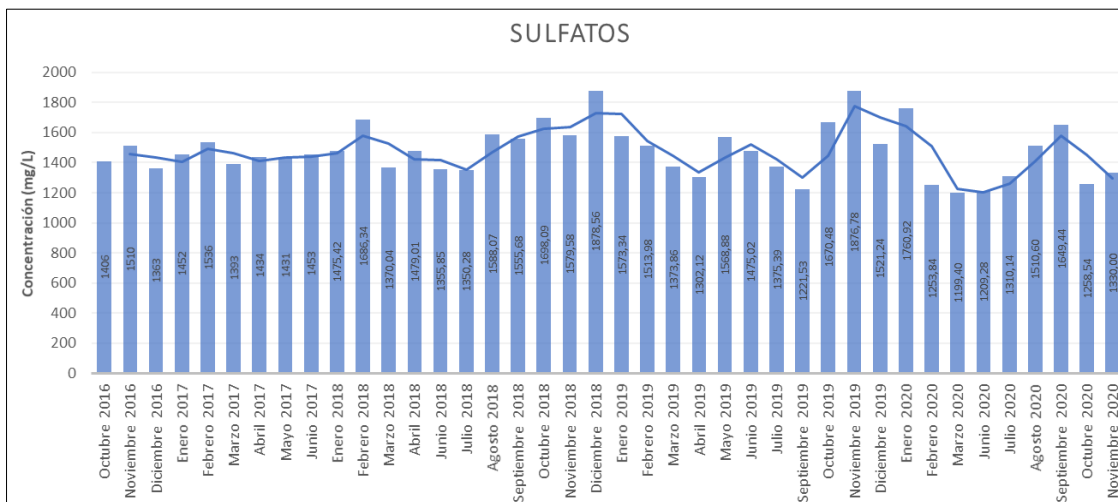


Figura 7.9. Data histórica de la concentración de sulfato desde octubre 2016 a noviembre 2020
Fuente. Informe de monitoreo de calidad de agua de la Unidad Minera Colquijirca (Tajo y planta) correspondiente al I trimestre 2018,2019; II trimestre 2018, 2019; III trimestre 2018, 2019; IV trimestre 2018, 2019; Informe calidad agua de efluentes y aguas superficiales I y II Trimestre 2017; I, II, III, IV Trimestre 2016; Informe de monitoreo de calidad de agua de la Unidad Minera Colquijirca (Tajo y planta) correspondiente al I trimestre 2020 e Informe de monitoreo de calidad de agua de la Unidad Minera Marcapunta Norte y Sur junio 2020

En el Informe técnico N° 067-2018-ANA-AAA X MANTARO-AT/CECM, titulado “Octavo monitoreo participativo de la calidad de agua en la subcuenca del río San Juan- Pasco 2018”, en la Página 12 de 137 se menciona que el punto RAnda2, ubicado en el río Andacancha, aproximadamente a 200 m aguas arriba de las pozas de colección de las aguas de la quebrada Andacancha, registró concentraciones de pH alcalino 8,32 unidades, conductividad eléctrica 377,5 mg/L, calcio 46,02 mg/L y sulfatos 116,6 mg/L.

La alteración del sulfato en el río Andacancha por parte del efluente R-5 se corrobora con la data histórica de los años 2016 al 2020, tal como se observa en la Figura 7.10.

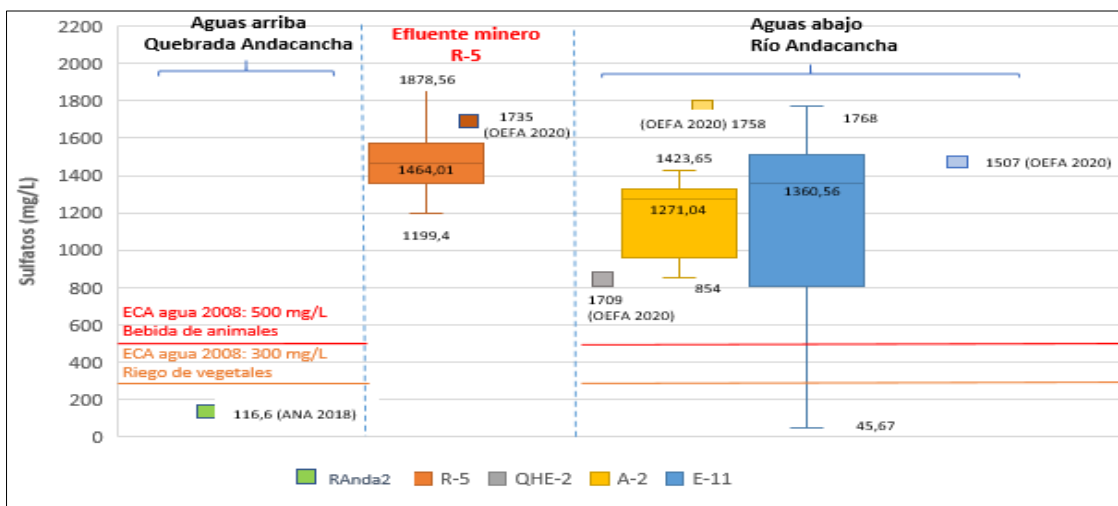


Figura 7.10. Resultados de sulfato en el ámbito del efluente R-5

Fuente. Informe de monitoreo de calidad de agua de la Unidad Minera Colquijirca (Tajo y planta) correspondiente al I trimestre 2018,2019; II trimestre 2018, 2019; III trimestre 2018, 2019; IV trimestre 2018, 2019; Informe calidad agua de efluentes y aguas superficiales I y II Trimestre 2017; I, II, III, IV Trimestre 2016; Informe de monitoreo de calidad de agua de la Unidad Minera Colquijirca (Tajo y planta) correspondiente al I trimestre 2020 e Informe de monitoreo de calidad de agua de la Unidad Minera Marcapunta Norte y Sur junio 2020. Informe técnico N° 067-2018-ANA-AAA X MANTARO-AT/CECM y resultados de OEFA de la EAC 2020.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

STEC: Subdirección Técnica
Científica

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

3.- La hidroquímica (facies sulfatada cálcica) en los puntos QHE-2 (quebrada Andacancha), RAnda6 (canal este de coronación de la relavera Huachuacaja) y RAnda5, A-2, E-11 (río Andacancha) fueron similares a lo registrado en el efluente R-5. Además, al comparar la hidroquímica de todos los puntos ubicados aguas abajo de la descarga del efluente R-5 con los puntos ubicados aguas arriba de este efluente y del depósito de relaves Huachuacaja (QHua y QAnda) se observa el cambio de facie hidroquímica de bicarbonatada cálcica o magnésica a sulfatada cálcica, tal como se observa en la Figura 7.11.

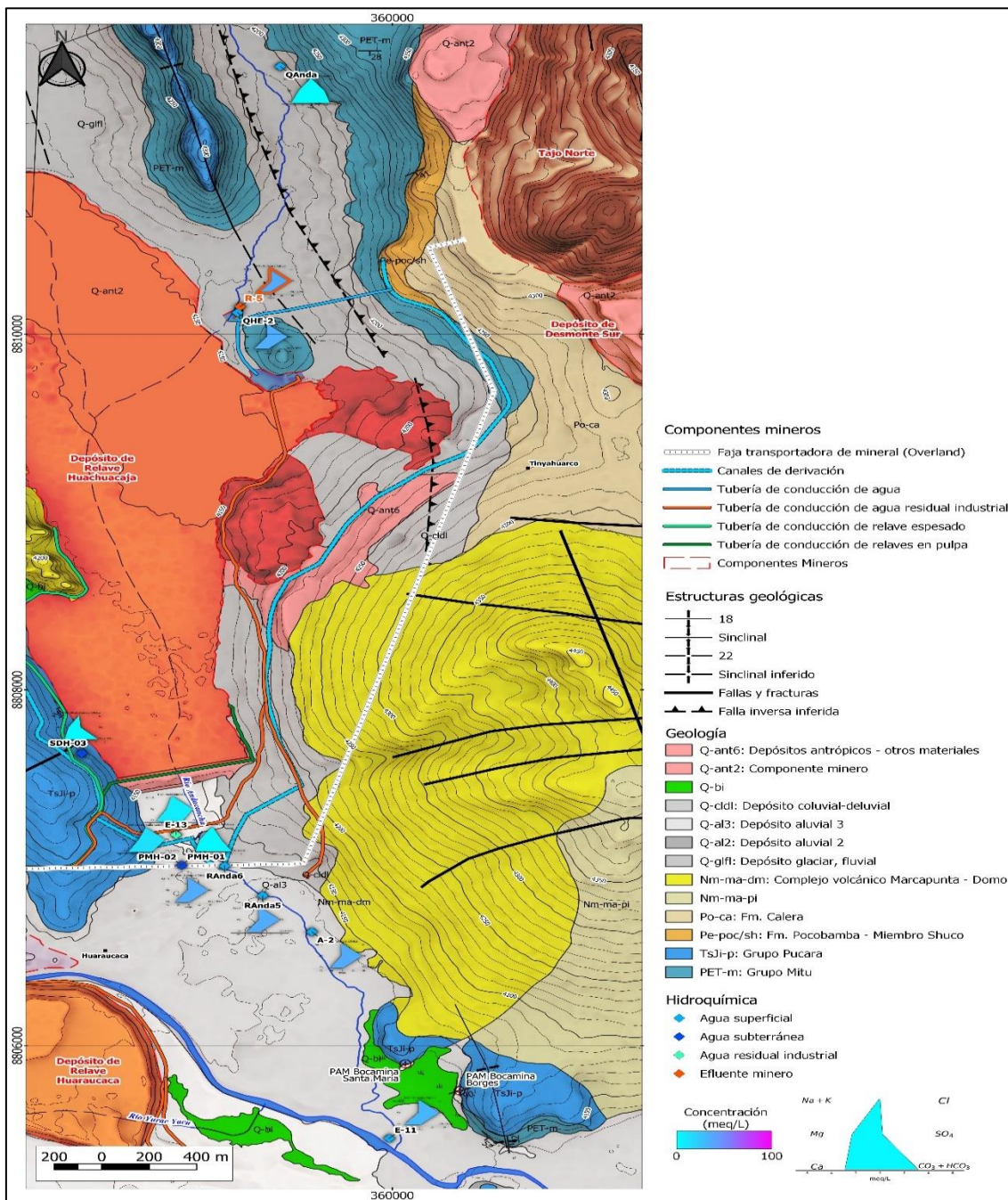


Figura 7.11. Resultados de hidroquímica y geología en el ámbito de la quebrada y río Andacancha

Caracterización

El análisis granulométrico en el sedimento dio como resultado que el punto (QAnda), ubicado aguas arriba de la descarga del efluente R-5 (Figuras 7.12 y 7.13), presentó concentraciones de materia orgánica 17,9 %; mientras que, los puntos ubicados aguas abajo de este efluente presentaron características granulometría heterogéneas, donde en el punto QHE-2 predominaron el limo (49,49 %) y arena (30,96 %); en el punto Randa5 predominaron la grava (35,90 %), arena (30,96 %) y limo (25,75 %); en el punto A-2 predominaron el limo (44,67 %) y arena (40,08 %); en el punto E-11 predominó el limo (66,57 %). Además, la materia orgánica en todos los puntos ubicados aguas debajo del efluente R-5 se encontraron entre 0,5 a 0,9 %.

Calidad

En la Figura 7.12 se observa que el QAnda ubicado aguas arriba forma el cluster , los puntos QHE-2, RAnda5 y E-1, ubicados aguas abajo de la descarga del efluente R-5 forman el cluster 2; el punto A-2 ubicado también aguas abajo de la de la descarga del efluente R-5 forman el cluster 3, en el dendograma se precia que el cluster 2 y 3, tienen mayor similitud en comparación con los otros 2 cluster . Asimismo, el punto muestreado en el bofedal B-1A forma un cluster aparte por tener características diferentes.

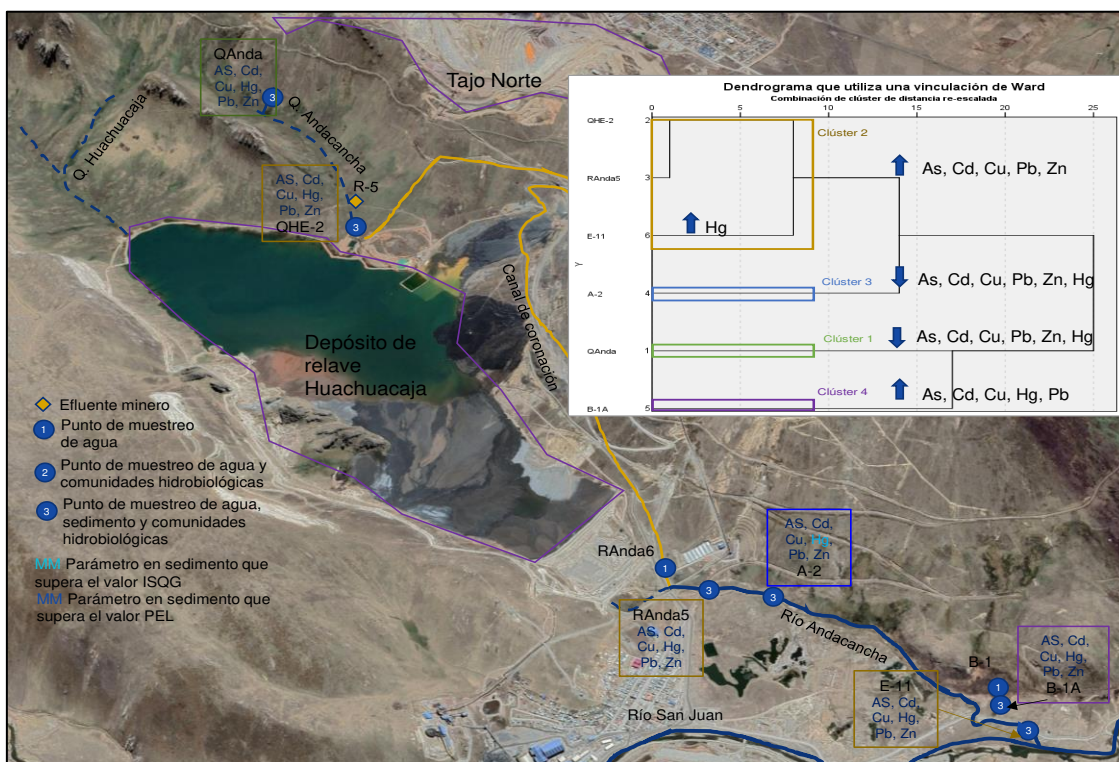


Figura 7.12. Esquema de distribución de puntos de muestreo de sedimento con comparación referencial con la norma canadiense

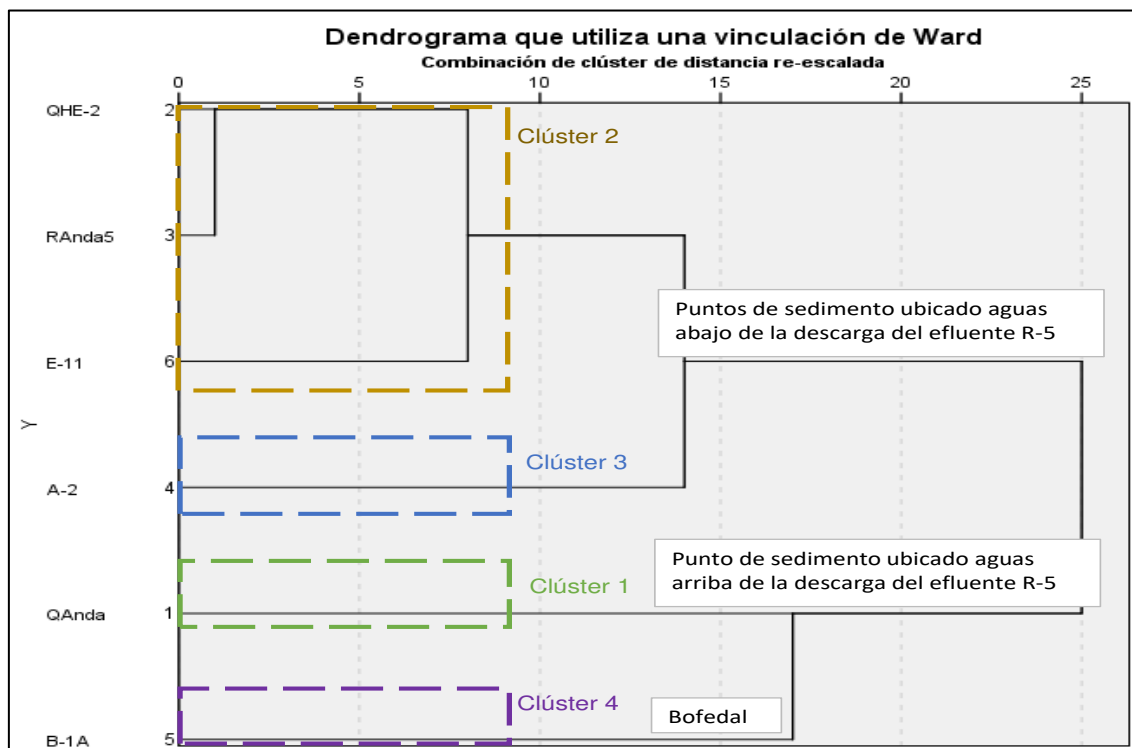


Figura 7.13. Cluster es de la quebrada Andacancha, río Andacancha y bofedal

El sedimento en la quebrada Andacancha (QHE-2) y en el río Andacancha (RAnda5 y E-11), ubicados aguas abajo de la descarga del efluente R-5, presentaron concentraciones de arsénico total, cadmio total, cobre total, mercurio total, plomo total y zinc total, que superaron referencialmente el valor PEL de la norma canadiense para sedimento, que a su vez presentaron mayores concentraciones de metales con respecto al punto QAnda (Figura 7.14), ubicado aguas arriba del efluente R-5; sin embargo, estos metales en agua superficial no superaron los ECA para agua 2008 cat. 3.

Asimismo, las concentraciones de arsénico total, cadmio total, cobre total, mercurio total, plomo total y zinc total en el punto QAnda superaron referencialmente el valor PEL de la norma canadiense para sedimento (Figura 7.14); mientras que, en la columna de agua las concentraciones de los parámetros mencionados no superaron los ECA para agua 2008 cat. 3.

Al comparar las concentraciones de los metales en sedimento de los puntos ubicado agua abajo de la descarga del efluente se observa que el punto E-11 presentó las mayores concentraciones de metales (excepto el arsénico) en comparación con los demás puntos.

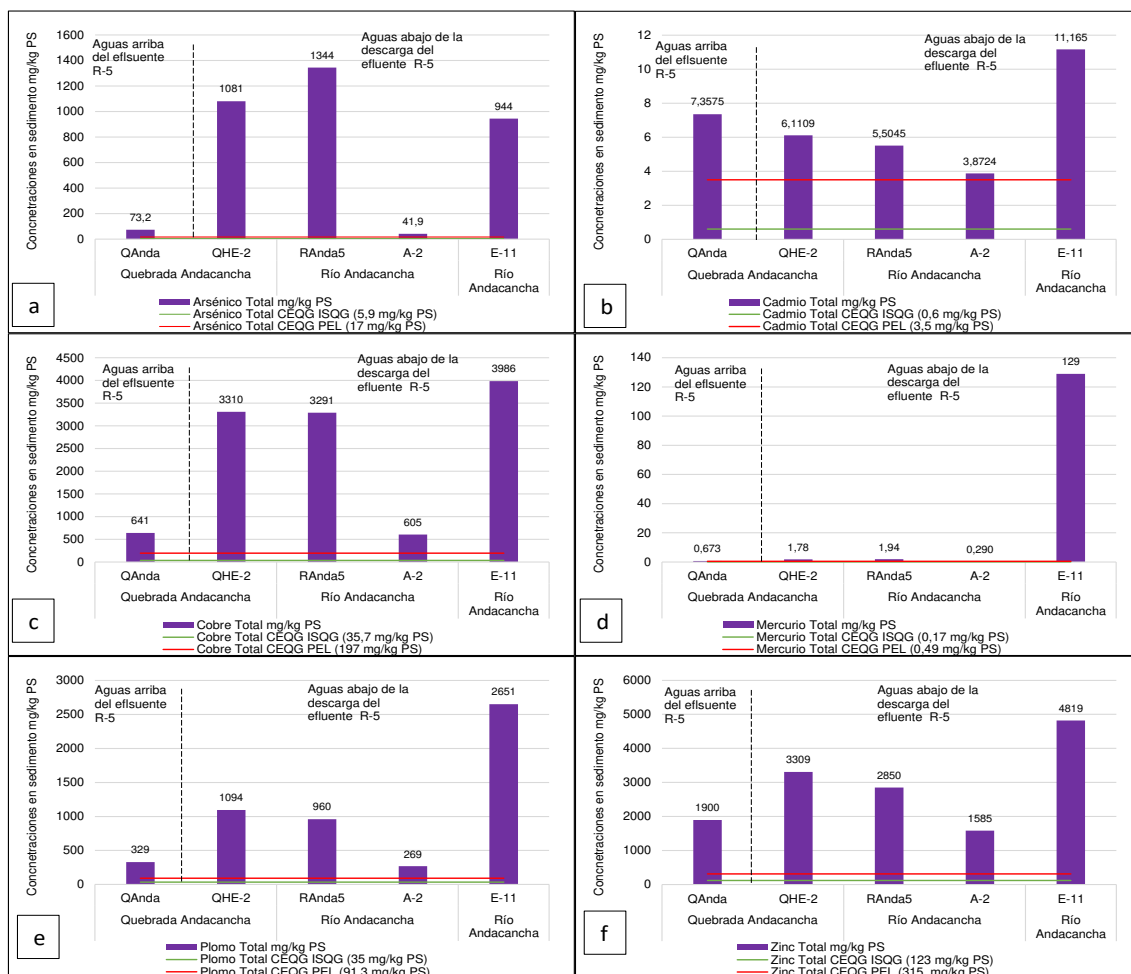
Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud


Figura 7.14. Concentraciones de arsénico total, cadmio total, cobre total, mercurio total, plomo total y zinc total comparados con la guía canadiense para sedimento

El análisis de extracción secuencial de metales pesados por la metodología de Tessier, en el punto ubicado aguas arriba del efluente (QAnda) presentaron concentraciones de arsénico, cadmio, plomo y zinc que se encontraron biodisponibles (etapa 1: extraíbles, etapa 2: intercambiables); además estos metales también se encuentran asociados a los carbonatos cuya movilidad depende de un medio ácido. Cabe indicar que la movilidad de los metales mencionados del sedimento hacia el agua es mínima, debido a que en el agua de este punto solo se encontraron concentraciones traza de estos metales.

Asimismo, en los puntos QHE-2, A-2 y E-11, ubicados aguas abajo del efluente, las concentraciones de arsénico, cadmio, plomo, cobre y zinc se encontraron biodisponibles (etapa 1: extraíbles, etapa 2: intercambiables); además estos metales también se encuentran asociados a los carbonatos cuya movilidad depende de un medio ácido. Cabe indicar que la movilidad de los metales mencionados del sedimento hacia el agua es mínima, debido a que en el agua de estos puntos se encontraron concentraciones traza que no superaron los ECA para agua 2008 Cat. 3; además, estos metales presentaron incrementos en comparación con el punto QAnda. Chira (2010) indicó que las tres primeras etapas de la extracción de metales por la metodología de Tessier son biodisponibles.



El punto B-1A ubicado en un bofedal presentó caracterización granulométrica con predominio de limo (64,41 %) y 0,7 % de materia orgánica. Las concentraciones de arsénico total, cadmio total, cobre total, mercurio total, plomo total y zinc total en este punto superaron referencialmente el valor PEL de la norma canadiense para sedimento. De los resultados del análisis secuencial de metales totales se observó que parte de los metales mencionados se encontraron biodisponibles (etapa 1: extraíbles, etapa 2: intercambiables); además estos metales también se encuentran asociados a los carbonatos cuya movilidad depende de un medio ácido.

Asimismo, el administrado en el Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de Operaciones a 18000 TMD (2010), indicó que las aguas del río Andacancha han recibido las escorrentías de los depósitos de carbón y escorias dejadas por la Ex Fundición de Andacancha (también conocido como ex Fundición Tinyahuarco), estos depósitos figuran en la Resolución Ministerial N.º 010-2019-MEM/DM como pasivos ambientales mineros (PAM). Sin embargo, no se descarta el aporte de metales al sedimento por parte de las actividades que desarrolla la unidad minera Colquijirca.

La dinámica y comportamiento de las comunidades hidrobiológicas depende de las condiciones o estado de la calidad del agua y sedimentos del cuerpo de agua. Los parámetros evaluados en las aguas de las quebradas Huachuacaja (QHua) y Andacancha (QAnda), ubicados aguas arriba del efluente R-5 y del depósito de relaves Huachuacaja, se encontraron dentro de lo establecido en los ECA para agua (2008), sin embargo registraron metales en sedimentos tales como arsénico, cadmio, cobre, mercurio y plomo que superaron referencialmente los valores PEL de la CEQG, esto no influyó negativamente en el desarrollo de las comunidades hidrobiológicas registrando una mayor diversidad, riqueza de especies de microalgas y taxones de macroinvertebrados bentónicos (Tabla 6.13, Tabla 6.15 y Figura 7.15) que se desarrollan en ambientes de buenas condiciones tales como *Epithemia adnata* (Kopp *et al.*, 2012; You *et al.*, 2009;) y *Hyalella* sp., Lymnaeidae n.d., *Ectemnostegella* sp., Sarcoptiformes n.d. y Sphaeriidae n.d. (Roldan G, 1988; Encalada et al. 2011), esto se reflejó en una calidad moderada y buena según el índice biótico andino (ABI). Es importante mencionar que en la quebrada Huachuacaja (QHua) se registró la presencia de peces Chalhuanas (*Orestias* sp.), espécimen que es endémica de los Andes del Perú (Ortega y Hidalgo, 2008) y que la integridad biológica de una comunidad de peces es un indicador sensible de los ecosistemas acuáticos (Fausch *et al.*, 1990).

Caso contrario ocurre en los puntos ubicados aguas abajo del efluente R-5 en donde los parámetros de conductividad eléctrica, sulfatos y calcio superaron los ECA para agua 2008 Cat 3; además la presencia de arsénico, cobre, mercurio y plomo en sedimentos superaron el valor PEL de la CEQG, esto impidió el buen desarrollo de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos y microalgas registrando la baja diversidad y riqueza de especies (Tabla 6.13, Tabla 6.15 y Figura 7.15) con predominio del taxón Haplotaxidae nd. y la especie *Fragilaria Capuccina* que son tolerantes a metales pesados (Ferreira *et al.*, 2007; Winner *et al.*, 1980), esto se vio reflejado en todo el río Andacancha con una calidad pésima según el índice biótico andino (ABI). Además, según el análisis cluster (Figura 7.15) se pudo evidenciar dos grupos, donde en el primero se asocian los puntos QHua, QAnda que presentan una mejor calidad de agua, mientras que en el segundo se asocia los puntos Randa5, A-2 y E-11 que están directamente vinculado a las aguas del río Andacancha. Este río tiene como origen el efluente R-5. Es importante mencionar que en



el río Andacancha (tramo entre los puntos A-2 al E-11) se hizo el esfuerzo de pesca donde no se pudo evidenciar ningún espécimen.

Esta diferencia en la composición de especies y la calidad biológica se corroboró con el análisis PERMANOVA (Anexo C), donde se registraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los puntos blancos (QHua, QAnda) y los alterados (RAnda5, A-2, E-11). Además, según el análisis de componentes principales – PCA se infiere que la riqueza y diversidad de la composición de especies se debe a la mayor variabilidad de las características del agua superficial en las concentraciones de metales totales (Cd, Ca, Cu, Sn, Li, Mo, K, Se, Na, W), disueltos (Sb, Cd, Ca, Co, Cu, Sn, Li, Mo, K, Se, Na, W), sulfatos, nitratos, nitritos, cloruros y fluoruros, además de los metales en sedimentos (As, Cu, Hg, Pb, Ba, Sn, Au, Se) (Anexo C). Asimismo, según el análisis de correspondencia canónica ACC (Figura 7.16 y Anexo C) se demuestra que los organismos tolerantes *Haplotaxida* n.d, *Limnophora* sp., *Fragilaria Capuccina*, *Achnantheidium minutissimum* tuvieron una relación directa con los metales totales, disueltos y parámetros fisicoquímicos mencionado anteriormente; y que a su vez estos parámetros presentaron una relación indirecta con los taxones facultativos y especies que se desarrollan en ambientes de buena condición, lo que indica que el aumento de las concentraciones de dichos parámetros genera la disminución de estos organismos.

Es importante mencionar que en el río Andacancha el punto E-11 se encuentra muy cercano al punto B-4¹⁵ emitido en sus informes de monitoreo desde el año 2011 al 2018, donde presentaron una escasa composición y riqueza de especies.

En el bofedal (B-1 A) se registró alta diversidad y riqueza de taxas de macroinvertebrados bentónicos y especies de microalgas (Tabla 6.13, Tabla 6.15 y Figura 7.15) similares a la quebrada Huachuacaja (QHua) y Andacancha (QAnda).

¹⁵

Punto de control mencionado en la Modificación del EIA del Proyecto "Construcción de los Depósitos de Relaves N° 6 y 7"- Recrecimiento y Ampliación del Depósito Integrado N° 7, aprobado mediante Resolución Directoral N.º 324-2012-MEM/AAM.

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

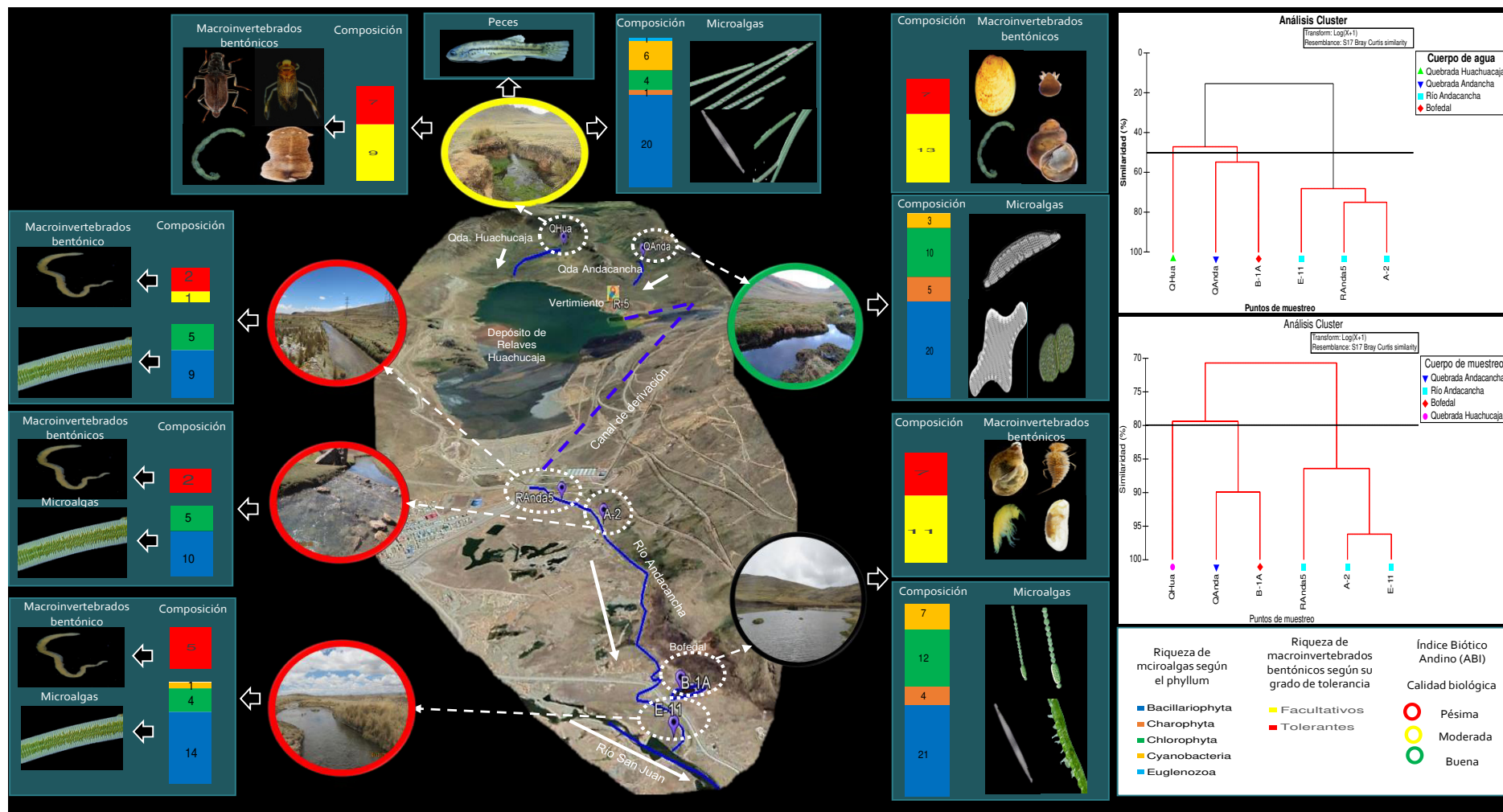


Figura 7.15. Dinámica de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos y microalgas en función a su calidad biológica, composición y similitud de grupos de especies

Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Universalización de la Salud

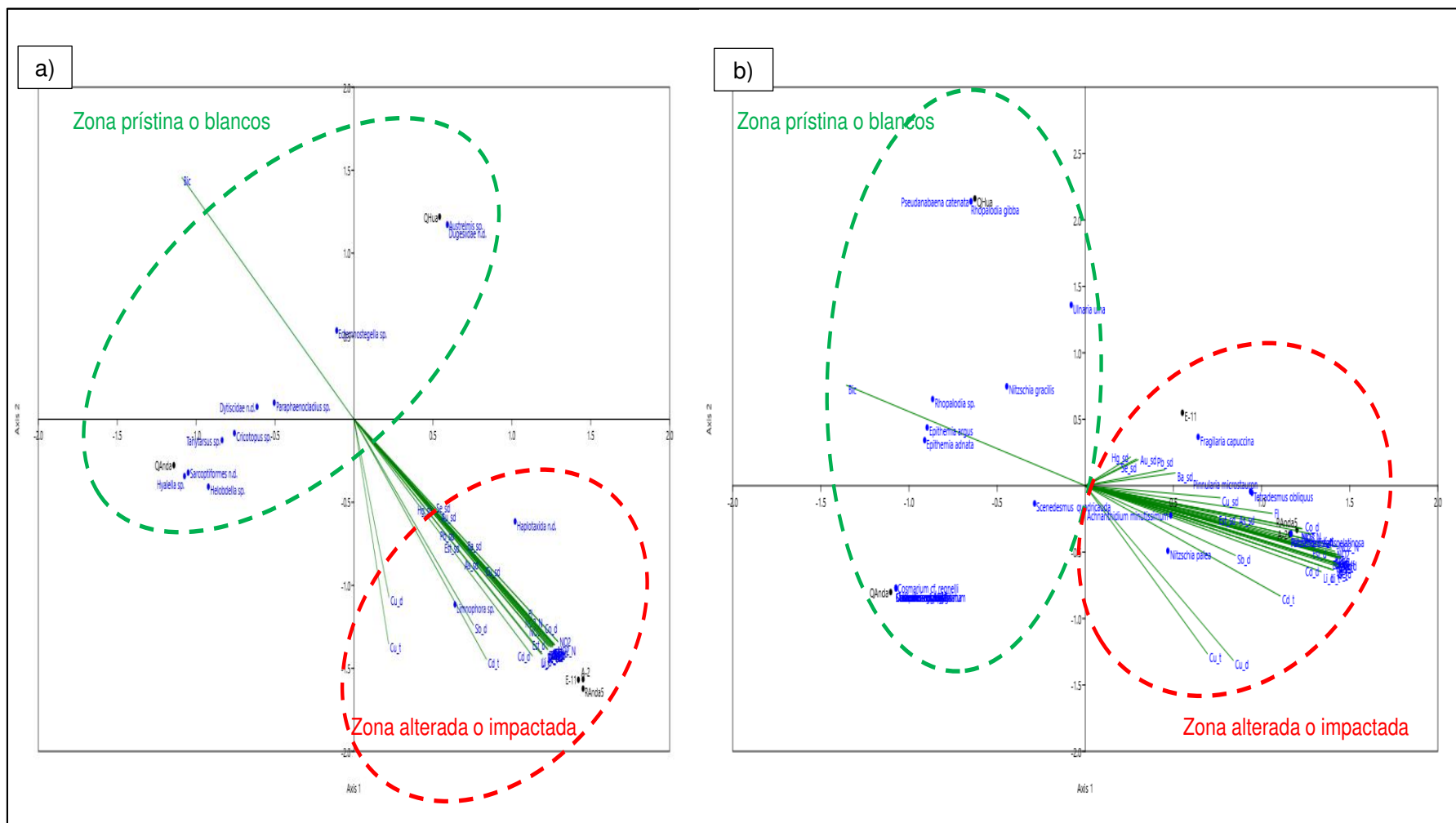


Figura 7.16. Análisis de correspondencia canónica - ACC entre los factores abióticos vs a) los macroinvertebrados bentónicos y b) Microalgas



8. CONCLUSIONES

- Se evidencia la presencia de un cuerpo saturado de agua que se relaciona al acuífero libre de la quebrada Huachuacaja (líneas ERT-6 y ERT-8), el cual al encontrarse con el dique R4 provoca una surgencia de la misma. De acuerdo al contexto geológico y las características fisicoquímicas de los puntos blancos MHua-2 y QHua, estas surgencias deberían presentarse en la facie bicarbonatada cálcica o magnésica; sin embargo, se presentan en una facie sulfatada cálcica, que es semejante a la facie del sobrenadante del depósito de relaves Huachuacaja, lo cual evidencia filtración y la mezcla de aguas; por lo que las filtraciones acumuladas de agua (AF5, AF6, AF7 y ESP-8) identificados al pie del dique de protección R4 se deben considerar como agua residual industrial o de contacto.
- Durante la acción de campo realizado del 12 al 31 de octubre de 2020, la quebrada Andacancha (QHE-2) tuvo como origen la descarga del efluente R-5, estas aguas son derivadas mediante el canal de coronación Este del depósito de relaves Huachuacaja (Randa6) al río Andacancha (RAnda5, A-2, E-11) y se evidencia en que las concentraciones de los parámetros evaluados en ambos cuerpos receptores son similares a lo registrado en el efluente. Además, el punto ubicado aguas arriba de este efluente (QHE-3) se encontró sin flujo de agua y no hubo aporte de la quebrada Huachuacaja al río Andacancha.
- Los parámetros evaluados en el efluente minero R-5 de la planta de tratamiento de aguas industriales de la UF Colquijirca cumplieron con los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero-Metalúrgicas, aprobados mediante Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM. Sin embargo, este efluente también presenta alta concentración de sulfatos (1735 mg/L) que altera la calidad de la quebrada Andacancha (QHE-2) y río Andacancha (RAnda5, A-2, E-11) principalmente con este anión que superó el ECA para agua 2008 categoría 3 en todos los puntos ubicados aguas abajo de este efluente; esta influencia en relación al sulfato se confirma con la data histórica del 2016 al 2020. Además, la alteración se evidencia en el cambio de facie hidroquímica de bicarbonatada cálcica o magnésica a sulfatada cálcica e incremento de la concentración de este anión en comparación con los puntos ubicados aguas arriba (QAnda, QHua) del efluente y depósito de relaves Huachuacaja.
- Por otro lado, la concentración de arsénico total, cadmio total, cobre total, mercurio total, plomo total y zinc total en los sedimentos de la quebrada Andacancha (QHE-2) y río Andacancha (RAnda5, A-2, E-11) que superaron, referencialmente, los valores PEL de la guía canadiense, influyó negativamente en el desarrollo de las comunidades hidrobiológicas presentando especies tolerantes a metales pesados reflejándose en una pésima calidad biológica.

9. ANEXOS

Anexo A: Reporte de campo

Anexo B: Reporte de resultados

Anexo C: Análisis multivariado



10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernandez, E., Cruz-Sanchez, M., Cruz-Chavez, E. 2004. Terra Latinoamericana. 22 (4), 485-497.
- Acosta, R.; Ríos, B.; Rieradevall, M. & Prat, N. (2009). *Propuesta de un Protocolo de Evaluación de la Calidad Ecológica de Ríos Andinos (C.E.R.A) y su Aplicación a dos Subcuencas en Ecuador y Perú*. Limnética, 28(1): 35-64.
- Anderson, M. J., Gorley, R. N. & Clarke, K. R. (2008). PERMANOVA+ for PRIMER: guide to Software and Statistical Methods, 1st edition. Plymouth, UK: University of Auckland and PRIMER-E. 214 pp.
- Cuadras, C. (2014). *Nuevos Métodos de Análisis Multivariante*. Barcelona, España: CMC Editions.
- Cuizano, N., Reyes, U., Dominguez, S., Llanos, B., Navarro, A. 2009. Relevancia del pH en la adsorción de iones metálicos mediante algas pardas. Revista sociedad química Perú. 76 82), 126-130.
- Chira Fernández, J. (2010). Metales biodisponibles en la cuenca alta del río Torres-Vizcarra, departamentos de Ancash y Huánuco. Revista Del Instituto De Investigación De La Facultad De Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica Y Geográfica, 13(26), 15-20.
- Chira, J. Metales biodisponibles en la cuenca alta del río Torres-Vizcarra, departamentos de Ancash y Huánuco.
- Encalada, A. C., M. Rieradevall, B. Ríos-Touma, N. García y N. Prat (2011). *Protocolo simplificado y guía de evaluaciones de la calidad de ríos andinos (CERA-S)*. Quito: USFQ, UB, AECIO, FONAG.
- Dentith, M. y Mudge, S. (2014). Geophysics for the mineral exploration geoscientist. Cambridge University Press. pp 13-79.
- Docente de la E.A.P. de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E-mail: jchiraf@hotmail.com
- Farnham, I.M., Johannesson, K.H., Singh, A.K., Hodge, V.F., Stetzenbach, K.J., 2003. Factor analytical approaches for evaluating groundwater traceelement chemistry data. Anal. Chim. Acta 490, 123–138.
- Fausch K., Lyons J., Karr J., and Angermeier P. 1990. Fish communities as indicators of environmental degradation. In: Biological indicators of stress in fish. S. M. Adams (ed): 191 pp. American Fisheries Symposium 8, Maryland.
- Feinsinger P. (2003). *El diseño de estudios de campo para la conservación de la biodiversidad*. Santa Cruz: Ediciones FAN.
- Ferreira, E., S. F. P. Almeida, M. L. Nunes, A. T. Luís, F. Borg, M. Hedlund, C. Marques, C. Patinha y P. Teixeira. (2009). Heavy metal pollution downstream the abandoned Coval da Mó mine (Portugal) and associated effects on epilithic diatom communities.



Science of Total Environment, 407(21), 5620–5636.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.06.047>.

- Ficklin W.H., Plumlee G.S., Smith K.S., y Mc Hugh J.B. (1992). Geochemical classification of mine drainages and natural drainages in mineralized areas. En: Y. Kharaka, A. Maest (Eds.), *Proceedings of water-rock interaction* (pp. 381-384). Rotterdam. Balkema.
- Fuentes, S. (2011). *Componentes principales*. Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid.
- Gou, X., Li, Y., Wang, G., 2007. Heavy metal concentrations and correlations in rain-fed farm soils of Sifangwu Village, Central Gansu Province, China. *Land Degrad. Dev.* 18 (1), 77–88.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. (2001). *PAST: Paleontological statistics Software* (Version 3.12) [Software]. Disponible desde <http://folk.uio.no/ohammer/past/>.
- Jost, L. (2006). *Entropy and diversity*. *Oikos*, 113, 363-375.
- Kopp R., Skácelová O., Heteša J., Marvan P., Bešta T., Zapomilová E., Straková L., Bohunická M. 2012. A hundred years of phycological research in the Lednice Ponds – the impact of environmental conditions on the development of cyanobacteria and algae. *Czech Republic. Acta Musei Moraviae, Scientiae biologicae* (Brno) 97(1): 3–87, 2012
- Krebs C., 1978. *Ecology: the experimental analysis of distribution and abundance*. Nueva York, USA: Harper & Row.
- Magurran A. (1991). *Diversidad Ecológica y su medición*. Barcelona, España: Ediciones Vedral.
- Martínez, A. (1998). Interpretación Ambiental de datos hidroquímicos de la laguna continental de Castiñeiras. *Geographicalia*, 36,101-109.
- McKenna, J. E. 2003. An enhanced cluster analysis program with bootstrap significance testing for ecological community analysis. *Environ. Model. Software.*, 18: 205-220
- Metales biodisponibles en la cuenca alta del río Torres-Vizcarra, departamentos de Ancash y Huánuco Bioavailable metals in the upper basin of the Torres-Vizcarra, departments of Ancash and Huanuco Jorge Chira Fernández*
- Ministerio del ambiente (Minam). (2014). *Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú*. Lima. Por Samanez, V.I., Rimarachín, C.V., Palma G.C., Arana, M.J., Ortega T.H., Correa, R.V. & Hidalgo.
- Loke, M. (1999). A Practical Guide to 2D and 3D Surveys. *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies*, 8-10.
- Organización de los Estados Americanos (OEA) - Secretaría General. (1983). *Introducción a la teoría y práctica de la taxonomía numérica*. Washington, DC. Por Crisci, J.V.; López Armengol, M.F.



- Ortega H. and Hidalgo M. 2008. Freshwater fishes and Aquatic habitats in Perú: Current Knowledge and conservation. *AquaticEcosystem Health and Management*. Vol 11(3): 257-272. Taylor and Francis Group.
- Peet, R. (1974). *The measurement of species diversity. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 5, 285-307.
- Pielou, E. (1975). *Ecological Diversity*. Jhon Wiley, New York. 165 pp.
- Piper, A.M. (1944) A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25, 914-928.
- Rahman, M.S., Saha, N., Molla, A.H., 2014b. Potential ecological risk assessment of heavy metal contamination in sediment and water body around Dhaka export processing zone, Bangladesh. *Environ. Earth Sci.* 71 (5), 2293–2308.
- Roldan, G.(1988). Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia. FENColombia. Colciencias. Universidad de Antioquia.
- Salvarredy, M., 2008. Contaminación en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. These se Doctorat de L'Université Toulouse III – Paul Sabatier.
- Segura *et al.* (2016). Diversidad en comunidades de diatomeas epilíticas con relación a los parámetros fisicoquímicos en la cabecera del río Zinapécuaro, México. *Hidrobiológica*, 26 (2): 187-202.
- Sokal, R. y Michener, C. (1958). A statistical method for evaluating systematic relationships. *University of Kansas Science Bulletin*, 38: 1409-1438.
- Ter Braak, C. J. F. & Verdonschot, P. F. M. (1995). Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology. *Aquatic Science* 57(3), 255-287.
- Winner, R. W., M. W. Boesel & M. P. Farrel. (1980). Insect community structure as an index of heavy-metal pollution in lotic ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37: 647–655.
- You Q., Liu Y., Wang Y.* and Wang Q. 2009. Taxonomy and distribution of diatoms in the genera *Epithemia* and *Rhopalodia* from the Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. *Nova Hedwigia* 89 3—4.
- Zhou, J., Ma, D., Pan, J., Nie, W., & Wu, Kai. (2008). Application of multivariate statistical approach to identify metal sources in sediments and waters: a case study in Yangzhong, China. *Environ. Geol.* (54), 373-380.