

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



TESIS

**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LAS UNIDADES
LITOLÓGICAS UBICADOS ALEDAÑAS A LOS PAM EXCELSIÓR Y
QUIULACOCHA, Y SU APLICACIÓN EN LOS ASPECTOS AMBIENTALES
REPORTADOS EN LOS CENTROS POBLADOS DE CHAMPAMARCA Y
QUIULACOCHA, DISTRITO SIMÓN BOLÍVAR, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO
PASCO**

PRESENTADO POR:

Bach. FRAY LUIS YANAPA HUAQUISTO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO GEÓLOGO**

ASESOR:

Mgt. JOSE DIONICIO CARDENAS ROQUE

CUSCO - PERU

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS UBICADAS ALEDAÑOS A LOS PANTANOS EXCELSIOR Y QUIVIACOLMA, Y SU APLICACIÓN EN LOS ASPECTOS AMBIENTALES REPORTADOS EN LOS CENTROS POBLADOS DE CHAMPATARCA Y QUIVIACOCHA, DISTRITO SITÓN BOLIVAR, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO PASCO presentado por: FRAY IUIS YANAPA MUÑOZ con DNI Nro.: 70019558 presentado por: con DNI Nro.: para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO GEOLOGO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 10%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 18 de DICIEMBRE de 2024


Firma

Post firma JOSE DIONICIO CARDENAS ROQUE

Nro. de DNI 23873595

ORCID del Asesor 0000-0002-5261-419X

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259417146957

FRAY YANAPA

9. Tesis Fray Yanapa V-1_act15.12.2024.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:417146957

Fecha de entrega

18 dic 2024, 1:12 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

18 dic 2024, 1:43 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

9. Tesis Fray Yanapa V-1_act15.12.2024.pdf

Tamaño de archivo

7.2 MB

91 Páginas

18,160 Palabras

108,567 Caracteres

10% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
60 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
21 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

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

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

DEDICATORIA

*A mi familia, por cumplir nuestros sueños
compartidos.*

*A mi hijo Salvador, a quien amo y quiero
inspirar.*

*El esfuerzo valió la pena, pero el camino
continúa, el cielo es el límite y la gracia de
Dios es grande.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser el soporte espiritual en los momentos difíciles del periodo universitario, comienzos de la etapa laboral, en el cumplimiento de este trabajo de investigación, y por poner a grandes personas en mi camino; en general, por todo.

Al Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), por financiar y proveer la información total para la realización del presente trabajo de investigación.

A Francisco García, director de la Dirección de Evaluación Ambiental (DEAM) del OEFA, por darme la oportunidad de colaborar en los proyectos de evaluaciones ambientales con enfoque de participación multidisciplinaria.

A Víctor Carlotto Caillaux y José Cárdenas Roque, por su asesoría inobjetable en todo el proceso de investigación y revisión de la tesis, y por su amistad.

Finalmente, a mi novia y amigos, por su tiempo, palabras de aliento y presión ejercida.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Índice general	iv
Lista de tablas.....	v
Lista de figuras	vi
Lista de siglas y acrónimos.....	viii
Resumen	ix
Abstract	x
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Área de estudio	1
1.2.1. Ubicación	1
1.2.2. Accesibilidad.....	4
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	5
2.1. Planteamiento del problema	5
2.1.1. Descripción del problema	5
2.1.2. Formulación del problema	6
2.2. Justificación de la investigación.....	6
2.3. Objetivos.....	7
2.3.1. Objetivo general	7
2.3.2. Objetivos específicos.....	7
2.4. Hipótesis.....	7
2.5. Variables.....	8
2.6. Tipo de investigación	8
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	9
3.1. Antecedentes de estudios geológicos y geoquímicos	9
3.1.1. Contexto geológico regional	9
3.1.2. Contexto geológico local.....	13
3.1.3. Contexto geoquímico de los PAM Excelsior y Quiulacocha	16
3.1.4. Otros estudios de referencia.....	18
3.2. Antecedentes de aspectos ambientales	19
3.3. Bases teóricas	21
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE EJECUCIÓN	23
4.1. Etapa de precampo (gabinete): revisión de información y planificación	23
4.2. Etapa de campo.....	23

4.2.1. Guías de referencia	23
4.2.2. Ubicación de puntos de caracterización litológica y muestreo de roca.....	24
4.2.3. Ensayos de laboratorio	27
4.2.4. Equipos y materiales	27
4.3. Etapa poscampo (gabinete): interpretación de resultados.....	28
4.3.1. Control de calidad.....	28
4.3.2. Procesamiento de datos	29
4.3.3. Criterios de análisis	29
CAPÍTULO V: RESULTADOS	30
5.1. Contexto geológico local.....	30
5.1.1. Unidades litoestratigráficas.....	32
5.1.1.1. Grupo Cabanillas	32
5.1.1.2. Grupo Mitu	35
5.1.1.3. Formación Pocobamba – Miembro Shuco.....	36
5.1.1.4. Formación Calera	37
5.1.1.5. Complejo volcánico Cerro de Pasco.....	38
5.1.1.6. Depósitos cuaternarios	39
5.1.2. Contexto estructural.....	46
5.2. Características geoquímicas y mineralógicas de las unidades litológicas	49
5.2.1. Metales totales	52
5.2.2. Test de generación de acidez.....	58
5.2.3. Prueba de lixiviación de metales	60
5.2.4. Extracción secuencial	62
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
6.1. Estado de las actividades en el área de estudio en 1962.....	69
6.2. Background geoquímico basado en metales totales	71
6.2.1. Fuentes de generación de drenaje ácido de roca.....	75
6.2.2. Disponibilidad de EPT lixiviables	76
CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES.....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
ANEXOS.....	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Denuncias ambientales registradas en el Sinada en el periodo 2011 al 2020 ..	20
Tabla 4.1. Guías y manuales de referencia utilizados para la descripción y muestreo de unidades litológicas aledaños a los PAM Excelsior y Quiulacochoa.....	23
Tabla 4.2. Parámetros de muestreo considerados en el trabajo de investigación	24

Tabla 4.3. Ubicación de los puntos de caracterización litológica y muestreo de rocas aledaños a los PAM Excelsior y Quiulacocha.....	25
Tabla 4.4. Parámetros y métodos de análisis de laboratorio de las muestras de roca de las unidades litológicas	27
Tabla 4.5. Equipos y materiales considerados en la tesis de investigación	27
Tabla 5.1. Parámetros analizados en las muestras de roca de las unidades geológicas identificadas en el área de estudio	49
Tabla 5.2. Elementos predominantes y trazas de las unidades litoestratigráficas aledaños al PAM Excelsior	53
Tabla 5.3. Elementos predominantes y trazas de las unidades litoestratigráficas aledaños al PAM Quiulacocha	56
Tabla 5.4. Resultados de la prueba ABA en las unidades litoestratigráficas aledaños a los PAM Excelsior y Quiulacocha.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de ubicación del área de estudio	2
Figura 1.2. Ubicación de los componentes mineros aledaños al área de estudio, a cargo de las unidades fiscalizables Cerro de Pasco y Planta de óxidos	3
Figura 3.1. Mapa geológico regional a escala 1:100 000 del área de estudio y zonas aledañas	10
Figura 3.2. Mapa geológico regional a escala 1:50 000 del área de estudio y zonas aledañas	12
Figura 3.3. Grabens y horst activos durante el Pérmico al Cretácico en el cuadrángulo de cerro de Pasco.....	13
Figura 3.4. Mapa geológico del complejo de diatrema-domo y diferentes estilos de mineralización epitermal en Cerro de Pasco	15
Figura 3.5. Perfil esquemático de la relación de generación de drenaje ácido y metales entre el botadero de desmonte Excelsior y depósito de relaves Quiulacocha	16
Figura 3.6. Modelo de efectos climáticos sobre la formación y disolución de sales eflorescentes y movilidad de soluciones ácidas ricas en metales en el botadero Excelsior. A, época seca y B, época húmeda.....	18
Figura 5.1. Unidades litoestratigráficas de la región Cerro de Pasco y Colquijirca	30
Figura 5.2. Mapa geológico local del área de estudio	31
Figura 5.3. Afloramiento de rocas de la Formación Cabanillas en el sector Ayapoto (punto CG-EXC2).....	33
Figura 5.4. Afloramiento de rocas de la Formación Cabanillas en el sector Champamarca (puntos CG-EXC8 y CG-EXC10)	33
Figura 5.5. Afloramiento de rocas de la Formación Cabanillas en borde norte y noroeste del PAM Quiulacocha (puntos CG-QUI3 y CG-QUI9)	34
Figura 5.6. Afloramiento de rocas de la Formación Cabanillas al sur del cementerio del C.P. Quiulacocha (punto CG-QUI7).....	34
Figura 5.7. Afloramiento de rocas del Grupo Mitu al sur y este del cementerio del C.P. Quiulacocha (puntos CG-QUI1 y CG-QUI8)	35
Figura 5.8. Afloramiento de rocas de la Formación Pocobamba – Miembro Shuco aledaño a la comunidad campesina Quiulacocha 01 (punto CG-EXC13)	36
Figura 5.9. Afloramiento de rocas de la Formación Pocobamba – Miembro Shuco en el borde este del PAM Quiulacocha (punto CG-QUI4)	37
Figura 5.10. Afloramiento de rocas del diatrema del Complejo Volcánico Cerro de Pasco en el borde norte del PAM Excelsior (punto CG-EXC1)	38

Figura 5.11. Depósitos aluviales dispuestos alrededor al piezómetro P-8 (a) y en el sector Champamarca (b) (puntos CG-EXC3 y CG-EXC5)	40
Figura 5.12. Depósitos aluviales dispuestos al sur del CP Champamarca (puntos CG-EXC7 y CG-EXC9).....	40
Figura 5.13. Depósitos antropogénicos dispuestos en los bordes este, sur y oeste del PAM Quiulacocha (puntos CG-EXC4, RM-EXC2 y CG-EXC11)	41
Figura 5.14. Depósito glaciar dispuestos al sureste del C.P. Quiulacocha (puntos CG-QUI2)	43
Figura 5.15. Depósito glaciar-fluvial dispuestos al norte del CP Quiulacocha (puntos CG-QUI5 y CG-QUI6)	43
Figura 5.16. Depósito aluvial dispuestos en el borde este del PAM Quiulacocha (puntos CG-QUI0)	44
Figura 5.17. Depósito fluvial dispuesto en las terrazas bajas alrededores al río Ragra, al oeste del PAM Quiulacocha	45
Figura 5.18. Depósito antropogénico dispuesto en el borde sureste del PAM Quiulacocha (puntos RM-QUI1 y RM-QUI2).....	45
Figura 5.19. Mapa de estructuras pre Cenozoicas regionales de la región Cerro de Pasco	46
Figura 5.20. Falla geológica ubicada en la vía cerca del club El Golf de Cerro de Pasco, asociado a brechas y roca molida (punto CG-EXC12)	47
Figura 5.21. Mapa de estructuras regionales y locales de la zona de estudio	48
Figura 5.22. Mapa de ubicación de puntos de muestreo de roca para el análisis litogeoquímico en el área de estudio	51
Figura 5.23. Concentración de elementos predominantes y trazas de las unidades litoestratigráficas alrededores al PAM Excelsior	54
Figura 5.24. Concentración de elementos predominantes y trazas de las unidades litoestratigráficas alrededores al PAM Quiulacocha.	57
Figura 5.25. Concentración de metales y aniones lixiviables por la prueba Shake Flask de las unidades litoestratigráficas alrededores al PAM Excelsior	60
Figura 5.26. Concentración de metales y aniones lixiviables por la prueba Shake Flask de las unidades litoestratigráficas alrededores al PAM Quiulacocha	61
Figura 5.27. Concentración de metales y aniones lixiviables por la prueba Shake Flask de las unidades litoestratigráficas alrededores al PAM Quiulacocha	62
Figura 5.28. Concentración de metales de las extracciones secuenciales por la prueba de Tessier del depósito aluvial alrededores al CP Champamarca.....	63
Figura 5.29. Concentración de metales de las extracciones secuenciales por la prueba de Tessier de los depósitos cuaternarios alrededores al PAM Quiulacocha.....	63
Figura 5.30. Concentración de metales de las extracciones secuenciales por la prueba de Tessier de los depósitos antropogénicos-residuos mineros alrededores a los PAM Excelsior y Quiulacocha.....	64
Figura 5.31. Composición mineralógica por DRX del Grupo Cabanillas y depósito aluvial alrededores al PAM Excelsior	65
Figura 5.32. Composición mineralógica por petromineraografía del Grupo Cabanillas alrededores al PAM Excelsior.....	65
Figura 5.33. Composición mineralógica por petromineraografía del diatrema del CV Cerro de Pasco alrededores al PAM Excelsior	66
Figura 5.34. Composición mineralógica por petromineraografía del diatrema del Grupo Cabanillas alrededores al CP Quiulacocha.....	66
Figura 5.35. Composición mineralógica por petromineraografía del Grupo Mitu alrededores al CP Quiulacocha.....	67

Figura 5.36. Composición mineralógica por DRX de los depósitos glaciar y glaciar-fluvial aledaño al CP Quiulacocha	68
Figura 5.37. Composición mineralógica por DRX de los depósitos antropogénicos-residuos mineros aledaños a los CP Champamarca y Quiulacocha.....	68
Figura 6.1. Interpretación de fotografías aéreas de 1962 del ámbito de los PAM Excelsior y Quiulacocha.....	69
Figura 6.2. Concentraciones promedio de metales de los materiales de los PAM Excelsior y Quiulacocha.....	72
Figura 6.3. Comparación de concentraciones de metales entre las unidades litológicas y el material de los PAM Excelsior y Quiulacocha.....	73
Figura 6.4. Distribución de concentraciones de hierro, calcio, plomo y manganeso en las unidades litológicas del área de estudio	74
Figura 6.5. Distribución de concentraciones de zinc, cobre y arsénico en las unidades litológicas del área de estudio.....	75
Figura 6.6. Comparación del potencial para generar drenaje ácido de las unidades litológicas y los PAM Excelsior y Quiulacocha.....	76
Figura 6.7. Comparación del potencial para lixiviar iones de las unidades litológicas, comparados con el material de los PAM Excelsior y Quiulacocha	77

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

PAM	: Pasivo ambiental minero
EPT	: Elemento potencialmente tóxico
DAR	: Drenaje ácido de roca
DAM	: Drenaje ácido de mina
ABA	: Balance ácido-base
SFE	: <i>Shake flask extraction</i>

RESUMEN

Los centros poblados Champamarca y Quiulacocha ubicados cerca de los PAM Excelsior y Quiulacocha denunciaron impactos ambientales en suelos y aguas debido a lixiviación de restos de residuos mineros.

El estudio contempló el mapeo de campo, la descripción litológica y muestreo de rocas para ensayos de laboratorio de metales totales, potencial de generación de acidez (prueba ABA), lixiviación de metales (Shake Flask) y análisis mineralógico (DRX y petrominerografía), con los cuales se determinó los valores de fondo geoquímico para cada unidad litológica.

La zona de estudio presenta unidades litológicas entre el periodo Devónico al Cuaternario, como los Grupos Cabanillas y Mitu, Formación Pocobamba-Miembro Shuco, Centro volcánico Cerro de Pasco y depósitos cuaternarios, cuya sedimentación o actividad magmática fueron controlados por estructuras regionales pre Cenozoicas como las fallas Cerro de Pasco o Longitudinal (FL) y del Río San Juan - Venenococha (FRSJV); de estas unidades, las mayores concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT), mayor potencial de generación de drenaje ácido de roca (DAR) y de lixiviación fueron registrados en las cuarcitas del Grupo Cabanillas y en el diatrema de Centro volcánico Cerro de Pasco cercanos al Tajo Raúl Rojas influenciado a la actividad hidrotermal, y en los depósitos antropogénicos – residuos mineros; mientras que el Grupo Mitu y Formación Pocobamba presentaron menores concentraciones de EPT; por otra parte, los depósitos aluviales del sector Champamarca y depósitos glacial y fluvioglacial aledaño al CP Quiulacocha reportaron altas concentraciones de zinc, heredado de la erosión de las zonas mineralizadas, sin embargo, presentan bajo potencial para generar DAR y lixiviación de EPT.

Palabras clave: PAM, EPT, metales, drenaje ácido, lixiviación.

ABSTRACT

The village of Champamarca and Quiulacocha located near the Excelsior and Quiulacocha PAM reported environmental impacts on soils and waters due to leaching of mining waste residues.

The study included field mapping, lithological description, and rock sampling for laboratory tests such as elemental composition (total metals), acid generation potential (ABA test), metal leaching (Shake Flask), and mineralogical analysis (DRX and petrographic analysis), with which the geochemical background values for each lithological unit.

The study area presents lithological units from the Devonian to the Quaternary periods, such as the Cabanillas and Mitu Groups, Pocobamba Formation-Shuco Member, Cerro de Pasco Volcanic Center, and Quaternary deposits, whose sedimentation or magmatic activity were controlled by pre-Cenozoic regional structures like the Longitudinal (FL) and Río San Juan - Venenococha (FRSJV) faults; of these units, the highest concentrations of potentially toxic elements (EPT), greater potential for acid rock drainage (DAR) generation, and leaching were recorded in the quartzites of the Cabanillas Group and in the diatreme of the Cerro de Pasco Volcanic Center near the Raúl Rojas Pit influenced by hydrothermal activity, and antropogenic deposits; whereas the Mitu Group and Pocobamba Formation, which showed lower concentrations of EPT; on the other hand, the alluvial deposits of the Champamarca sector and the glacial and fluvio-glacial deposits adjacent to the Quiulacocha CP reported high concentrations of zinc, inherited from the erosion of mineralized zones, however, they present low potential for DAR generation and leaching of PTE.

Keywords: PAM, EPT, metals, acid drainage, leaching.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1. Introducción

Los trabajos científicos actuales de la geoquímica han permitido conocer la naturaleza tectónica y magmática de las rocas intrusivas y volcánicas presentes en la mina Cerro de Pasco, sin embargo, no se conoce detalladamente los valores de línea de base geoquímico de las unidades litológicas en zonas aledañas a la mina y a los PAM. Por otra parte, el cuidado del medio ambiente en el marco de la legislación peruana, abarca el estudio de la calidad del agua, sedimento, suelo y componentes biológicos, sin embargo, no presenta protocolos de análisis de la fuente de estos elementos metálicos y no metálicos adheridos a las rocas con los que interactúan en el proceso (litogeoquímica ambiental).

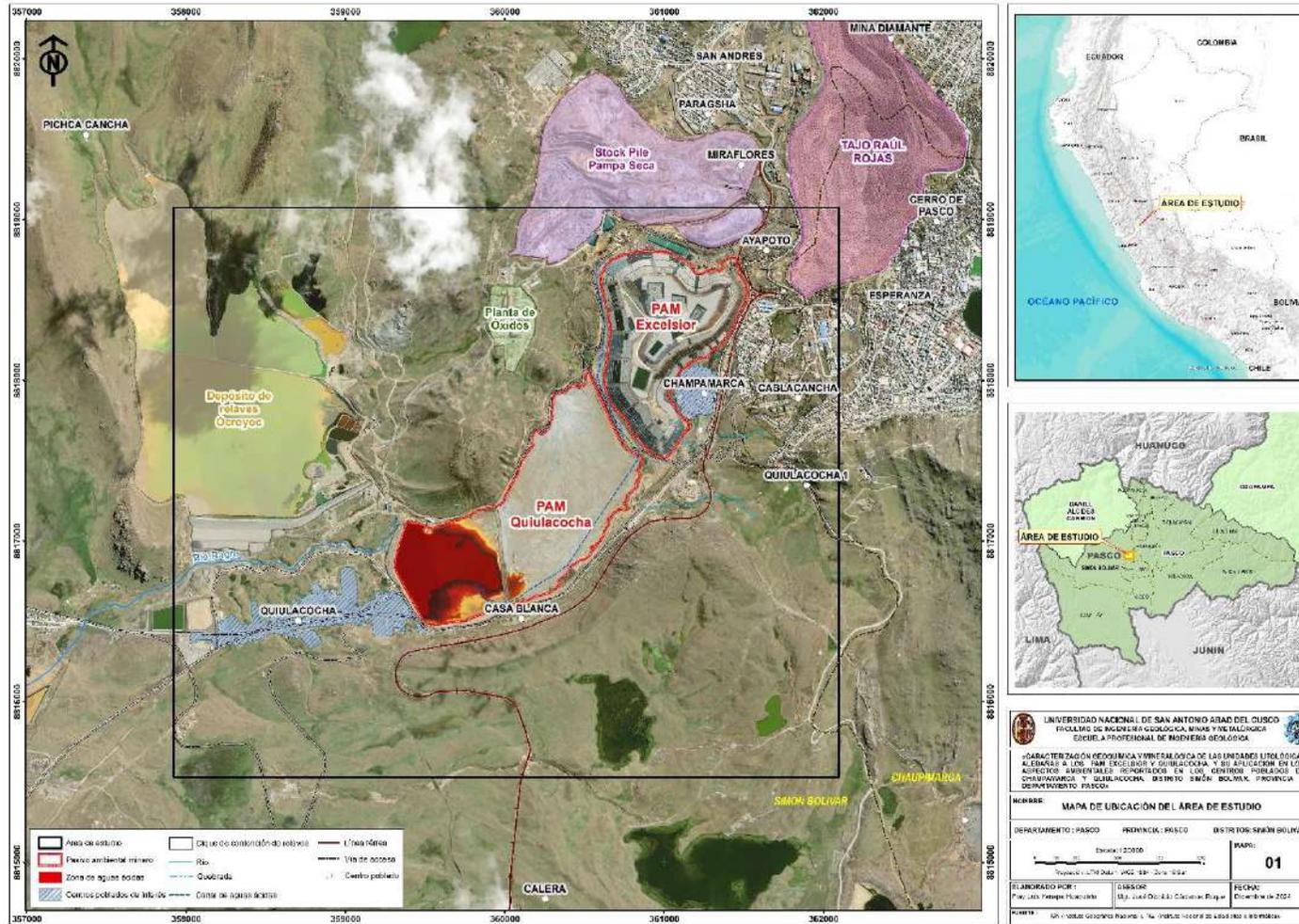
El interés por el conocimiento geológico asociado al cuidado del ambiente en zonas aledañas a la unidad minera Cerro de Pasco (en adelante, UM Cerro de Pasco) y Pasivos Ambientales Mineros (en adelante, PAM) Excelsior y Quiulacocha, hace necesario conocer el *background* geoquímico y mineralógico de afloramientos rocosos y depósitos cuaternarios en el ámbito de los centros poblados Champamarca y Quiulacocha, para lo cual es necesario caracterizar la composición química y mineralógica, movilidad de elementos (lixiviación) y probabilidad de generación de drenaje ácido de cada unidad.

1.2. Área de estudio

1.2.1. Ubicación

El área de estudio se localiza políticamente en el distrito Simón Bolívar, en la provincia y departamento Pasco, y abarca las zonas aledañas a los centros poblados de Champamarca y Quiulacocha, ubicados cerca de los PAM Excelsior y Quiulacocha (Figura 1.1).

Figura 1.1.
Mapa de ubicación del área de estudio

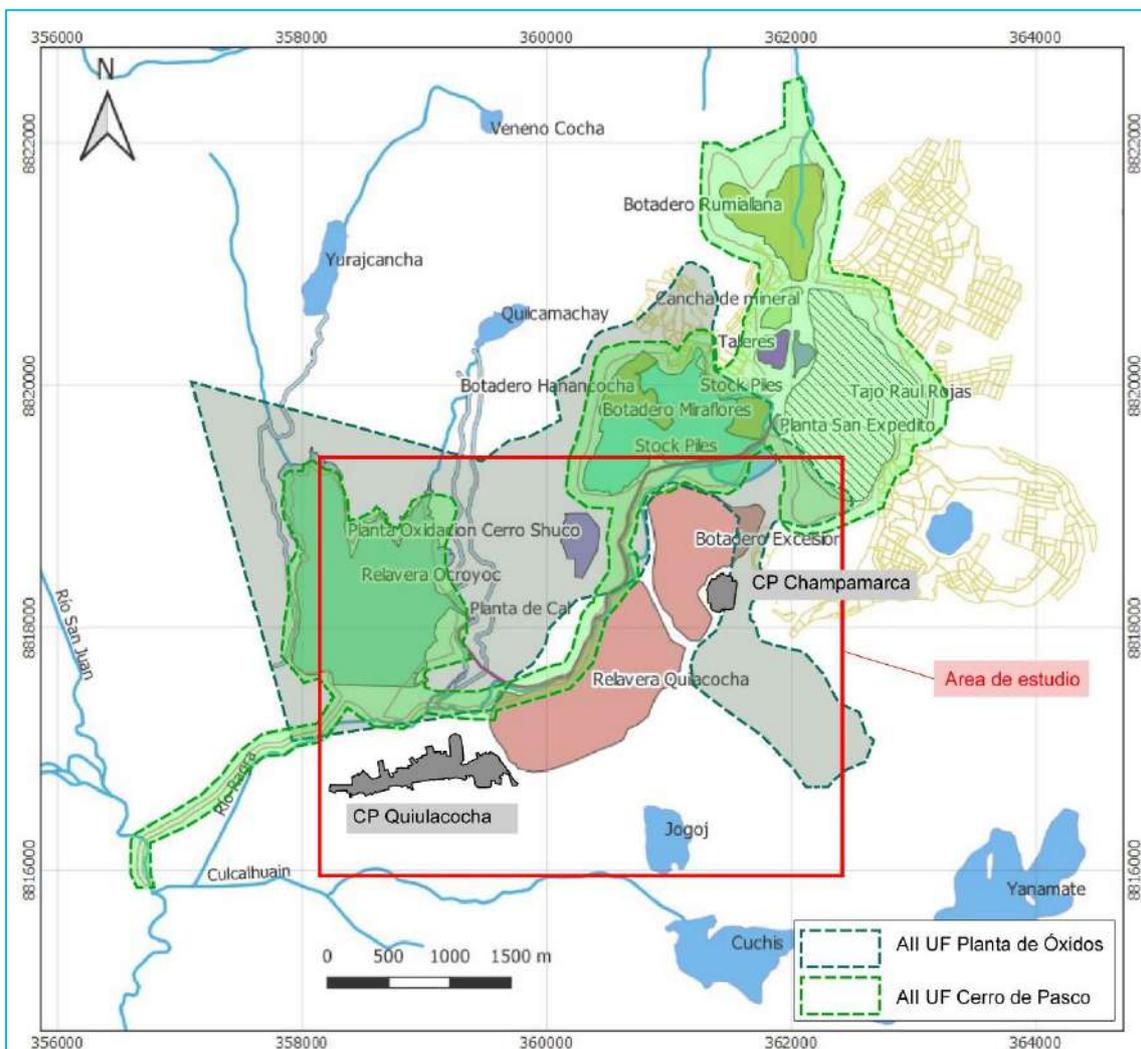


Fuente: Elaboración propia

En la parte este, norte y noreste del área de estudio se desarrollan actividades de extracción y procesamiento de minerales a cargo de las unidades fiscalizables Cerro de Pasco (Empresa Administradora Cerro S.A.C.) y Planta de óxidos (Óxidos de Pasco S.A.C), ambas empresas subsidiarias de Volcan Compañía Minera S.A.A (OEFA, 2020c y OEFA, 2020 d); así como, pasivos ambientales mineros (Excelsior y Quiulacocha), cuyo cierre está a cargo de Activos Mineros S.A.C. (OEFA, 2020a, OEFA, 2020b), ver Figura 1.2.

Figura 1.2.

Ubicación de los componentes mineros aledaños al área de estudio, a cargo de las unidades fiscalizables Cerro de Pasco y Planta de óxidos



Fuente: Modificado de OEFA (2020a) y OEFA (2020b)

Hidrológicamente se ubica en la parte alta y media de la microcuenca del río Ragra (antigua microcuenca Quiulacocha) que es tributario del río San Juan.

Desde el punto de vista geológico se encuentra en el límite norte de la Altiplanicies interandinas que separan la cordillera Occidental de la Cordillera Oriental, donde se registraron varios dominios tectoestratigráficos y numerosas minas polimetálicas como Cerro de Pasco, Colquijirca, Quicay y otros (Rodríguez et al., 2011).

Geomorfológicamente, en el boletín del cuadrángulo de Cerro de Pasco (Rodríguez *et al.*, 2011) diferenciaron 5 unidades morfológicas, de los cuales, el área de estudio abarca la planicie del lago Junín (pendientes de cerros y lomas suaves y redondeadas), valles interandinos (valles juveniles en forma de «V» con laderas inclinadas, y pueden llegar a formar cañones con laderas subverticales) y borde Oeste de la Cordillera Oriental (valles glaciares en forma de «U» con dirección casi NEE-SOO; en el fondo de los valles se encuentran lagunas morrénicas y ríos anastomosados de poca pendiente, que forman parte de la cuenca hidrográfica del lago Junín).

1.2.2. Accesibilidad

El acceso a la zona de estudio desde la ciudad de Lima se realiza por dos rutas, vía terrestre: la primera, por la Carretera Central hacia la Oroya, luego se desvía en el kilómetro 296+200 por las carreteras 22 (ciudad Junín y poblado Carhuamayo) y 3N (centro poblado Shelby); la segunda, es por las carreteras 20A (poblados Canta y Huayllay) y 3N (centro poblado Shelby).

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Planteamiento del problema

2.1.1. Descripción del problema

La actividad minera en Cerro de Pasco se remonta a la época precolombina, cuando los incas explotaban las minas de cobre de la zona; sin embargo, fue durante la época colonial que se intensificó la actividad minera, ya que los españoles encontraron importantes yacimientos de plata en la región. Es este periodo se desarrollaba de forma subterránea. Esta forma de aprovechamiento del recurso minero continuó hasta la década de 1956, cuando comenzó en Cerro de Pasco la explotación minera a cielo abierto con la apertura de tajo Raúl Rojas. Desde entonces, este tipo de extracción se ha convertido en una actividad importante en este lugar y en otras regiones mineras del Perú (OEFA, 2023).

A lo largo de los años, distintas empresas han operado en la microcuenca del río Ragra, por lo cual han dejado pasivos ambientales que se encuentran en cierre o remediación, como el caso del depósito de desmontes Excelsior (alto contenido de hierro, zinc y plomo). No obstante, también existen otros pasivos que, si bien están identificados —como el depósito de relaves Quiulacocha (alto contenido de zinc, plomo, cobre y arsénico)—, no cuentan con un plan de cierre o remediación definitivo. De igual forma, hay otros tipos de residuos, como desmontes de mina, que han sido incorporados en el inventario de pasivos mineros del Ministerio de Energía y Minas (OEFA, 2023).

Los PAM Excelsior y Quiulacocha presentan materiales de desmonte y relaves con alto contenido de sulfuros y en consecuencia altas concentraciones de metales pesados, potencial de generación de acidez y capacidad de lixiviar metales (OEFA, 2023). Las filtraciones identificadas en el PAM Excelsior por la DEAM en 2020 son captados y canalizados hacia el PAM Quiulacocha, recargando de esta forma el agua de sobrenadante acumulado. La urbanización de los centros poblados Champamarca y Quiulacocha cercanos a estos PAM han sido actores sociales activos con denuncias de

contaminación referidos a influencia de aguas ácidas (filtraciones) en las fuentes de agua como el río Ragra; y por dispersión atmosférica de partículas hacia el suelo donde se establecieron las viviendas.

Frente a estas denuncias se carece de información sobre el *background* geoquímico de las rocas y depósitos cuaternarios aledaños a los centros poblados mencionados, que permitan estimar estadísticamente los índices de contaminación real, ya sea en suelo o aguas superficiales o subterráneas.

2.1.2. Formulación del problema

¿Cuáles son las características geoquímicas y mineralógicas de las unidades litológicas aledañas a los PAM Excelsior y Quiulacocha?, para su aplicación en los aspectos ambientales reportados en los centros poblados de Champamarca y Quiulacocha.

2.2. Justificación de la investigación

El conocimiento del fondo geoquímico natural de las unidades litológicas permitirá determinar la influencia *real* de las actividades antropogénicas –por minería– en los centros poblados Champamarca y Quiulacocha. Los estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo o agua son referencias internacionales de salud, sin embargo, aledaño a yacimientos mineros ya existen condiciones anómalas –en el aspecto ambiental– con elevadas concentraciones de EPT que superan los valores de los ECA, por lo que el conocimiento de la concentración elemental de las unidades litológicas expuestas a las actividades poblacionales determinará el grado de contaminación del suelo o agua en base al nivel natural existente. En consecuencia, se podrá identificar y determinar la contaminación por actividad minera, disposición de residuos domésticos u otras fuentes.

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo general

Determinar las características geoquímicas y mineralógicas de las unidades litológicas aledañas a los PAM Excélsior y Quiulacocha, y explicar su aplicación en los aspectos ambientales reportados en los centros poblados de Champamarca y Quiulacocha, distrito Simón Bolívar, provincia y departamento Pasco.

2.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la distribución espacial y describir las características petrológicas de las unidades litológicas Formación Cabanillas, Grupo Mitu, Formación Pocobamba, Centro volcánico Cerro de Pasco y depósitos cuaternarios.
- Determinar las características geoquímicas y mineralógicas de las unidades litológicas definidas.
- Determinar el potencial de generación de drenaje ácido de roca de cada unidad definida.
- Determinar la disponibilidad geoquímica los elementos de preocupación de las unidades litológicas, y aplicación de índices estadísticos relacionados a matrices ambientales.

2.4. Hipótesis

La composición geoquímica y mineralógica de las unidades litológicas del área de estudio, dependen del grado de influencia de Falla regional Cerro de Pasco y del magmatismo del centro volcánico Cerro de Pasco responsable de la mineralización de la zona; por tanto las rocas del Grupo Cabanillas y del diatrema del C.V. Cerro de Pasco cercanos a estas estructuras presentan concentraciones anómalas de elementos potencialmente tóxicos (EPT) y mayor potencial para generar drenaje ácido de roca (DAR) y de lixiviación de metales, a diferencia de las unidades como el Grupo Mitu¹,

¹ El Grupo Mitu mantiene composición elemental y mineralógica dominada por el aporte de clastos metamórficos antiguos, con posible bajo potencial para generar DAR.

Formación Pocobamba – Miembro Shuco² y depósitos cuaternarios donde tuvieron menor influencia geoquímica con EPT disponibles.

2.5. Variables

Las variables corresponden a las *características geoquímicas y mineralógicas de las unidades litológicas*; y a los *aspectos ambientales* derivados como la concentración metálica, potencial de generación de DAR, lixiviación y biodisponibilidad de EPT de las unidades, aledaños a los centros poblados Champamarca y Quiulacocha.

2.6. Tipo de investigación

El tipo de investigación de este trabajo es aplicada, a nivel descriptivo, relacional, y explicativo, basado en un diseño observacional (no experimental).

² Formación Pocobamba compuesto por clastos de calizas presenta elevadas concentraciones de calcio y alto potencial de neutralización de acidez.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes de estudios geológicos y geoquímicos

3.1.1. Contexto geológico regional

Los primeros estudios geológicos –de carácter regional– fueron realizados por (Cobbing et al., 1996), quienes establecen al Grupo Excelsior de edad Siluro-Devónica como basamento, compuesto por pizarras y filitas intercaladas con cuarcitas de grano fino y algunas capas de calizas. En el Pérmico superior, el control estructural de la falla Cerro de Pasco (con hundimiento del bloque este) restringió los afloramientos del Grupo Mitu en el bloque oeste, ya que solo se registraron 4 m de lavas andesíticas, los cuales yacen sobre las filitas del Grupo Excelsior. Durante el Triásico continuó la depositación sinsedimentaria controlado por la falla Cerro de Pasco, por lo que en el lado este de la falla se registró calizas masivas de la Formación Chambará de hasta 3152 m de espesor total, a diferencia del lado oeste donde solamente alcanzó 674 m de espesor (Jenks, 1951).

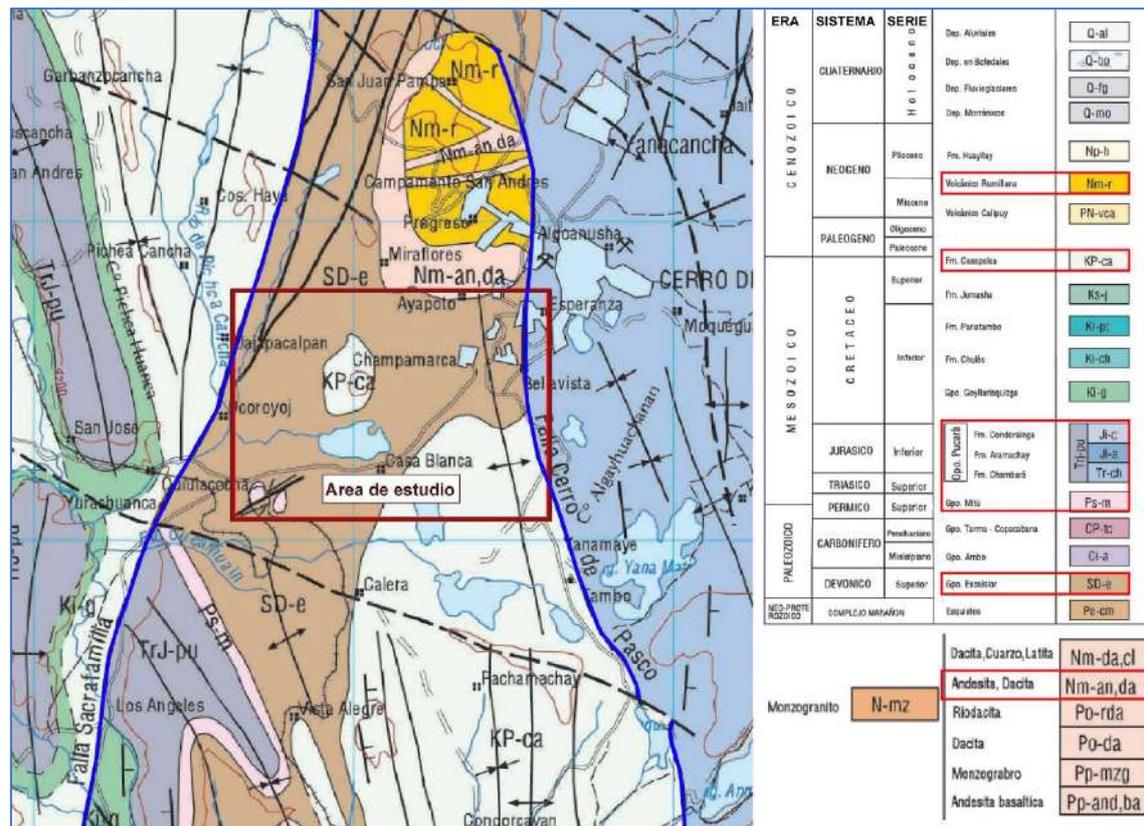
A finales del Cretácico hasta el Paleoceno se depositaron las capas rojas de la Formación Casapalca, que en Cerro de Pasco alcanzan hasta 1000 m de espesor; al sur de Cerro de Pasco aflora el miembro Shuco de esta formación, el cual está compuesto por conglomerados compuesto por clastos de calizas, cuarcitas, chert, areniscas rojas y filitas, englobada en una matriz calcárea y de brechas; alcanzando entre 150 a 200 m de espesor, los cuales están plegadas con ejes de dirección norte a sur. Hacia el norte del PAM Excelsior se describió aglomerados de la Formación Rumillana el cual está asociado al cuello volcánico del yacimiento de Cerro de Pasco, que varía hacia el oeste a tobas blancas con fina estratificación que no muestra evidencia de deformación, constituido por cuarzo feldespato con variable cantidad de biotita, hornblenda, epidota y calcita como material cementante (Álvarez, 1996).

Respecto a los intrusivos, las dataciones realizadas en 4 muestras de monzonita indican edad Miocena, entre 14 y 15 Ma (Silverman y Noble, 1977). Este evento emplazó intrusivos de composición andesítico-dacítico variando a monzonitas que cortan a los aglomerados Rumillana ubicado en Paragsha (lado oeste del tajo Cerro de Pasco), el origen de estos pulsos se asocia a un vulcanismo explosivo relacionado a un modelo de diatrema (Silberman y Noble, 1977) o caldera de profundidad intermedia (Rogers, 1983).

La Figura 3.1 muestra la disposición de las unidades geológicas y condiciones estructurales regionales del área de estudio propuestos en 1996.

Figura 3.1.

Mapa geológico regional a escala 1:100 000 del área de estudio y zonas aledañas



Fuente. Mapa geológico del cuadrángulo de Cerro de Paso a escala 1:100 000, realizado por Quispesivana (1996).

La actualización de la geología del cuadrángulo de Cerro de Pasco a escala 1:50 000 (Rodríguez et al., 2011) describe un basamento metamórfico, compuesto por lutitas pizarrosas negras con intercalaciones de areniscas cuarzosas, denominado Formación Cabanillas de edad Devónica (McLaughlin, 1924). Sobre esta unidad, al

Oeste del Colquijirca (al sur de la zona de estudio) yacen discordantemente las areniscas rojas y conglomerados del Grupo Mitu de edad Pérmico superior a Triásico inferior. Al Oeste de la falla Cerro de Pasco predomina la Formación Chambará, de edad Triásico superior, el cual está compuesto por dolomitas y calizas wackestone a mudstone, con niveles fosilíferos de crinoideos, bivalvos, gasterópodos, ostrácodos y braquiópodos.

La depositación sedimentaria del Paleógeno es denominada como Formación Pocobamba, de edad Eoceno inferior, y subdividida en dos miembros: Cacuán y Shuco (Ángeles, 1999). En los alrededores de Cerro de Pasco predominan las secuencias del Miembro Shuco, los cuales está compuestos por conglomerados y brechas sedimentarias con escasos lentes de limolitas y areniscas; la mayor parte de los clastos son de caliza y sílex de la Formación Chambará.

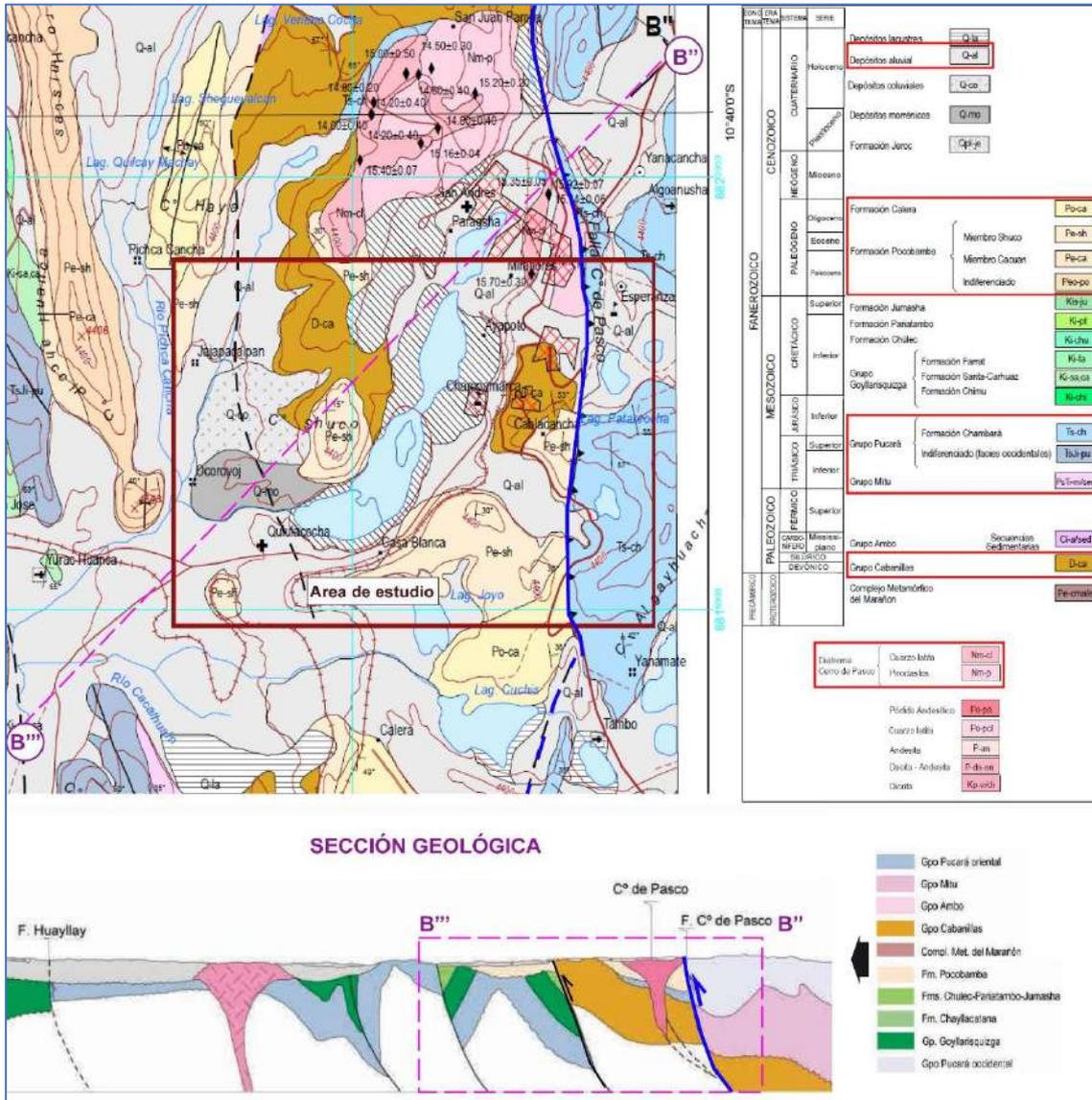
La actividad magmática alrededor de la zona de estudio está representada por el Complejo Volcánico Cerro de Pasco de edad Mioceno inferior, que consiste en domos de dacita y riolita y diatremas emplazados mediante la falla Cerro de Pasco. Esta estructura volcánica se encuentra cortada por un complejo de diques de cuarzo-latita porfírica de dirección E-O, y que pueden llegar a cortar las rocas sedimentarias más antiguas que se encuentran en los alrededores (Ward, 1961).

En cuanto a los depósitos Cuaternarios, en la zona de estudio se cartografiaron depósitos morrénicos (bloques y gravas en matriz arenolimoso, pobremente clasificada), coluviales (bloques heterométricos subangulosos con matriz arenolimoso) y aluviales (gravas, arenas y limos con clastos subredondeados), que yacen discordante a las unidades predecesoras.

La Figura 3.2 muestra la disposición de las unidades geológicas y condiciones estructurales regionales del área de estudio actualizados en 2010.

Figura 3.2.

Mapa geológico regional a escala 1:50 000 del área de estudio y zonas aledañas



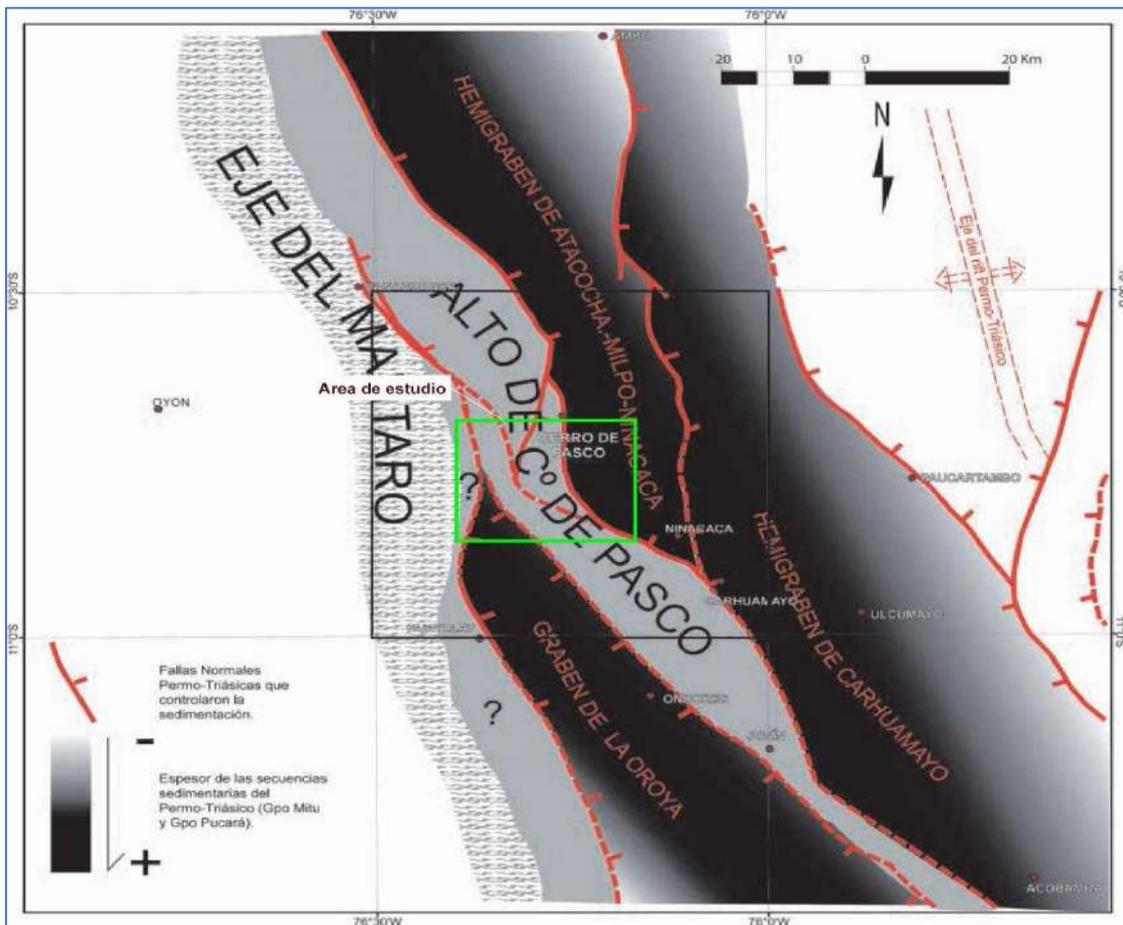
Fuente: Mapa geológico del cuadrángulo de Cerro de Pasco a escala 1:50 000, realizado por Rodríguez (2010).

El contexto estructural regional de Cerro de Pasco estuvo formado por Grabens y Horst (Figura 3.3). Durante el Pérmico al Cretácico inferior, las fallas regionales Huallay, Tarma, Cerro de Pasco, Atacocha-Milpo-Ninacaca y Tlacayan tuvieron el movimiento normal. El cambio de régimen tectónico extensional a compresional se dio en el Cretácico superior (Megard, 1978) debido al cambio de la dirección de esfuerzos que provocó que las fallas tengan movimiento inversos y transcurrentes. En el Eoceno

el movimiento de fallas regionales provocó que los grabens Permocretácicos se inviertan, lo que dio origen a cuencas sedimentarias de las formaciones Pocobamba y Calera (Rodríguez et al., 2011).

Figura 3.3.

Grabens y horst activos durante el Pérmico al Cretácico en el cuadrángulo de cerro de Pasco



Fuente. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, v. 107 (Rodríguez et al., 2013).

3.1.2. Contexto geológico local

Según Rottier et al. (2016) el centro magmático Cerro de Pasco se emplazó al oeste de la falla de alto ángulo (Falla Cerro de Pasco), intruyendo a lutitas metamorfizadas del Grupo Excelsior del Paleozoico medio, y a conglomerados polimícticos y areniscas del Grupo Mitu del Triásico Medio-Tardío (Spikings et al., 2016). Al este de la falla Longitudinal hay una secuencia gruesa (alrededor de 1000 m) de rocas carbonatadas masivas, principalmente calizas con intercalaciones localmente arenosas,

calizas bituminosas negras y lechos con nódulos de pedernal pertenecientes a la Formación Chambará del Triásico Tardío (Rottier et al., 2016).

El centro magmático de Cerro de Pasco consiste en un gran complejo diatrema-domo de 2,5 km de diámetro, que se formó por una sucesión de eventos freatomagmáticos y magmáticos (Einaudi, 1968; Rogers, 1983; Baumgartner et al., 2009). Una fase temprana de actividad explosiva produjo una diatrema-brecha conocida localmente como aglomerado de Rumiallana, que es la litología más común en el complejo magmático, datado en $15,36 \pm 0,03$ Ma (datación U-Pb ID-TIMS de circón; Baumgartner et al., 2009). La actividad freatomagmática fue seguida por el emplazamiento a $15,40 \pm 0,07$ Ma (circón U-Pb ID-TIMS; Baumgartner et al., 2009) de complejos de domo de lava dacítico a riodacítico a lo largo del margen occidental de la diatrema. Los diques de pórfido de cuarzo-monzonita con tendencia este-oeste cortan la brecha diatrema y los domos magmáticos. Estos diques no se propagan hacia las lutitas Excelsior al oeste del complejo diatrema-domo; hacia el este cruzan localmente la secuencia carbonatada. Dos de estos diques han sido datados en $15,35 \pm 0,05$ y $15,16 \pm 0,04$ Ma (circón U-Pb ID-TIMS; Baumgartner et al., 2009). El final de la actividad freatomagmática y magmática en Cerro de Pasco está marcado por el emplazamiento de numerosos diques de brechas fluidizadas de matriz fresada, de 20 cm a 3 m de ancho, con tendencia este a oeste, que se encuentran en varias partes del complejo diatrema-domo (Rottier et al., 2016).

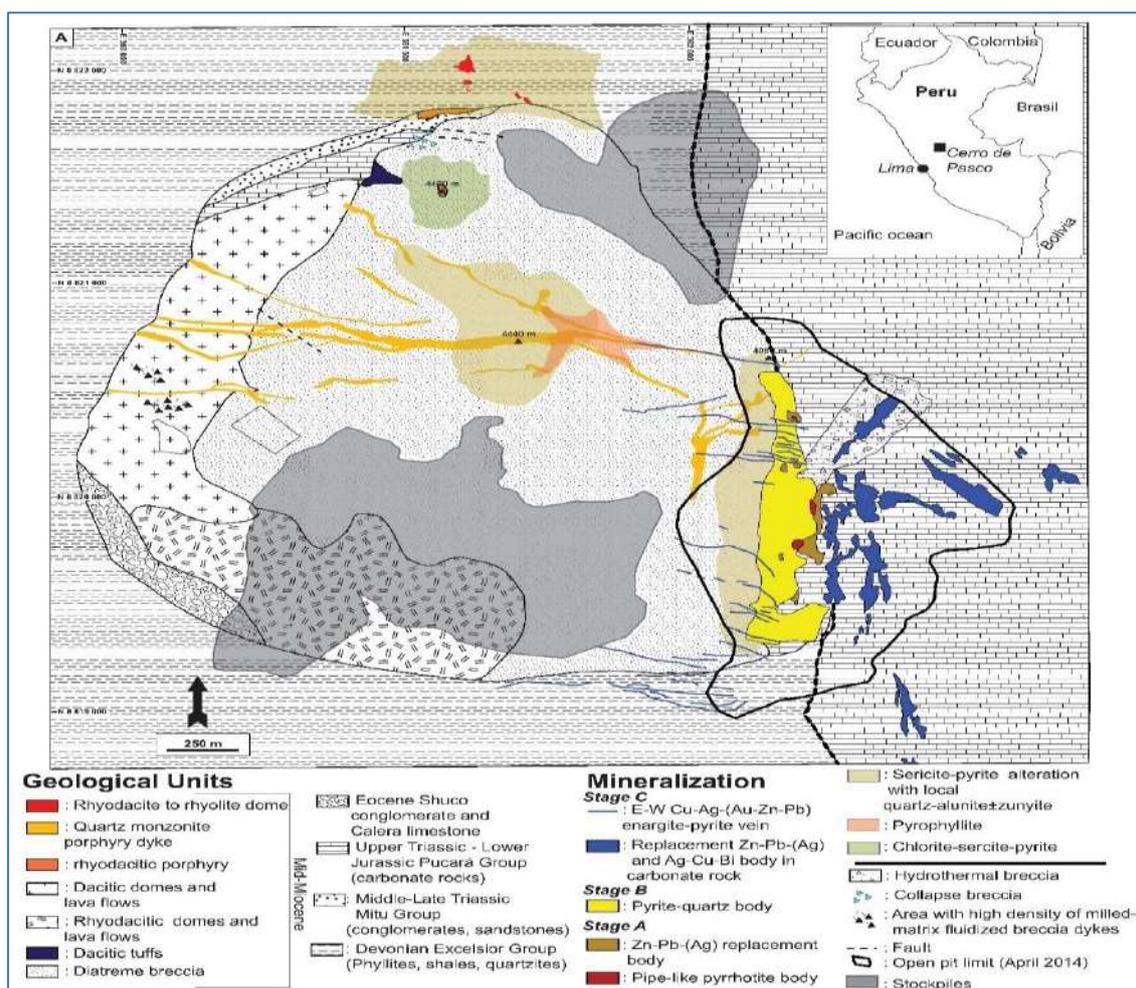
Rottier et al. (2016) describió que, después de este evento, tuvo lugar una mineralización epitermal de metales base, principalmente en rocas carbonatadas a lo largo del margen oriental del complejo magmático (Einaudi, 1977; Baumgartner et al., 2009). Una característica sorprendente de la mineralización de Cerro de Pasco es la aparición de un cuerpo masivo de pirita y cuarzo con forma de embudo, de 1,5 km de largo, 250 m de ancho y más de 550 m de profundidad, que reemplazó principalmente rocas carbonatadas del Grupo Pucará, y subordinadamente, el propio complejo de

diatrema-domo (Graton y Bowditch, 1936; Lacy, 1949; Ward, 1961; Einaudi, 1968, 1977; Baumgartner, 2007; Baumgartner et al., 2008). Además, Rottier et al. (2016) identificó etapas de mineralización que consisten en tubos de pirrotita con bordes polimetálicos (etapa A), seguido de emplazamiento de pirita-cuarzo (etapa B), y consecuentemente una mineralización de alta sulfuración (etapa C) con Cu-Ag-(Au-Zn-Pb) en venillas de pirita-energita con tendencia E-O alojadas en la brecha-diatrema, y cuerpos mineralizados bien zonificados de Zn-Pb-(Bi-Ag-Cu) en la parte oriental del depósito.

La Figura 3.4 muestra la disposición de las unidades geológicas del complejo de diatrema y domo, y los diferentes estilos de mineralización epitermal en Cerro de Pasco.

Figura 3.4.

Mapa geológico del complejo de diatrema-domo y diferentes estilos de mineralización epitermal en Cerro de Pasco



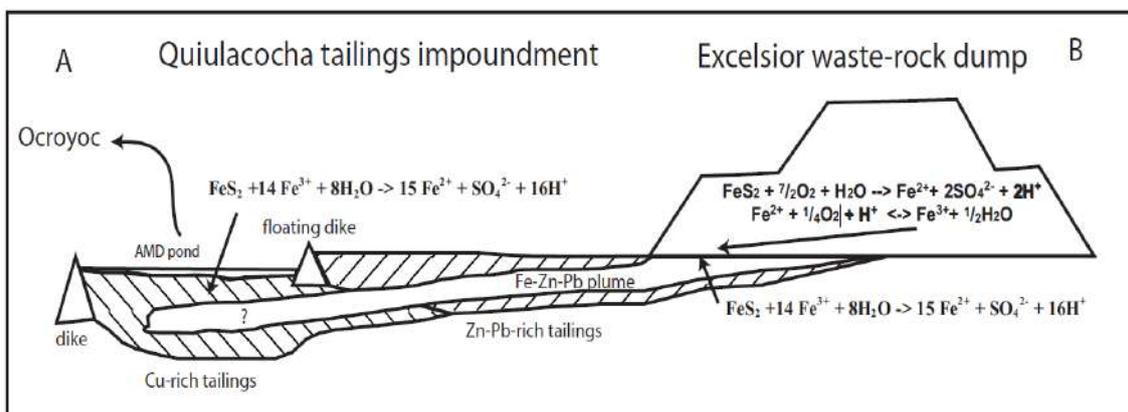
Fuente. Rottier et al. (2016), compilado a partir de observaciones de campo y trabajos previos de Rogers (1983), Baumgartner et al. (2008), y el personal geológico del Volcán.

3.1.3. Contexto geoquímico de los PAM Excelsior y Quiulacocha

Wade et al. (2006) realizaron la caracterización geoquímica y mineralógica del depósito de relaves Quiulacocha basado en 88 muestras sólidas de relave³ y 11 muestras de agua⁴. En Quiulacocha reconocen dos tipos diferentes de relaves, relaves ricos en zinc y plomo (anterior al dique flotante), y relaves ricos en cobre (posterior al dique flotante); la parte del relave rico en zinc y plomo no produce excesos importantes de drenaje ácido de mina (DAM) debido a la neutralización por efecto de los carbonatos subyacentes (dolomita y siderita); sin embargo, los lixiviados del PAM Excelsior infiltraron en el relave formando una columna de hierro, zinc y plomo; por otra parte, la canalización de los flujos superficiales a la laguna Quiulacocha incrementaron la oxidación de los relaves ricos en cobre y promovió la liberación de arsénico de la enargita, arsenopirita y tennantita (Figura 3.5).

Figura 3.5.

Perfil esquemático de la relación de generación de drenaje ácido y metales entre el botadero de desmonte Excelsior y depósito de relaves Quiulacocha



Nota. Wade et al. (2006).

Smuda et al. (2007) realizaron un estudio geoquímico y mineralógico en el botadero de desmontes Excelsior, con la finalidad de caracterizar el mineral secundario, el drenaje ácido de mina producido y crear un modelo de transporte de elementos desde

³ El muestreo de relaves se realizó a diferentes niveles mediante la perforación en 4 ubicaciones (CPQ/A, CPQ/B, CPQ/C, CPQ/D) que alcanzaron hasta 26 m de profundidad (que atravesaron el espesor del relave) y se realizaron análisis mineralógico por microscopía óptica, DRX y SEM-EDS, análisis elemental mediante XRF

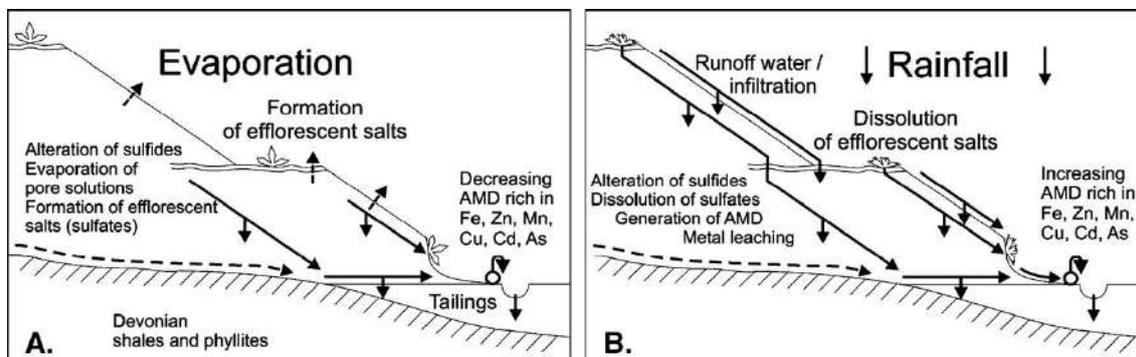
⁴ El contenido elemental se determinó mediante ICP-MS, y cationes y aniones principales por cromatografía iónica.

este material. Los minerales principales del yacimiento polimetálico (Pb-Zn, Ag-Bi-Cu) de Cerro de Pasco fueron pirita, esfalerita, galena y enargita, y en menor porcentaje de tennantita, covelita y cerusita, y la ganga estaba compuesto por cuarzo, hematita, siderita y moscovita. El material del PAM Excelsior tenía alto potencial para generar drenaje ácido, alcanzando 2,8 unidades de pH; los minerales secundarios dominantes fueron el yeso y diferentes tipos de jarosita y variedad de sulfatos de hierro (melanterita y rozenita), y menos frecuentemente contiene hidróxidos de hierro III (schwertmannita y fibroferrita), sulfatos de magnesio, manganeso y zinc (starkeyita, mallardita y goslarita). La pirita proviene de yacimiento mineral y de las rocas volcánicas y tiene una alta tasa de oxidación, de liberar ácidos y hierro III.

Asimismo, precisaron que, en la época seca se observó que la alta evaporación produjo precipitación de eflorescencia de sales con metales (yeso secundario, hidróxidos de hierro III y otros sulfatos) en la superficie del material de desmonte; y en la época húmeda, el agua de lluvia disolvió las sales precipitadas haciendo que se infiltran y transporten ácidos y elementos móviles al interior del desmonte, reaccionando con minerales primarios y lixiviando metales pesados como hierro, manganeso, zinc, cobre y cadmio, además de, calcio y magnesio y sulfatos; el arsénico fue retardado sólo parcialmente en el sistema por adsorción en hidróxidos de Fe (III). La mayoría de los de metales pesados precipitados a partir de sulfuros durante la estación seca parecieron disolverse durante la estación húmeda y abandonaron el material de desmonte Excelsior como drenaje ácido, como afloramientos e infiltración hacia el depósito de relaves Quilacocha (Figura 3.6).

Figura 3.6.

Modelo de efectos climáticos sobre la formación y disolución de sales eflorescentes y movilidad de soluciones ácidas ricas en metales en el botadero Excelsior. A, época seca y B, época húmeda



Fuente. Smuda et al. (2007).

3.1.4. Otros estudios de referencia

Kusin et al. (2018) realizó el estudio de “Distribución de metales pesados y metaloides en sedimentos superficiales de una zona intensamente explotada de mineral de bauxita en Pengerang (Malasia) y evaluación de riesgos asociados”, demostrando riesgo ecológico medio en los sedimentos contaminados con metales como Cd, As y Pb tiene generalmente un mayor riesgo en comparación con otros metales, y es el que más contribuye al índice de riesgo total (RI). El factor de enriquecimiento de sedimentos (EF) indicó que no había enriquecimiento de la mayoría de los metales, mientras que el Pb y el As en algunos lugares se clasificaron como de enriquecimiento menor y de moderado a severo. El índice de geoacumulación (Igeo) y el factor de contaminación (CF) indicaron que los sedimentos se clasificaron como no contaminados con respecto a la mayoría de los metales.

La Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI, 2022), en el manual de metodologías geoquímicas de países Iberoamericanos, menciona que: si el diagnóstico ambiental se realiza en un área minera, además de la legislación, se trata de un área anómala en ciertos elementos químicos removilizados y probablemente incrementados sus contenidos debido a la actividad minera; en este caso, se debe tener en cuenta el informe e interpretación previo de exploración y

evaluación del recurso (si lo hubiera) para comprender mejor qué contaminación será relevante. El estudio debe incluir la evaluación de las áreas de desechos mineros (en términos de contenidos de elementos químicos y volumen) y también tener un área “blanca” para comparar con los contenidos de fondo regionales, que preferiblemente deben estar en el mismo ambiente geológico, pero no perturbadas por la actividad minera.

Los estudios publicados por Ingemmet en los últimos 4 años (2020 a 2024) sobre geoquímica ambiental se basaron en la composición elemental de los suelos superficiales y profundos a nivel regional (cuencas o zonas) con aplicación de análisis estadístico dentro del Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) para conocer los contenidos totales de los principales elementos traza (Cu, Mo, Pb, Zn, Cd, Co, V, Ni, Cr, Au, Ag, Hg, As y Sb, etc.) presentes en los suelos del valle del río Mantaro (Vargas, et al., 2022) y subcuenca Linga (Fernández y Cereceda, 2021). No obstante, los objetivos de estos estudios no incluyeron el análisis de potencial de generación de drenaje ácido, lixiviación o biodisponibilidad de metales de los suelos.

3.2. Antecedentes de aspectos ambientales

Desde el 2004, AMSAC, la empresa encargada de implementar el cierre, ha negociado el reaprovechamiento de pasivos y realizó estudios para mitigar los daños por los residuos mineros de la actividad minera anteriores a la adjudicación de Volcan en 1999. En el CP Champamarca, con el apoyo de la municipalidad distrital de Simón Bolívar, se instalaron geomallas verticales para evitar el material particulado de la desmontera Excelsior (Ramírez, 2019).

En noviembre del 2002, el Centro de Cultura Popular Labor, en coordinación con el Instituto Nacional de Salud Ocupacional y el Instituto Nacional de Protección del Medio Ambiente para la Salud realizaron tomas de muestra en cuatro poblaciones de la provincia de Pasco, en la cual Champamarca resultó siendo la localidad con el mayor

porcentaje de personas menores de dieciocho años con niveles elevados de plomo en sangre (Ramírez, 2019).

Entre setiembre del 2005, se realiza un estudio en Quiulacocha y Champamarca que abarcó una muestra de 236 niños entre 1 y 10 años. En Quiulacocha, se demostró que el 89% de los niños tenía niveles de plomo por encima del estándar (10 ug/dL) y en Champamarca, la prevalencia fue de 82.8 % (Ramírez, 2019, tomado de Labor, 2006b).

En el 2012, las autoridades de Champamarca y Quiulacocha en conjunto con autoridades locales demandaron la declaración de emergencia ambiental para sus localidades, para tomar medidas de mitigación, cierre de pasivos ambientales y atención a los afectados por metales pesados (Ramírez, 2019).

Por otra Parte, el OEFA recibió mediante el Servicio de Información Nacional de Denuncias Ambientales - Sinada⁵ varias denuncias ambientales en el 2011 y del 2018 a 2020, refiriendo riesgo a la salud por contaminación por metales pesados producto de las actividades de la empresa Cerro de Pasco, actividades de cierre del PAM Excelsior y otras fuentes relacionadas a las actividades mineras (Tabla 3.1).

Tabla 3.1.

Denuncias ambientales registradas en el Sinada en el periodo 2011 al 2020

Año	Fecha de denuncia	Supuesto impacto	Supuesta fuente
2011	08 de marzo (SC-0124-2011)	- Daños al recurso hídrico de Cerro de Pasco - Impacto por vibraciones y contaminación sonora	Actividades mineras de Cerro de Pasco
	25 de marzo (SC-0171-2011)	- Impacto a la laguna Quiulacocha - Impacto al río San Juan Contaminación ambiental ocasionada por altas concentraciones de metales pesados, con riesgo la salud de la población	Actividades mineras de la empresa denunciada
	29 de abril (SC-0259-2011)	- Riesgo la salud de la población, se encuentran más de 200 niños intoxicados. - Incremento de las aguas ácidas en la relavera Quiulacocha	Incumplimiento del Plan de Cierre por parte de la empresa denunciada
	30 de mayo (SC-0322-2011)	Riesgo de la salud de la población	Desechos de minerales que emiten al ambiente por las empresas denunciadas

⁵ El Servicio de Información Nacional de Denuncias Ambientales (Sinada) es un servicio del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) que permite a la población informar y alertar al Estado sobre cualquier daño que se produzca al ambiente. [Servicio de Información Nacional y Denuncias Ambientales – OEFA](#)

Año	Fecha de denuncia	Supuesto impacto	Supuesta fuente
2018	26 de junio (ODPA-0007-2018)	- Afectación a la población de Quiulacocha, Champamarca y Buenos Aires. -Afectación de las conexiones hídricas subterráneas por la remoción de material minero. - Se ha intensificado los malestares estomacales en la población escolar	Emisión de material particulado por obras de cierre de la desmontera Excélsior, a cargo de AMSAC
	10 de julio (SC-0544-2018)	Impedimento de la remediación conjunta de los depósitos Excélsior y Quiulacocha	El titular de "El Metalurgista" no ha cumplido con presentar un plan reaprovechamiento o plan de cierre de relaves mineros de Quiulacocha
2019	25 de junio (SC-0709-2019)	Daño de las áreas agrícolas y ocasionando muerte de animales	Emisión de polvo generado por el inadecuado mantenimiento de la carretera Montecarlos - Yanamate en el tramo ubicado en la comunidad campesina de Quiulacocha
2020	16 de enero (SC-0225-2020)	Contaminación del río San Juan, por coloración amarilla y de carácter ácido	Pasivos mineros de CENTROMINPERU y minera VOLCAN
	31 agosto (SC-1292-2020)	Afectación de terrenos pastizales y manantiales de Quiulacocha, y a la ganadería	Trabajos de cierre realizados por AMSAC

Fuente: Sinada <https://sistemas.oefa.gob.pe/consulta-inaps/publico/buscadorSinada#>

En atención a las denuncias ambientales y los acuerdos en las mesas de diálogo, el OEFA realizó en 2020 cuatro Evaluaciones Ambientales de Causalidad (EAC) en Cerro de Pasco sobre las actividades a cargo de Volcan y AMSAC⁶.

Asimismo, posterior a los estudios realizados, el Sinada recibió 7 denuncias ambientales en 2021, 7 denuncias en 2022, 5 denuncias en 2023 y 8 denuncias en 2024, relacionados a presuntas afectaciones al río San Juan, río Ragra, y otros cuerpos de agua, con presunta responsabilidad de la empresa Cerro S.A.C. y subsidiarias.

3.3. Bases teóricas

Pasivo Ambiental Minero (PAM)

Según la ley N.º 28271, Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera (promulgada el 18/02/2004), los PAM corresponden en aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones

⁶ Evaluaciones ambientales realizadas por el OEFA en Cerro de Pasco en 2020:

- EAC en el PAM depósito de desmontes Excelsior a cargo de Activos Mineros S.A.C (OEFA, 2020a).
- EAC en el PAM depósito de relaves Quiulacocha a cargo de Activos Mineros S.A.C (OEFA, 2020b).
- EAC en el ámbito de los stocks piles y depósito de relaves Ocroyoc de la unidad fiscalizable Planta de Óxidos (OEFA, 2020c).
- EAC en el ámbito del depósito de desmonte Rumiallana, Miraflores, Stock Piles, tajo Raúl y polvorín, de la unidad fiscalizable Cerro de Pasco (OEFA, 2020d).

mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad.

Caracterización geoquímica y mineralógica

La caracterización geoquímica y mineralógica consiste en determinar las propiedades de un material (rocosos o inconsolidados) para la predecir el potencial de drenaje ácido o neutro con contenidos de EPT. Las técnicas para la caracterización se basan en reconocimiento de campo (descripción modal), identificación petrográfica y mineralógica y análisis elemental, test de laboratorio estáticos (ABA, NAG, SPLP, TCLP, extracciones secuenciales, etc.) y cinéticos (celdas de humedad, columnas, soxhlet, etc.) (Sernageomin, 2015).

Elementos potencialmente tóxicos (EPT)

Son un conjunto de metales pesados y metaloides (As, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb y Zn, entre otros), que se presentan en suelos con concentraciones inferiores a 1% (10000 ppm). Las actividades mineras e industriales incrementan las concentraciones disponibles tanto en suelo y agua. Estas formas químicas afectan de forma severa las condiciones ambientales y son riesgo para la salud (Masciandaro et al., 2013; Pourret y Hursthouse, 2019).

Indicadores de contaminación por EPT

Los indicadores son: Índice de Abundancia Geoquímica (GAI)⁷, Factor de enriquecimiento (FE)⁸ y CÓDIGO RAC (Risk Assessment Code, Perin et al.,1985)⁹.

⁷ Indicador relativo que compara la concentración total de los EPT's, con la concentración del mismo EPT's en un material de referencia indicado por el International Network for Acid Prevention (INAP, 2017).

⁸ El factor de enriquecimiento (FE) es la concentración relativa de un elemento en un suelo (Tecnosol) comparado con el de la roca, en relación a un componente o elemento que permanece constante en el proceso de transformación roca-suelo, por lo que se considera de referencia. Los FE se obtienen normalizando las concentraciones de los EPT's a un elemento conservativo (Schütz y Rahn,1982).

⁹ Indicador que compara fracciones del EPT disponible en relación con la concentración total del mismo EPT (Perin et al.,1985).

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE EJECUCIÓN

A continuación, se presenta la metodología empleada en la caracterización geoquímica y mineralógica de las unidades litológicas ubicadas aledaños los PAM Excelsior y Quiulacocha; que fue desarrollado en las etapas de precampo, campo y poscampo.

4.1. Etapa de precampo (gabinete): revisión de información y planificación

En la etapa de precampo se realizó la recolección, revisión, evaluación y clasificación de información referente al tema de estudio, como publicaciones nacionales e internacionales boletines, informes, tesis, expedientes técnicos, reseñas históricas, planos, imágenes satelitales, etc., elaborado por entidades públicas o privadas.

4.2. Etapa de campo

En la etapa de campo se realizó la descripción *in situ* de unidades litológicas dentro del área de estudio, muestreo de rocas y envíos para ensayos de laboratorio.

4.2.1. Guías de referencia

La descripción de unidades litológicas (mapeo geológico) y actividades de muestro se realizaron siguiendo las pautas indicadas en las guías y manuales descritas en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1.

Guías y manuales de referencia utilizados para la descripción y muestreo de unidades litológicas aledaños a los PAM Excelsior y Quiulacocha

Documento	Referencia		
	Autor	País	Año
<u>Caracterización geológica</u>			
Manual de estándares de cartografía para la digitalización de los mapas geológicos CGN a escala 1:100 000	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (Ingemmet)	Perú	2016
<i>Basic Geological Mapping</i>	Richard J. Lisle, Peter Brabham, y John Barnes	Reino Unido	2011
<i>Geological field techniques</i>	Angela L. Coe, Tom W. Argles, David A. Rothery y Robert A. Spicer	Reino Unido	2010

FGDC <i>Digital Cartographic Standard for Geological Map Symbolization</i>	Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, en inglés <i>United States Geological Survey</i>)	Estados Unidos	2006
<i>Geological Structures and Maps</i>	Richard J. Lisle	Reino Unido	2004
Estándares cartográficos y de manejo de información gráfica para mapas geológicos	Servicio Geológico Colombiano (Ingeominas)	Colombia	2001
<u>Muestreo de rocas</u>			
Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras	Sernageomin	Chile	2015
Manual de inventario de recursos minerales	Ingemmet	Perú	2013
Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials	CANMET- Mining and Mineral Sciences Laboratories	Canadá	2009
Manual de muestreo para exploración, minería subterránea y rajo abierto	Angel Lambert B.	Chile	2006
Introducción al muestreo minero	Marco Antonio Alfaro Sironvalle	Chile	2002

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Ubicación de puntos de caracterización litológica y muestreo de roca

La descripción litológica y mineralógica modal se realizó en cada unidad litológica con base al reconocimiento geológico, posteriormente se realizó a la recolección de muestra de roca (fresca o material cuaternario) para análisis de laboratorio.

La recolección de muestras se realizó según lo descrito en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2.

Parámetros de muestreo considerados en el trabajo de investigación

Parámetro de muestreo	Descripción
Origen de la muestra	Afloramiento rocoso o depósito cuaternario
Método de muestreo	Esquirla o canal
Tipo de muestreo	Aleatorio y puntual
Control de calidad	Duplicados de campo

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.3 presenta las coordenadas de los puntos donde se realizó la caracterización y el muestreo de roca.

Tabla 4.3.

Ubicación de los puntos de caracterización litológica y muestreo de rocas aledaños a los PAM Excelsior y Quiulacochoa

N.º	Código de punto	Coordenadas UTM WGS84 – Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
		Este (m)	Norte (m)		
1	CG-EXC1 ^b (RC-CG-EXC1 ^a)	361371	8818788	4319	Ubicado en el borde norte del depósito de desmonte Excelsior, aproximadamente a 150 m al noreste de la subestación de Cerro S.A.C.
2	CG-EXC2 ^b (RC-CG-EXC2 ^a)	361553	8818583	4314	Ubicado en el borde noreste del depósito de desmonte Excelsio, aproximadamente a 150 m al noroeste del hospital EsSalud nivel II Pasco
3	CG-EXC3 ^b (RC-CG-EXC3 ^a)	361501	8818465	4311	Ubicado en el borde este del depósito de desmonte Excelsio, aproximadamente a 130 m al oeste del hospital EsSalud nivel II Pasco
4	CG-EXC4 ^b	361365	8818202	4305	Ubicado en el borde este del depósito de desmonte Excelsior, aproximadamente a 140 m al norte del A.H. Champamarca
5	CG-EXC5 ^b (RC-CG-EXC5 ^a)	361298	8818042	4308	Ubicado en la margen izquierda del canal Champamarca, aproximadamente a 20 m al noroeste del puesto de salud Champamarca
6	CG-EXC6 ^b	361110	8817949	4311	Ubicado en la margen izquierda del canal Champamarca, aproximadamente a 40 m al suroeste del centro educativo 34037 del A.H. Champamarca
7	CG-EXC7 ^b (RC-CG-EXC7 ^a)	361173	8817607	4305	Ubicado en la margen izquierda del canal Champamarca, aproximadamente a 190 m al sur del A.H. Champamarca
8	CG-EXC8 ^b (RC-CG-EXC8 ^a)	361260	8817689	4300	Ubicado en la margen izquierda del canal Champamarca, aproximadamente a 100 m al sur del A.H. Champamarca
9	CG-EXC9 ^b (RC-CG-EXC9 ^a)	361250	8817466	4310	Ubicado en la margen izquierda del canal Champamarca, aproximadamente a 80 m al norte de la Planta de cátodos de Cerro S.A.C.
10	CG-EXC10 ^b (RC-CG-EXC10 ^a)	361360	8817556	4324	Ubicado en la margen izquierda del canal Champamarca, aproximadamente a 220 m al noreste de la Planta de cátodos de Cerro S.A.C.
11	CG-EXC11 ^b	360789	8818845	4288	Ubicado en el borde norte del depósito de desmonte Excelsior, aproximadamente a 130 m al noreste de la garita de control de Activos Mineros S.A.C.
12	CG-EXC12 ^b (RC-CG-EXC12 ^a)	361531	8817483	4343	Ubicado en la carretera hacia la comunidad campesina Quiulacochoa 01, aproximadamente a 150 m al oeste del club El Golf de Cerro de Pasco
13	CG-EXC13 ^b (RC-CG-EXC13 ^a)	361993	8817203	4353	Ubicado aproximadamente a 100 m al sureste de la comunidad campesina Quiulacochoa 01
14	CG-QUI0 ^b	360839	8817265	4288	Ubicado en el borde este del PAM depósito de relaves Quiulacochoa, aproximadamente a 140 m al norte del grifo Piedras Gordas
15	CG-QUI1 (RC-CG-QUI1 ^a)	359145	8816333	4286	Ubicado al sur del centro poblado Quiulacochoa, aproximadamente a 330 m al este del cementerio Quiulacochoa
16	CG-QUI2 ^b (RC-CG-QUI2 ^a)	359511	8816397	4276	Ubicado en el bordesur del PAM depósito de relaves Quiulacochoa, aproximadamente a 70 m al sur del dique enrocado Quiulacochoa
17	CG-QUI3 ^b (RC-CG-QUI3 ^a)	360499	8817990	4280	Ubicado en el borde norte del PAM depósito de relaves Quiulacochoa,

N.º	Código de punto	Coordenadas UTM WGS84 – Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
		Este (m)	Norte (m)		
					aproximadamente a 150 m al suroeste del piezómetro HG-04 de Activos Mineros S.A.C.
18	CG-QUI4 ^b (RC-CG-QUI4 ^a)	360636	8816893	4294	Ubicado en el borde este del PAM depósito de relaves Quiulacocho, aproximadamente a 280 m al suroeste del grifo Piedras Gordas
19	CG-QUI5 ^b (RC-CG-QUI5 ^a)	359050	8816838	4266	Ubicado al norte del centro poblado Quiulacocho, aproximadamente a 10 m al noreste del estadio Quiulacocho
20	CG-QUI6 ^b (RC-CG-QUI6 ^a)	359053	8816908	4255	Ubicado en la margen izquierda del río Ragra, aproximadamente a 190 m al oeste del dique enrocado Quiulacocho
21	CG-QUI7 ^b (RC-CG-QUI7 ^a)	358530	8816196	4281	Ubicado al sur del centro poblado Quiulacocho, aproximadamente a 200 m al sureste del centro educativo Nido de Amor
22	CG-QUI8 ^b (RC-CG-QUI8 ^a)	358675	8816134	4293	Ubicado al sur del centro poblado Quiulacocho, aproximadamente a 270 m al suroeste del cementerio Quiulacocho
23	CG-QUI9 ^a	359759	8817208	4296	Ubicado en la margen derecha del canal Ragra, aproximadamente a 240 m de la estación de recirculación de Activos Mineros S.A.C.
24	ROxP-11 ^a	357944	8817262	4324	Ubicado a 150 m aproximadamente al noroeste del dique de contención del depósito de relaves Ocroyoc
25	ROxP-12 ^a	359787	8817592	4426	ubicado a aproximadamente 900 metros del estribo izquierdo del depósito de relaves Ocroyoc
26	ROxP-13 ^a	360294	8817956	4289	Ubicado a aproximadamente 250 metros al sureste de la Planta de Oxidación Cerro Shuco.
27	RM-EXC0 ^a	361265	8817656	4310	Ubicado en la margen izquierda del canal Champamarca, aproximadamente a 140 m al sur del A.H. Champamarca y al costado de Av. El Minero
28	RM-EXC1 ^a	360789	8818845	4288	Ubicado en el borde norte del depósito de desmonte Excélsior, aproximadamente a 130 m al noreste de la garita de control de Activos Mineros S.A.C.
29	RM-EXC2 ^a	361014	8817508	4284	Ubicado en el borde sur del depósito de desmonte Excélsior, aproximadamente a 90 m al suroeste de la zona de parqueo de Activos Mineros S.A.C.
30	RM-EXC3 ^a	361119	8817608	4295	Ubicado en la margen izquierda del canal Champamarca, aproximadamente a 50 m al norte de la zona de parqueo de Activos Mineros S.A.C.
31	RM-QUI1 ^a	360366	8816692	4278	Ubicado en el borde sureste del depósito de relaves, aproximadamente a 270 m al noreste del centro poblado Casa Blanca
32	RM-QUI2 ^a	359249	8816967	4253	Ubicado en la margen izquierda del río Ragra, aproximadamente a 15 m al oeste de la poza de recolección de filtraciones del depósito de relaves Quiulacocho

Fuente. Elaboración propia

- La precisión de la medición de las coordenadas fue de ± 3 m

(a): Código de la muestra de roca tomado para los ensayos de laboratorio

(b): Punto de caracterización geológica sin muestra de roca, no se realizó ensayos de laboratorio

4.2.3. Ensayos de laboratorio

El estudio consideró el análisis elemental (metales totales) y test estáticos como la prueba ABA, pruebas de lixiviación (*shake flask* metales y aniones) y extracciones secuenciales; además, se determinó la composición mineralógica por los métodos de petrominerografía y Difracción de Rayos X (DRX). Ver Tabla 4.4.

Tabla 4.4.

Parámetros y métodos de análisis de laboratorio de las muestras de roca de las unidades litológicas

N.º	Parámetro	Unidad	Método de análisis
1	Metales totales y mercurio	mg/kg PS	EPA Method 3050B Rev.2 (1996) / EPA Method 6020B Rev.2 (2014) VAL
	Azufre total	%	ASTM E1915-97. Azufre Total por Combustion mediante horno Leco y espectroscopia infrarroja
2	Grado de Efervescencia	-	Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials - MEND Report 1.20.1, Chapter 13, Item 13.3.3, December 2009
Test ABA	pH en Pasta	Unidades pH	
	Potencial de Acidez Máximo	t CaCO ₃ /1000t	
	Potencial de Neutralización Neto	t CaCO ₃ /1000 t	
	Potencial de Neutralización Relación NP/MPA	-	
3	<i>Shake Flask</i> metales	mg/L	Extracto SFE Leaching & drainage (1997) /EPA METHOD 6020 B Rev02, 2014
4	<i>Shake Flask</i> aniones	mg/L	Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials - MEND Report 1.20.1, Chapter 11.5, Shake Flask Test
5	Tessier	mg/kg	EPA 6020 B Rev. 2. July 2014
6	Análisis mineralógico por microscopía óptica (petrominerografía)	%	NA
7	Análisis mineralógico por DRX	%	NA

Fuente: Elaboración propia

(PS): Peso seco; (NA): No aplica; (-): Sin unidad

4.2.4. Equipos y materiales

Los equipos y materiales que se usaron en la etapa de campo se listan en la siguiente tabla.

Tabla 4.5.

Equipos y materiales considerados en la tesis de investigación

Nombre	Marca	Modelo
<u>Equipos</u>		
GPS	Garmin	Montana 600
Cámara fotográfica	Canon	Powershot D30BL
Brújula	Brunton	---
Lupa 20x	Iwamoto	Acromático
<u>Materiales</u>		

Nombre	Marca	Modelo
Picota	Stwing	---
Comba	Stwing	---
Lápiz marcador con punta de carburo tungsteno	---	---
Protractor multiescala	---	---
Ácido clorhídrico al 10%	---	---
Bolsas de muestreo	Polietileno	9*14'
Libreta de campo	Rite in the Rine	N.º 310F

Fuente: Elaboración propia; (---): Sin marca o modelo

Las descripciones litológicas (tipo de roca e identificación de minerales primarios, secundarios y accesorios) de afloramientos rocosos y depósitos cuaternarios realizados *in situ* fueron sistematizados en una base de datos; los datos de rumbo y buzamiento de estratos, fallas geológicas, fracturas y otros, fueron plasmados sobre un mapa topográfico a escala 1:10 000.

4.3. Etapa poscampo (gabinete): interpretación de resultados

En esta etapa se consolidó la información recopilada en campo, se dió conformidad a los informes de laboratorio y se analizaron los resultados de las muestras de rocas de las diferentes unidades litológicas.

4.3.1. Control de calidad

El control de calidad de los resultados de metales totales en roca se realizó mediante la muestra duplicada¹⁰. La cantidad de muestras duplicadas considerada fue el 10 % del total de muestras; siendo en total 27 muestras de roca, se consideró 4 muestras duplicadas, para metales totales.

El porcentaje de diferencia relativa (PDR) se calculó usando la ecuación 1:

$$PDR = \frac{\mu_i - STD_i}{STD_i} \times 100 \quad (1)$$

Dónde: μ_i = valor medio del elemento *i* en el estándar de varias corridas analíticas

STD_i = Valor conocido de la referencia

¹⁰ Se trata de una sola muestra dividida en 2 muestras, tomadas al mismo tiempo y en el mismo lugar. Esta muestra asegura la precisión de los resultados.

El PDR considerado en este estudio fue de < 60%, lo cual asegura una variabilidad adecuada para muestras duplicadas de campo (*Canadian Council of Ministers of the Environment-CCME*, 2016a; Ministerio del Ambiente-Minam, 2021). Los resultados del control de calidad basado en el PDR de muestras duplicadas y originales se presentan en el anexo C.

4.3.2. Procesamiento de datos

Los puntos de caracterización geológica y el mapa de campo fueron georreferenciados y digitalizados en el software ArcGIS 10.8, con lo que se elaboró el mapa geológico local. Los resultados de laboratorio fueron sistematizados en Excel para realizar cálculos, comparaciones y diagramas, posteriormente los gráficos fueron editados en adobe Illustrator.

4.3.3. Criterios de análisis

En general, el análisis de resultados se realizó en función a cada unidad litológica identificada aledaños a los PAM Excelsior y Quiulacochoa¹¹.

Los resultados de metales totales fueron analizados en diagramas de concentración y dispersión clasificándolos en elementos mayores y trazas (con énfasis en los EPT), además, fueron comparados referencialmente con los resultados geoquímicos del material del botadero Excelsior y relaves de Quiulacochoa, para establecer el fondo geoquímico natural y diferenciarlo de los aportes por la actividad antrópica.

Los resultados de la prueba ABA se utilizaron para determinar el potencial de generación de drenaje ácido basado en los criterios de Potencial de neutralización neto (PNN) y Ratio Potencial de Neutralización (RPN). Los resultados de Shake Flask y tessier fueron analizados en diagramas de concentración y dispersión.

¹¹ En cada unidad litológica se describió las características petrológicas (modal), composición mineralógica (DRX), composición elemental (metales totales), potencial de generación de acidez (ABA), capacidad de lixiviación de metales y aniones (*shake flask*) y la biodisponibilidad de metales.

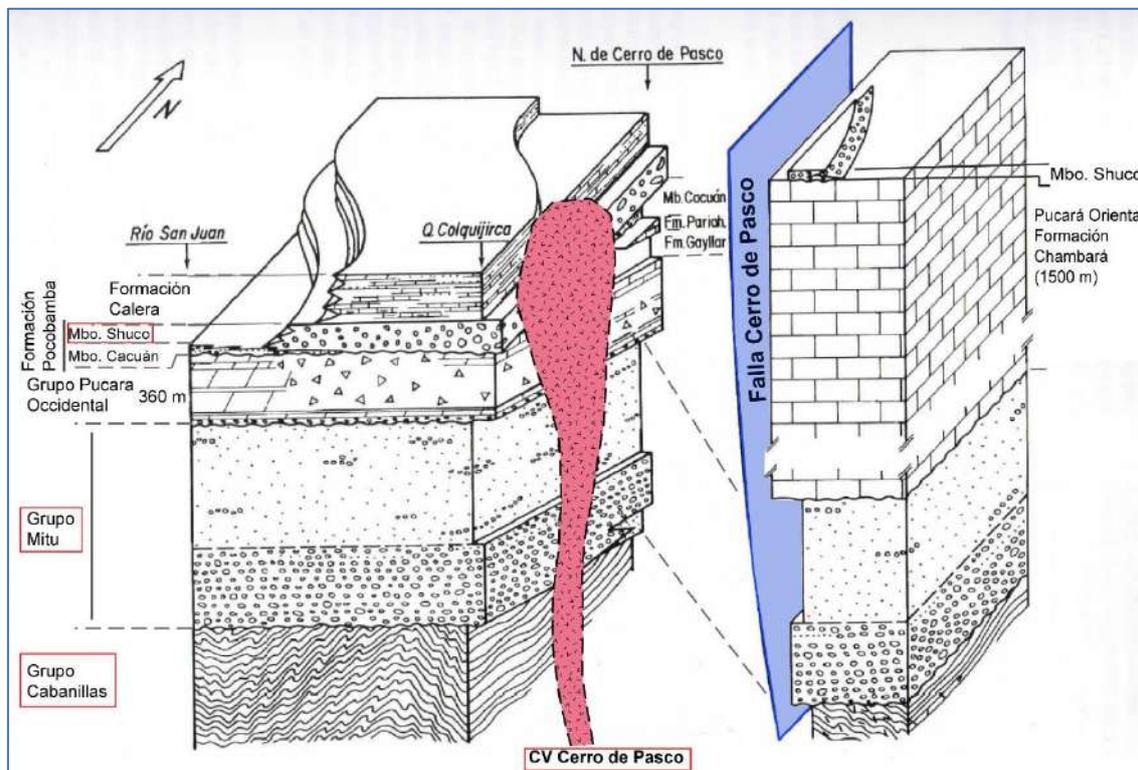
CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1. Contexto geológico local

En la zona de estudio se identificó unidades litoestratigráficas desde el Paleozoico al Cenozoico. La unidad más antigua corresponde al Grupo Cabanillas de edad Devónico, cubierto en ligera discordancia por el Grupo Mitu de edad Permotriásico; posteriormente, se depositaron los sedimentos continentales del Cenozoico de las formaciones Pocobamba y Calera de edad Paleoceno – Eoceno y oligoceno; luego, en el Mioceno se emplazó el complejo volcánico Cerro de Pasco compuesto por el domo de dacita y la diatrema controlado por la falla principal Longitudinal (FL). Finalmente, en discordancia a las unidades mencionadas se depositaron depósitos cuaternarios glacial, fluvial-glacial, aluvial y fluvial; y producto de la actividad minera se presentan depósitos antropogénicos de materiales de desmote y relaves (Figura 5.1 y Figura 5.2).

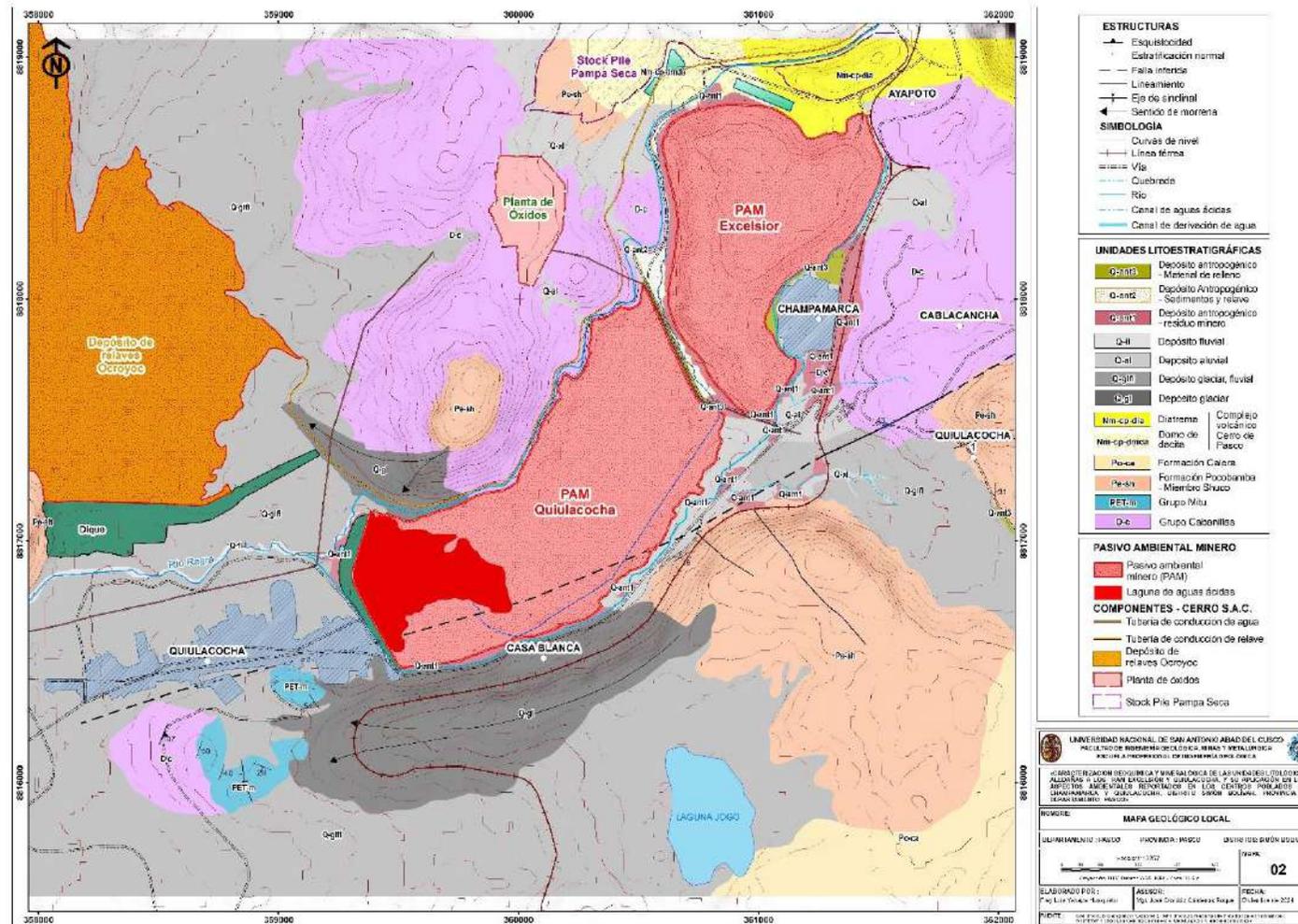
Figura 5.1.

Unidades litoestratigráficas de la región Cerro de Pasco y Colquijirca



Fuente. Modificado de Ángeles (1999).

Figura 5.2.
Mapa geológico local del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

5.1.1. Unidades litoestratigráficas

5.1.1.1. Grupo Cabanillas¹²

Las rocas del Grupo Cabanillas afloran en los sectores de Cablacancha, Ayapoto, Planta de Óxidos de la Empresa Administradora Cerro S.A.C. (en adelante, Cerro S.A.C.), y en la zona sur del C.P. Quiulacocha, adicionalmente se infiere que estas rocas predominan en la base de los PAM Excelsior y Quiulacocha. En cuanto a la relación litoestratigráfica, los bordes este y oeste de los PAM se encuentra cubierto por conglomerados Eocenos de la Formación Pocobamba-Miembro Shuco mediante un contacto discordante; en el borde norte fue cortado por eventos volcánicos efusivos del Complejo volcánico Cerro de Pasco; mientras que aledaño al C.P. Quiulacocha infrayace a los conglomerados del Grupo Mitu.

El Grupo Cabanillas se encuentra compuesto por pizarras grises, filitas, areniscas, esquistos grises, lutitas negras pizarrosas y abundantes venillas de cuarzo.

En el sector Ayapoto (punto CG-EXC2) afloran niveles de cuarcitas fracturadas e intemperizadas, con mineralización de pirita diseminada, venillas con óxidos y pátinas de sulfatos de cobre (Figura 5.3); la mineralización se asocia a venillas de pirita-enargita (cobre, plata, oro, zinc y plomo) de dirección este a oeste (Rottier et al., 2016) del sistema que controla la mineralización en la mina Cerro de Pasco.

¹² Aledaño a la mina Excelsior, ubicada al sur de la mina Cerro de Pasco, Mc Laughlin (1924) definió como Formación Excelsior a una secuencia de lutitas negras pizarrosas con intercalaciones de areniscas cuarzosas; esta unidad no contó con una columna tipo y contactos inferior y superior definidos. Posteriormente, Rodríguez et al. (2011), le asignan el nombre de Grupo Cabanillas en base a relaciones litológicas con sus contemporáneos del sur del Perú (Newell, 1949), donde sí se cuenta con estudios detallados.

Figura 5.3.

Afloramiento de rocas de la Formación Cabanillas en el sector Ayapoto (punto CG-EXC2)



Fuente. Elaboración propia

En el sector Champamarca (puntos CG-EXC8 y CG-EXC10) afloran pizarras negras con niveles delgados de areniscas grises con cuarzo y plagioclasas, y niveles delgados con óxidos y sulfuros grises diseminados; las rocas se encuentran altamente fracturadas y presentan estrías de falla, óxidos en fracturas y venillas de cuarzo con pirita; se encuentra cubierto por material deluvial-aluvial, y en algunos sectores, presenta depósitos de residuos mineros (desmote de mineral).

El análisis petrominerográfico en el punto CG-EXC10 clasificó a la muestra RC-CG-EXC10 como arenisca, compuesto por granos de cuarzo, biotita, sericita, óxidos de hierro y trazas (< 1 %) de turmalina, zircón, moscovita, rutilo y pirita (Figura 5.4).

Figura 5.4.

Afloramiento de rocas de la Formación Cabanillas en el sector Champamarca (puntos CG-EXC8 y CG-EXC10)

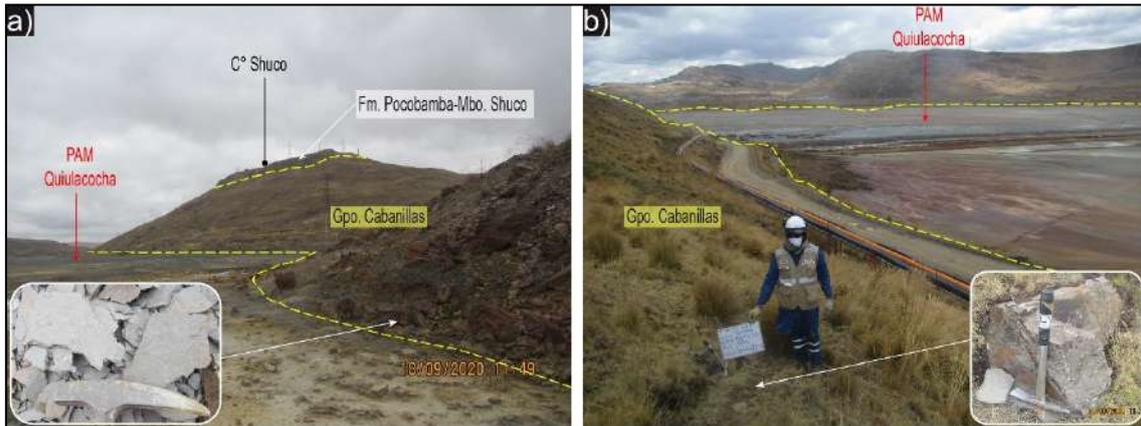


Fuente. Elaboración propia

En el borde norte y noroeste del PAM Quiulacocho (puntos CG-QUI3 y CG-QUI9) se identificaron pizarras grises foliadas, esquistos y areniscas grises con presencia pátinas de óxidos de hierro en los planos de fracturas (Figura 5.5).

Figura 5.5.

Afloramiento de rocas de la Formación Cabanillas en borde norte y noroeste del PAM Quiulacocho (puntos CG-QUI3 y CG-QUI9)

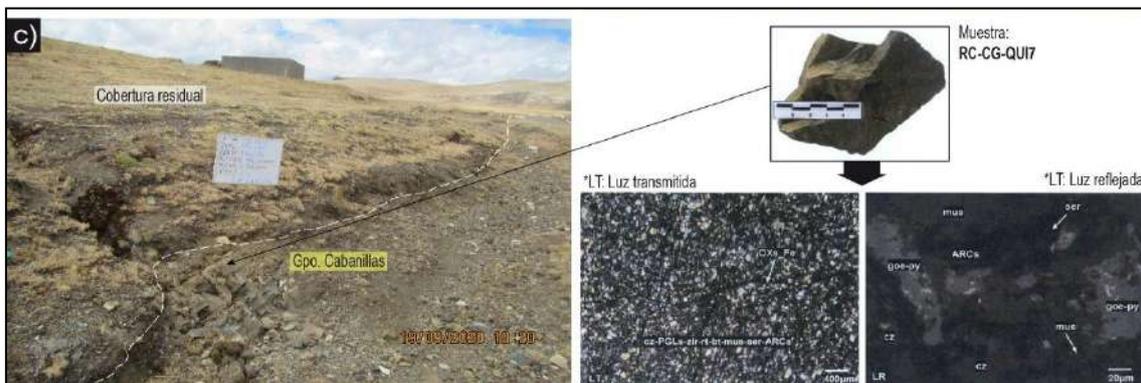


Fuente. Elaboración propia

Al sur del cementerio del C.P. Quiulacocho (punto CG-QUI7) afloran pizarras grises intercaladas con areniscas grises, esquistos y lutitas, además presenta venillas de cuarzo cristalino en dirección N110°, micas, pirita cúbica y óxidos por reemplazamiento de sulfuros; según el estudio petrominerográfico, la muestra RC-CG-QUI7 fue clasificado como arenisca con textura granoblástica débilmente foliada (Figura 5.6).

Figura 5.6.

Afloramiento de rocas de la Formación Cabanillas al sur del cementerio del C.P. Quiulacocho (punto CG-QUI7)



Fuente. Elaboración propia

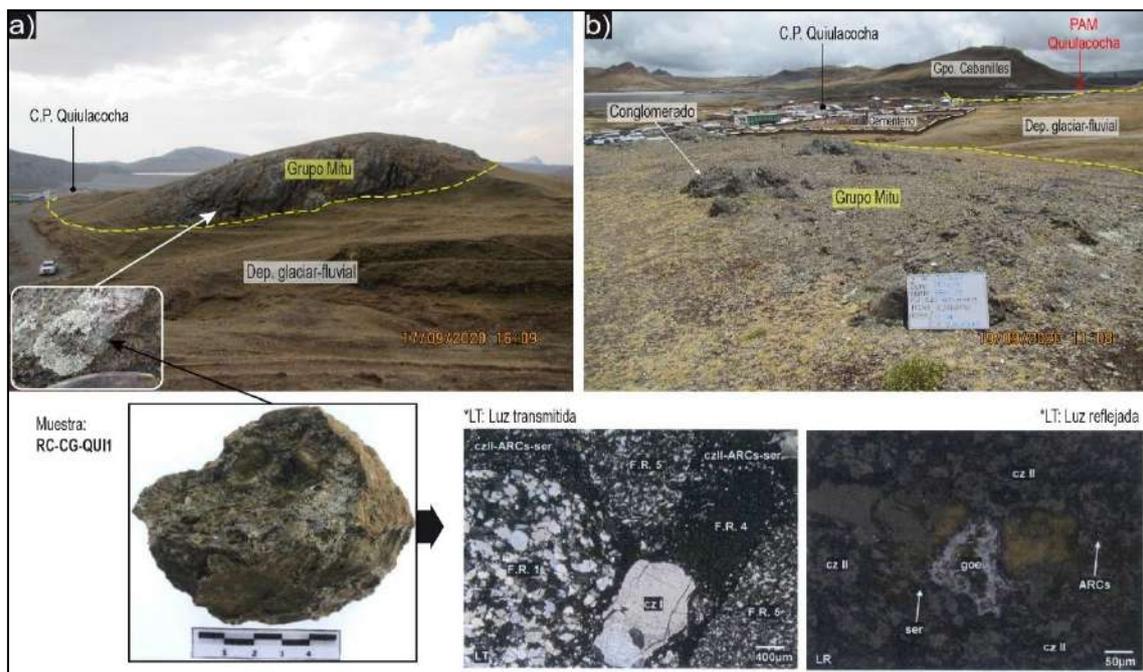
5.1.1.2. Grupo Mitu¹³

El Grupo Mitu aflora en el lado sur y este del cementerio del C.P. Quiulacocho (a 300 m aproximadamente) fue descrito en los puntos CG-QUI1 y CG-QUI8. Se encuentra constituido principalmente por estratos masivos y compactos de conglomerados de tipo clasto soportado, heterométrico (0,5 a 15 cm de diámetro) y con presencia de clastos subredondeados de arenisca, cuarzo lechoso y cuarcitas.

El estudio petrominerográfico de la muestra RC-CG-QUI1 clasificó a la muestra como conglomerado con fragmentos de metarenisca, cuarcita, metalimolita, limoita y arenisca de grano fino y cristales de cuarzo, englobados en matriz de cuarzo, arcillas y sericita, acompañado de cristales de rutilo, impregnaciones de óxidos de hierro y cavidades rellenas por cloritas (Figura 5.7).

Figura 5.7.

Afloramiento de rocas del Grupo Mitu al sur y este del cementerio del C.P. Quiulacocho (puntos CG-QUI1 y CG-QUI8)



Fuente. Elaboración propia

¹³ En el cuadrángulo de Ambo (21-k), McLaughlin (1924) definió 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., 1996).

5.1.1.3. Formación Pocobamba – Miembro Shuco¹⁴

Las rocas de esta unidad afloran en los siguientes sectores: aledaño a la comunidad campesina Quiulacocha 01 (aproximadamente a 150 m al oeste del club El Golf de Cerro de Pasco, y cubren en discordancia angular a las rocas metamórficas del Grupo Cabanillas), asimismo, afloran en el cerro Shuco y en el borde este del PAM Quiulacocha, y cubren en discordancia angular a las rocas metamórficas del Grupo Cabanillas y Mitu.

Litológicamente están compuestos por conglomerados (clastos centimétricos de calizas) y brechas sedimentarias con esporádicos niveles de areniscas rojas. En el punto CG-EXC13 se fue descrito como estratos potentes de conglomerados matriz soportada y heterométrica (10 a 50 cm), con fragmentos subredondeados de calizas grises y negras, en matriz calcárea (Figura 5.8).

Figura 5.8.

Afloramiento de rocas de la Formación Pocobamba – Miembro Shuco aledaño a la comunidad campesina Quiulacocha 01 (punto CG-EXC13)



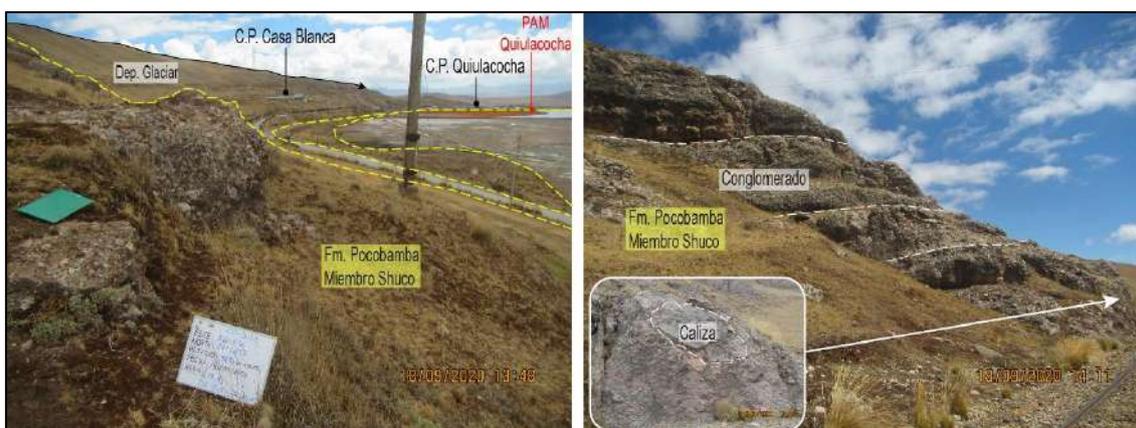
Fuente. Elaboración propia

¹⁴ Esta formación fue descrita por primera vez por McLaughlin (1924); luego, Jenks (1951) lo describe como Formación Casapalca y la divide en 3 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 et al. (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).

Al este del PAM Quiulacocha (punto CG-QUI4) afloran niveles de conglomerados matriz soportada distribuidos en estratos gruesos, compuesto por fragmentos métricos de calizas grises y blancas intercalados con niveles delgados de microconglomerados rojos, ambos englobados en matriz limo arenosa calcárea (Figura 5.9).

Figura 5.9.

Afloramiento de rocas de la Formación Pocobamba – Miembro Shuco en el borde este del PAM Quiulacocha (punto CG-QUI4)



Fuente. Elaboración propia

5.1.1.4. Formación Calera¹⁵

En el lado este del lago Joyo, la Formación Calera yace en ligera discordancia a los conglomerados de la Formación Pocobamba - Miembro Shuco; donde fue dividida en tres miembros (Ángeles, 1999).

El miembro inferior (64 m) en la localidad de Calera (cercana a Cerro de Pasco) está compuesto por conglomerados con clastos angulosos provenientes del Grupo Pucará, intercalados con limos, lutitas y delgados niveles de tobas riolíticas. El miembro medio, alcanza 55 m de espesor, a la base es casi enteramente calcárea, con abundancia de sílex con gasterópodos, bivalvos y madrigueras; y al techo están presentes calizas margosas e intercalaciones de lutitas gris verdosas, probablemente derivadas de piroclastos. El miembro superior, con más de 150 m de espesor, presenta

¹⁵ Esta unidad fue descrita por primera vez por McLaughlin (1924) como caliza Calera; luego Jenks, (1951) le asigna la categoría de formación; recategorizada por Jenks (1951) como miembro Calera de la Formación Pocobamba. Posteriormente, Noble (1992) le asigna nuevamente la categoría de formación, teniendo como argumento el cambio litológico con mayor presencia de vulcanismo. Finalmente, Ángeles (1999) también la considera como formación.

delgadas alternancias de lutitas, limolitas, areniscas, dolomías margosas, dolomías, chert y además abundante contenido de materia orgánica (Ángeles, 1999).

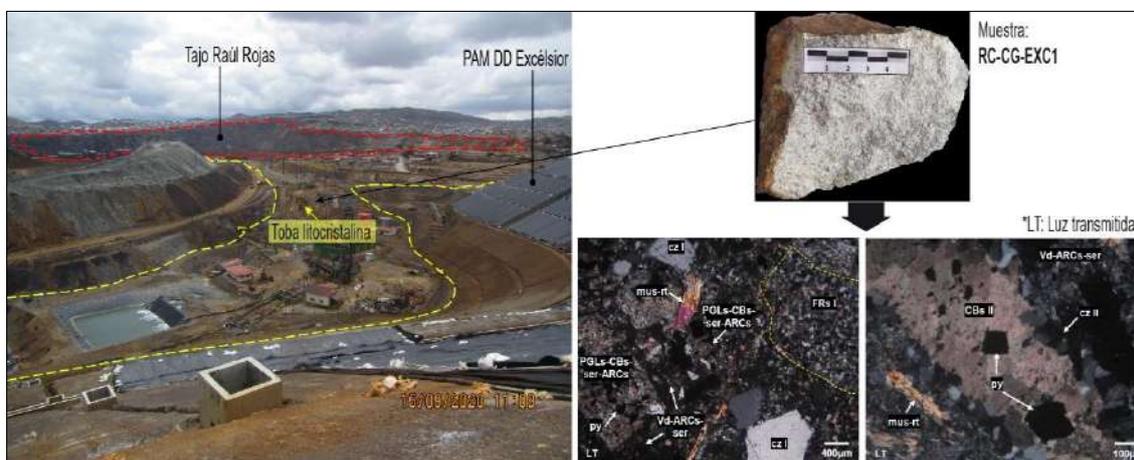
5.1.1.5. Complejo volcánico Cerro de Pasco¹⁶

- Diatrema

En el borde norte del PAM Excelsior (punto CG-EXC1) afloran brechas volcánicas con fragmentos subredondeados de cuarzo gris (ojos de cuarzo), presenta alteración argílica y mineralización de pirita cúbica y diseminada, venillas con óxidos de hierro y ligera efervescencia de carbonatos (Figura 5.10). El estudio petromineralográfico de esta roca, codificado como RC-CG-EXC1, determinó que consiste en rocas volcánica de textura fragmental (toba litocristalina) compuesto por 57 % de fragmentos de rocas (arenisca, textura pórfídica y limolitas, 4 % de plagioclasas, 7 % de cuarzo y trazas de zircón y apatito, englobado en matriz vítrea.

Figura 5.10.

Afloramiento de rocas del diatrema del Complejo Volcánico Cerro de Pasco en el borde norte del PAM Excelsior (punto CG-EXC1)



Fuente. Elaboración propia

¹⁶ Las rocas volcánicas ubicadas al oeste de la falla Cerro de Pasco, fueron denominados por Cobbing et al., 1996 como Formación Rumillana, que incluía a una secuencia de rocas de naturaleza volcanoclástica. Rodríguez et al. (2011) lo definieron como Complejo volcánico Cerro de Pasco, caracterizado por aglomerados, tobas dacíticas, domos de dacita y riolita. Este centro volcánico corresponde a un gran sistema diatrema-domo formado por sucesión de eventos freatomagmáticos y magmáticos (Einaudi, 1968; Rogers, 1983; Baumgartner et al., 2009). La primera fase, freatomagmática, fue explosiva y generó un diatrema (conocido localmente como aglomerado Rumillana) el cual fue datado en $15,36 \pm 0,03$ Ma (Baumgartner et al., 2009). Esta estructura volcánica presenta bloques angulosos y subangulosos de filitas del Grupo Cabanillas, calizas y chert del Grupo Pucará, y roca ígnea porfirítica fuertemente alterada (Rogers, 1983; Cobbing et al., 1996). Hacia el lado occidental se depositaron tobas dacíticas con lapilli acrecional y laminación oblicua de oleadas piroclásticas (Silberman & Noble, 1977).

- Domo de dacita

La siguiente fase, también freatomagmática, consiste en el emplazamiento de domos de dacita a riodacita, datado en $15,40 \pm 0,07$ Ma (Baumgartner *et al.*, 2009) y ubicado en el margen occidental del diatrema. Los afloramientos de esta unidad se encuentran aledaños a la planta de neutralización y poza Pulmón de Cerro S.A.C.

5.1.1.6. Depósitos cuaternarios

- Aledaño al CP Champamarca

El área de evaluación presenta depósitos cuaternarios glaciario-fluvial, aluvial y antropogénico dispuestas en laderas y en terrazas en el fondo de los valles, desarrollados sobre un basamento principalmente fracturado de rocas metamórficas del Grupo Cabanillas.

El depósito **glaciario-fluvial** ubicado en el valle donde se instaló el club El Golf de Cerro de Pasco, presenta sedimentos limoarenosos con esporádicos fragmentos de calizas. El fondo de este valle presenta zonas con material **biogénico** (bofedales y pastizales saturados) compuesto por limoarcilla y materia orgánica, y otras zonas puntuales con material de relleno doméstico.

El **depósito aluvial** se encuentra principalmente en las terrazas y laderas del sector Champamarca, aledaños al canal margen izquierda y aledaño a la Planta de óxidos de Cerro S.A.C. En el borde noreste y este del PAM Excelsior se establecieron 2 puntos de caracterización en depósitos aluviales: el primero cerca del piezómetro P-8 (punto CG-EXC3), consisten en depósitos heterométricos de fragmentos de cuarcitas y pizarras grises en matriz arenosa, además; y el segundo, en el sector Champamarca (punto CG-EXC5), se encuentra compuesto por fragmentos de areniscas, chert y en menor proporción por fragmentos mineralizados con pirita, calcopirita, óxidos de manganeso y óxidos de hierro, englobado en matriz arenosa. En ambos puntos, el material aluvial presentó evidencia de remoción y escasos residuos domésticos (Figura 5.11).

Figura 5.11.

Depósitos aluviales dispuestos aledaño al piezómetro P-8 (a) y en el sector Champamarca (b) (puntos CG-EXC3 y CG-EXC5)

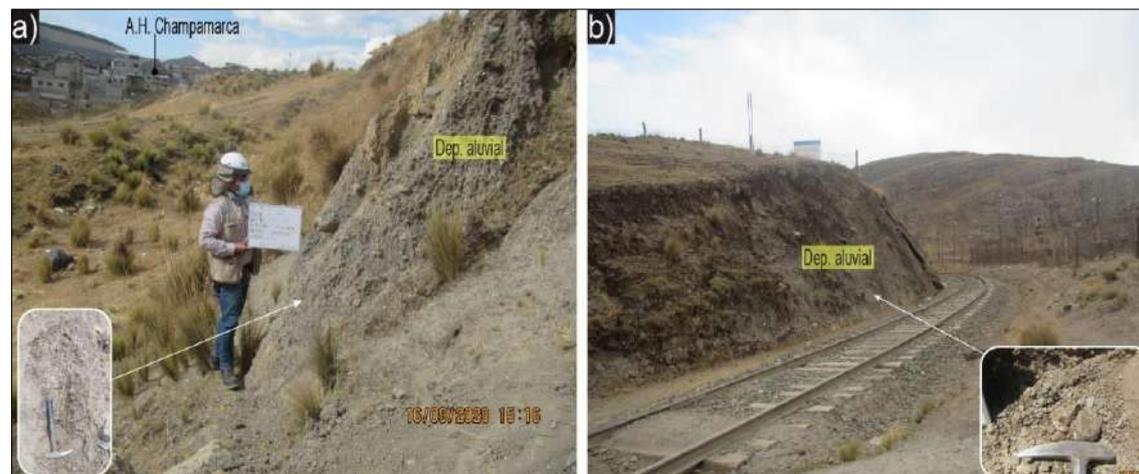


Fuente. Elaboración propia

De igual modo, en las laderas al sur del CP Champamarca se establecieron 2 puntos de caracterización en depósitos aluviales (CG-EXC7 y CG-EXC9), los cuales conforman depósito matriz soportada, compuesto por fragmentos heterométricos subangulosos a subredondeados de calizas y areniscas grises, englobado en matriz limoarenosa pardo oscura (Figura 5.12).

Figura 5.12.

Depósitos aluviales dispuestos al sur del CP Champamarca (puntos CG-EXC7 y CG-EXC9)



Fuente. Elaboración propia

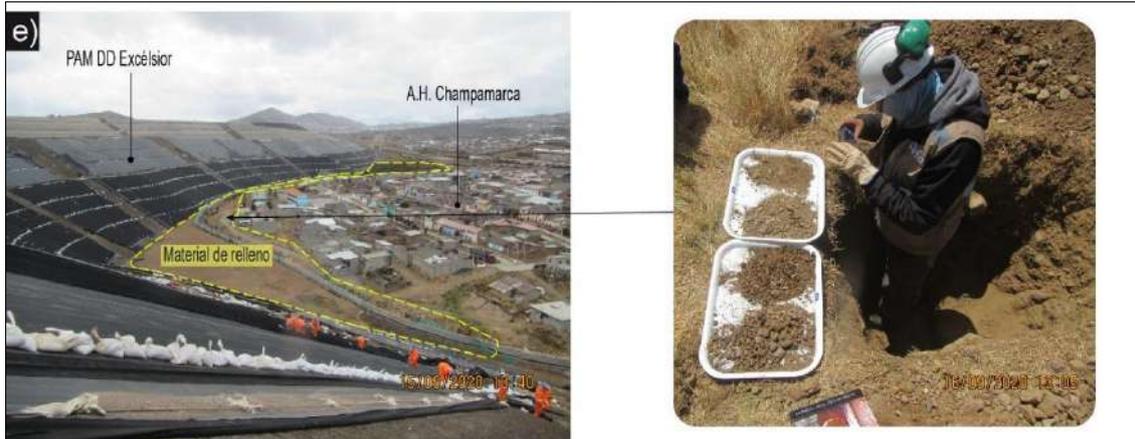
Los **depósitos antropogénicos** corresponden al material mineralizado y no mineralizado dispuestos aledaños al PAM producto de las actividades de remoción. Estos depósitos fueron divididos en tres tipos: el primero, ubicado en el borde del PAM

Excelsior (puntos CG-EXC4, RM-EXC2 y CG-EXC11) corresponde a residuos mineros y se encuentra compuesto por desmonte de mineral (fragmentos mineralizados con sulfuros, sulfatos y óxidos) y asociado a afloramientos de drenaje ácido; el segundo, ubicado en el canal de aguas ácidas que fluye en el borde oeste del PAM Excelsior, está compuesto por sedimentos mezclados con material de relaves; y el tercero, ubicado en la vía de acceso (cerca de piezómetro P-5 y C.C. Quiulacocha 1) y al norte del A.H. Champamarca, consisten en material de relleno compuesto por desmonte de mineral removido y mezclado con material de relleno doméstico; se precisa que detrás del centro educativo 34037 del A.H. Champamarca, este material (punto CG-EXC6) cubre a material biogénico de matriz soportada compuesto por fragmentos de cuarcitas con piritita, en matriz arcillosa (Figura 5.13).

Figura 5.13.

Depósitos antropogénicos dispuestos en los bordes este, sur y oeste del PAM Quiulacocha (puntos CG-EXC4, RM-EXC2 y CG-EXC11)





Fuente. Elaboración propia

Nota: En a) residuo minero en el punto CG-EXC4, b) residuo minero en el punto RM-EXC2, c) residuo minero en el punto CG-EXC11, d) sedimentos y relaves en el canal de aguas ácidas, y e) material de relleno detrás del centro educativo 34037 del A.H. Champamarca

- Aledaño al C.P. Quiulacocha

Presenta depósitos cuaternarios de origen glaciar, glaciar-fluvial, aluvial, fluvial y antropogénico dispuestas en laderas y en terrazas en el fondo de los valles, desarrollados las rocas precedentes descritas anteriormente.

El **depósito glaciar** se encuentra al sur del C.P. Casa Blanca, formando una morrena extensa dispuesta de este a oeste, el cual está constituida por bloques y gravas heterométricos y subredondeados de calizas y otros fragmentos clásticos, englobados en matriz arcillo-limosa y limo-arenosa con carbonatos (según la prueba de efervescencia con HCl 10%), originados a partir de los procesos glaciares (avance y retroceso del hielo) que erosionaron a las rocas predecesoras en las partes altas ubicados al norte del depósito.

La parte distal de la morrena mencionada (punto CG-QUI2), ubicado en el sector Quiulacocha está compuesto por fragmentos son subredondeados de caliza, arenisca, chert y conglomerados, y se encuentran englobados en matriz limoarenosa gris a gris oscura (Figura 5.14); presenta predominio de matriz respecto a los fragmentos (matriz soportada).

Figura 5.14.

Depósito glaciar dispuestos al sureste del C.P. Quiulacocha (puntos CG-QUI2)



Fuente. Elaboración propia

El depósito **glaciar-fluvial** se observa en la parte baja de los valles: aledaño al depósito de relaves Ocroyoc, C.P. Quiulacocha y la laguna Jogo, formando laderas denudadas de pendiente moderada. Por otra parte, en ambas márgenes del río Ragra, aledaño a la confluencia de los canales de la margen Izquierda y Derecha (puntos CG-QUI5 y CG-QUI6), el material es matriz soportada, polimícticas y heterométrica (0,2 a 10 cm de diámetro), compuesto por fragmentos subredondeados de calizas areniscas, pizarras, cuarcitas, en matriz limoarenosa (Figura 5.15).

Figura 5.15.

Depósito glaciar-fluvial dispuestos al norte del CP Quiulacocha (puntos CG-QUI5 y CG-QUI6)



Fuente. Elaboración propia

El depósito **aluvial**, se encuentra en el borde este y noroeste del PAM Quiulacocha, formando laderas moderadamente empinadas y asociadas a la erosión de material de las quebradas aportantes al cauce principal antiguo del río Ragra. En el punto CG-QUI0 este depósito es heterométrico compuesto por fragmentos de calizas y areniscas grises englobado en matriz arenosa, además está cubierto esporádicamente por desmonte de mineral antiguo (Figura 5.16).

Figura 5.16.

Depósito aluvial dispuestos en el borde este del PAM Quiulacocha (puntos CG-QUI0)

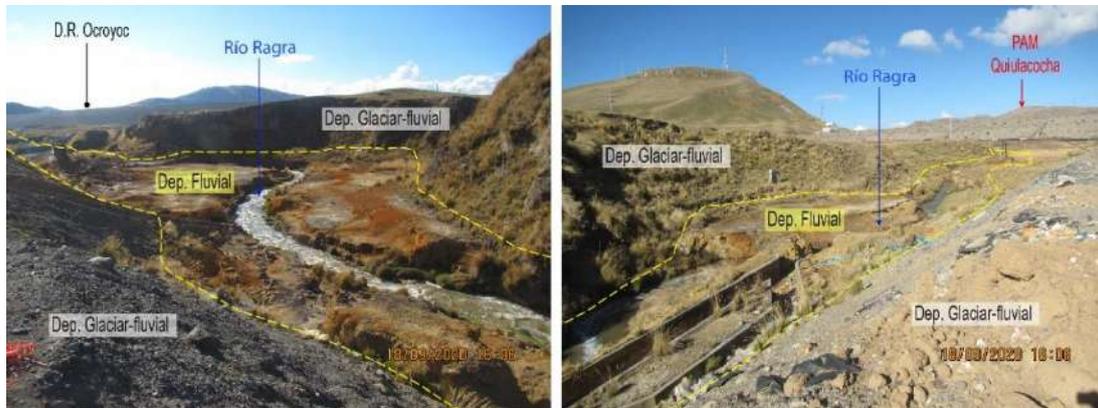


Fuente. Elaboración propia

El depósito **fluvial** se restringe al cauce del río Ragra (oeste del PAM Quiulacocha) en la cual se identificó fragmentos rocosos heterométricos redondeados a subredondeados transportados por la corriente del río, los cuales están depositados en forma de terrazas bajas. Este material presenta una coloración amarillenta a rojiza debido a la erosión de sedimentos provenientes del dique de contención del PAM Quiulacocha (Figura 5.17).

Figura 5.17.

Depósito fluvial dispuesto en las terrazas bajas aledaños al río Ragra, al oeste del PAM Quiulacocha

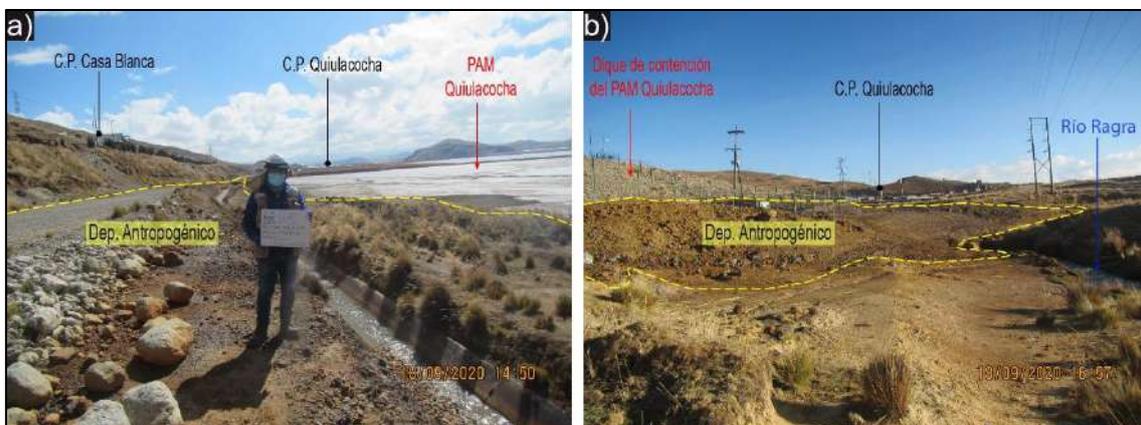


Fuente. Elaboración propia

Los depósitos **antropogénicos** ubicados en el borde este, sureste (C.P. Casa Blanca) y oeste (dique de contención) se encuentran los depósitos antropogénicos-residuos mineros (puntos RM-QUI1 y RM-QUI2) compuestos por desmonte de mineral con fragmentos de calizas, brechas calcáreas con mineralización de pirita, pirita masiva y óxidos de hierro endurecidos, en matriz de óxidos y polvo de mineral. Otros depósitos antropogénicos corresponden a sedimentos y relaves ubicados en el canal de aguas ácidas, y al material de relleno ubicado en la vía de acceso principal entre el PAM Quiulacocha y PAM Excelsior (Figura 5.18).

Figura 5.18.

Depósito antropogénico dispuesto en el borde sureste del PAM Quiulacocha (puntos RM-QUI1 y RM-QUI2)



Fuente. Elaboración propia

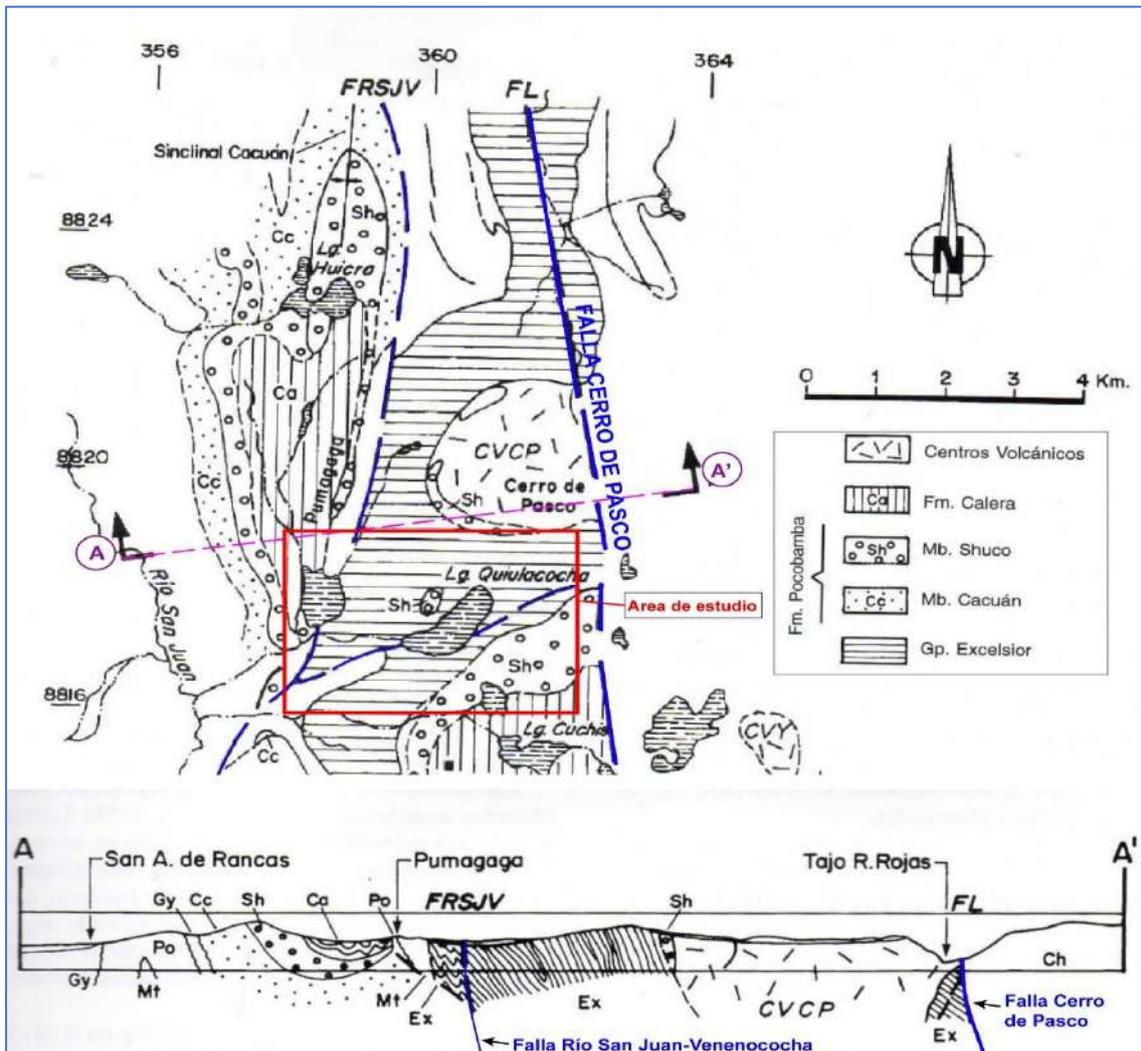
Nota: En a) residuo minero en el punto RM-QUI1, y b) residuo minero en el punto RM-QUI2

5.1.2. Contexto estructural

Regionalmente, las estructuras pre Cenozoicas consisten en las fallas Cerro de Pasco o Longitudinal (FL) y del Río San Juan – Venenococha (FRSJV), siendo la falla Cerro de Pasco la estructura más antigua que controló la sedimentación de diferenciada del Grupo Pucará y el emplazamiento del complejo volcánico Cerro de Pasco en el Mioceno; en la zona de estudio se proyectó la falla de Laguna Quiulacocha (FLQ) de dirección suroeste a noreste, considerado como estructura complementaria, con la función de ramal de transferencia de movimiento entre las fallas Cerro de Pasco (o FL) y FRSJV (Ángeles, 1999). Ver Figura 5.19.

Figura 5.19.

Mapa de estructuras pre Cenozoicas regionales de la región Cerro de Pasco



Fuente: Modificado de Ángeles (1999).

La falla complementaria Quiulacocha (FLQ), fue cartografiada en la vía cerca del club El Golf de Cerro de Pasco (punto CG-EXC12) corresponde a una falla de dirección N235°/43°NO, asociado a brechas con fragmentos de cuarcita y hornfels, en matriz de roca molida. La falla presenta roca argilizada y oxidada con precipitados de sulfatos y azufre en las paredes (Figura 5.20).

Figura 5.20.

Falla geológica ubicada en la vía cerca del club El Golf de Cerro de Pasco, asociado a brechas y roca molida (punto CG-EXC12)

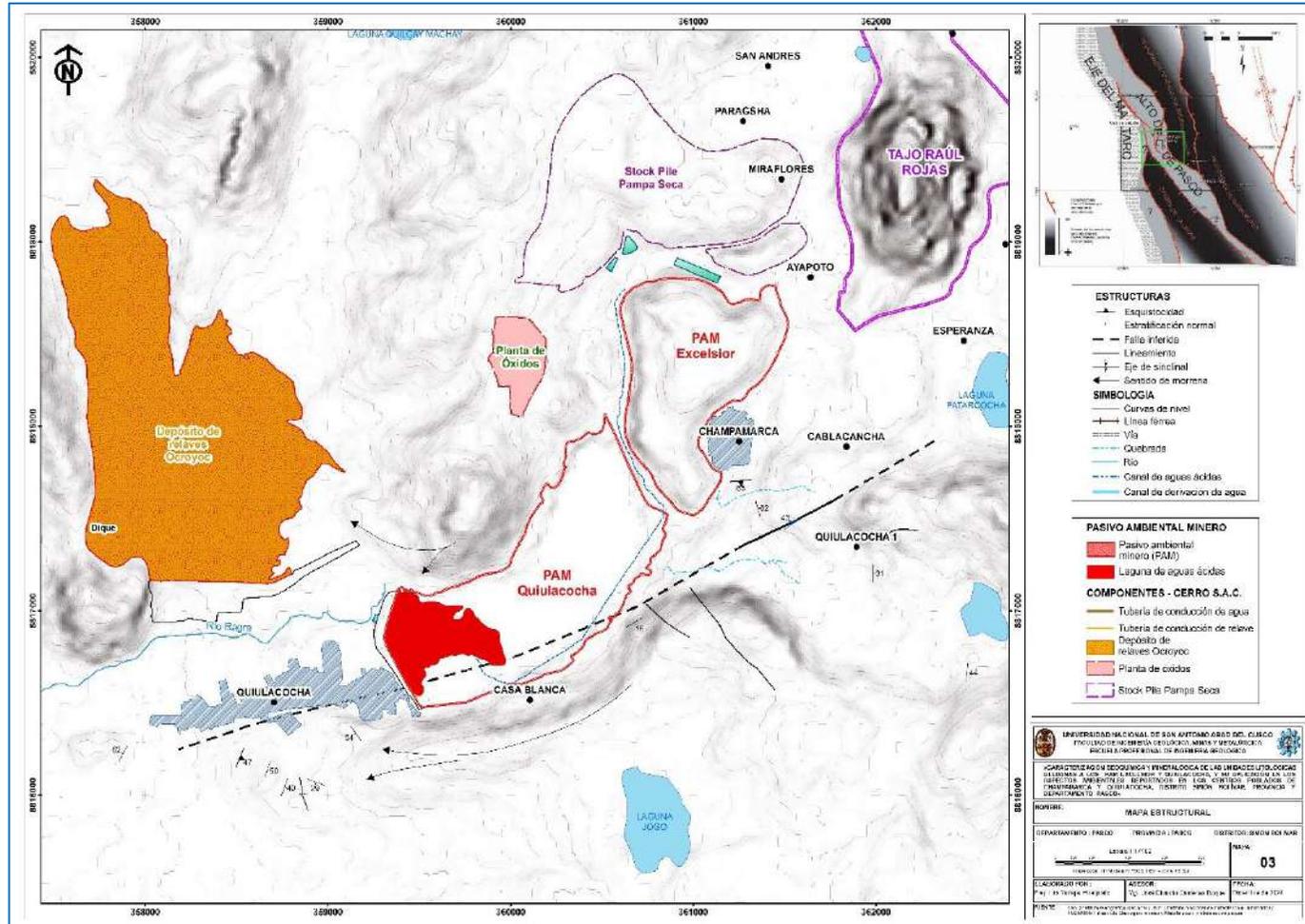


Fuente. Elaboración propia

Adicionalmente, se interpretaron alineamientos de dirección noroeste y noreste en los niveles clásticos de la Formación Pocobamba – Miembro Chuco (Figura 5.21).

Figura 5.21.

Mapa de estructuras regionales y locales de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia; Ángeles (1999).

5.2. Características geoquímicas y mineralógicas de las unidades litológicas

Los puntos de muestreo de roca se definieron en base a las unidades identificadas en la caracterización geológica, priorizando los sectores aledaños al PAM depósito de desmontes Excelsior, depósito de relaves Quiulacochoa y los centros poblados Champamarca y Quiulacochoa.

En total se tomaron 27 muestras de roca, correspondientes al Grupo Cabanillas (7 puntos), Grupo Mitu (2 puntos), Formación Pocobamba – Miembro Shuco (4 puntos), Centro volcánico Cerro de Pasco – Diatrema (1 punto), depósitos aluviales (4 puntos), depósito glaciar (1 punto), depósito glaciar-fluvial (2 puntos) y depósito antropogénico - residuo minero (6 puntos). Los parámetros analizados en cada punto se detallan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1.

Parámetros analizados en las muestras de roca de las unidades geológicas identificadas en el área de estudio

N.º	Unidad litoestratigráfica / Roca volcánica	Código de la muestra	Litología	Parámetros analizados						
				Análisis elemental, DAR y lixiviación					Análisis mineralógico	
				Metales totales	Test ABA	SF metales	SF aniones	Tessier	DRX	Petromineralografía
1		RC-CG-EXC2	Cuarcita	1	1	1	1	1	1	---
2		RC-CG-EXC8	Pizarras y areniscas	1	1	1	1	1	1	---
3		RC-CG-EXC10	Arenisca	1	---	---	---	---	---	1
4	Grupo Cabanillas	RC-CG-EXC12	Brecha en cuarcita y hornfels	1	---	---	---	---	1	---
5		RC-CG-QUI3	Pizarras	1	---	---	---	---	---	---
6		RC-CG-QUI7	Pizarras, areniscas y esquistos	1	---	---	---	---	---	1
7		ROxP-13	Pizarra/filita	1	1	1	1	---	---	---
8	Grupo Mitu	RC-CG-QUI1	Conglomerado con clastos polimícticos	1	---	---	---	---	---	1
9		RC-CG-QUI8	Conglomerado con clastos polimícticos	1	---	---	---	---	---	---
10	Formación Pocobamba - Miembro Shuco	RC-CG-EXC13	Conglomerado	1	---	---	---	---	---	---
11		RC-CG-QUI4	Conglomerado con clastos de calizas	1	---	---	---	---	---	---
12		ROxP-11	Conglomerado	1	1	1	1	---	---	---

N.º	Unidad litoestratigráfica / Roca volcánica	Código de la muestra	Litología	Parámetros analizados						
				Análisis elemental, DAR y lixiviación					Análisis mineralógico	
				Metales totales	Test ABA	SF metales	SF aniones	Tessier	DRX	Petromineralografía
13		ROxP-12	Conglomerado	1	1	1	1	---	---	---
14	Complejo Volcánico Cerro de Pasco - Diatrema	RC-CG-EXC1	Toba / Brecha volcánica	1	1	1	1	1	---	1
15		RC-CG-EXC3	Gravas y arenas	1	---	---	---	---	---	---
16		RC-CG-EXC5	Gravas y arenas	1	---	---	---	---	---	---
17	Depósito aluvial	RC-CG-EXC7	Gravas y limos	1	1	1	1	1	1	---
18		RC-CG-EXC9	Gravas y limos	1	---	---	---	---	---	---
19	Depósito Glaciar	RC-CG-QUI2	Gravas, limos y arenas	1	1	1	1	1	1	---
20		RC-CG-QUI5	Gravas, limos y arenas	1	---	---	---	---	---	---
21	Depósito Glaciar-fluvial	RC-CG-QUI6	Gravas, limos y arenas	1	1	1	1	1	1	---
22		RM-EXC0	Material de desmonte mineralizado	1	---	---	---	---	---	---
23		RM-EXC1	Material de desmonte mineralizado	1	---	---	---	---	---	---
24		RM-EXC2	Material de desmonte mineralizado	1	1	1	1	1	1	---
25	Depósito antropogénico - residuo minero	RM-EXC3	Material de desmonte mineralizado	1	---	---	---	---	---	---
26		RM-QUI1	Material de desmonte mineralizado	1	---	---	---	---	---	---
27		RM-QUI2	Material de desmonte mineralizado	1	1	1	1	1	1	---
TOTAL				27	11	11	11	8	8	4

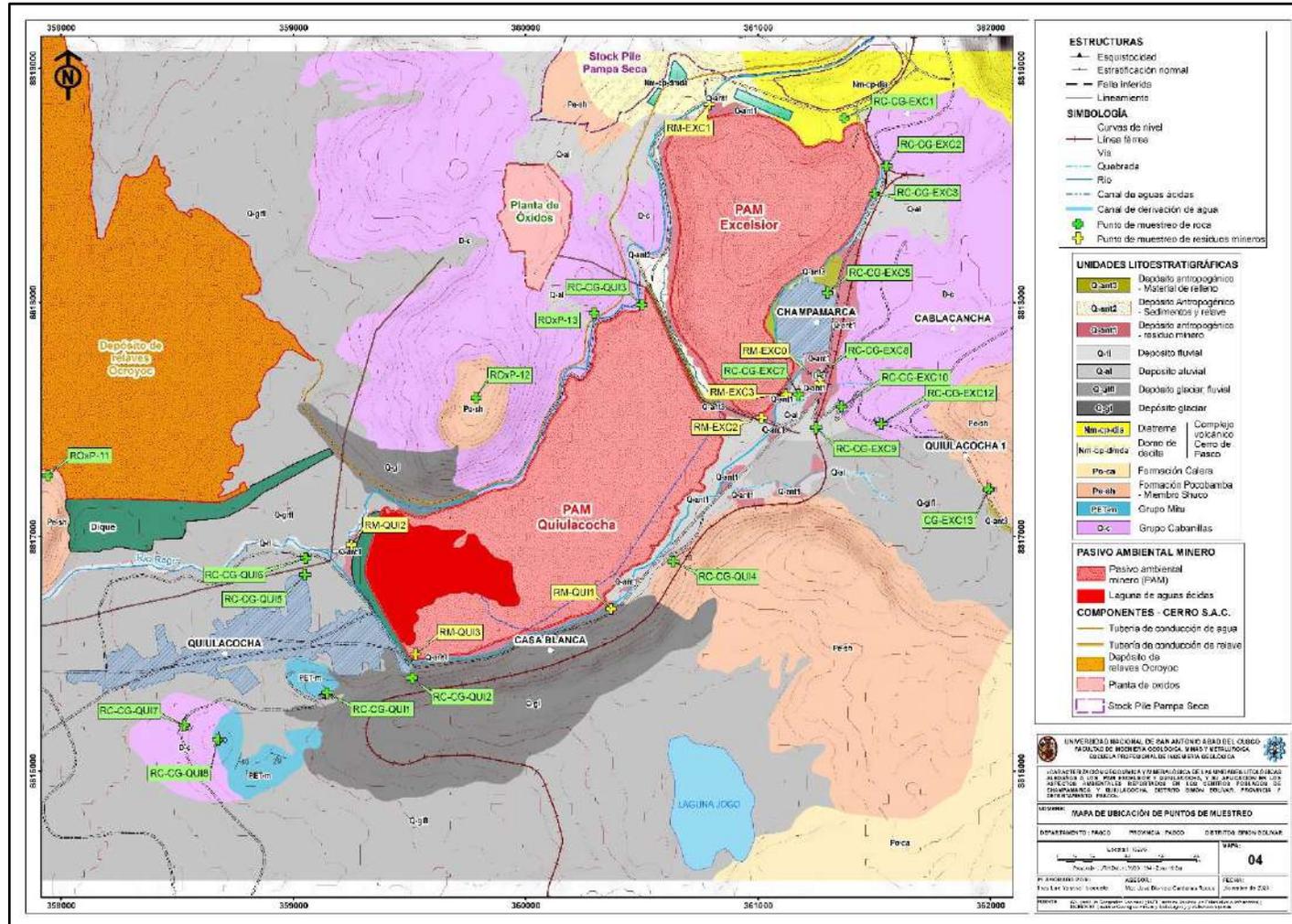
Fuente: Elaboración propia

(---): Parámetro no considerado para este punto

El la Figura 5.22 se presentan el mapa de ubicación de los puntos de muestreo de roca asociados a las unidades litológicas reconocidas en campo.

Figura 5.22.

Mapa de ubicación de puntos de muestreo de roca para el análisis litogeoquímico en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

5.2.1. Metales totales

Sector Excelsior

Las rocas metamórficas del **Grupo Cabanillas** compuesto por pizarras y areniscas cartografiados aledaños al sector Champamarca presentaron concentraciones preferenciales (> 1000 mg/kg) de elementos litófilos: hierro, potasio, aluminio, manganeso y magnesio, y trazas (< 1000 mg/kg) de calcio, zinc, arsénico, plomo, fósforo, bario, sodio, vanadio, estroncio, níquel, cobre, cromo y litio.

Por otra parte, los afloramientos de brechas en cuarcita y hornfles (RC-CG-EXC12) reconocidos aledaños al club El Golf de Cerro de Pasco presentaron concentraciones de hierro, aluminio, calcio, fósforo, potasio, estroncio y bario, con trazas de plomo, zinc, magnesio, arsénico, manganeso, antimonio, sodio, boro, vanadio, cromo y talio, no obstante, resalta las mayores concentraciones de plomo, zinc, arsénico y antimonio respecto a las pizarras y areniscas del sector Champamarca, debido a la influencia de la falla geológica existente en esta zona.

Adicionalmente, se reconoció afloramientos de cuarcitas en el sector Ayapoto, los cuales presentan altas concentraciones de hierro, calcio, manganeso, aluminio, zinc, cobre, arsénico, plomo, magnesio y fósforo, y trazas de potasio, bario, estroncio, plata, antimonio, cadmio, sodio, titanio, vanadio, talio, níquel y cromo, los cuales están asociados al emplazamiento de venillas de pirita-enargita (cobre, plata, oro, zinc y plomo) de dirección Este-Oeste, correspondiente a la tercera etapa de mineralización del yacimiento Cerro de Pasco (Rottier et al., 2016).

Los conglomerados de la **Formación Pocobamba-Miembro Shuco** presentaron altas concentraciones de calcio (245282 mg/kg), magnesio, hierro y fósforo, y trazas de aluminio, manganeso, potasio, arsénico, zinc, estroncio, sodio, plomo y bario.

El diatrema del **CV Cerro de Pasco** presentó mayoritariamente concentraciones de hierro, calcio, magnesio, potasio, manganeso, aluminio y potasio, con trazas de zinc, sodio, plomo, bario, estroncio y arsénico.

Los **depósitos aluviales** cartografiados en la parte norte del A.H. Champamarca presentaron mayoritariamente concentraciones de hierro, calcio, aluminio, magnesio, manganeso, zinc, potasio, fósforo y plomo, y trazas de cobre, arsénico, bario, estroncio, sodio, plata, vanadio, níquel y litio, concentraciones que fueron superiores a los depósitos cartografiados en la parte sur del A.H. Champamarca, a excepción del calcio; siendo el contenido metálico en el Sur principalmente calcio, hierro, magnesio, aluminio, manganeso, potasio, zinc y fósforo, con trazas de plomo, arsénico, cobre, estroncio, bario, sodio, talio y níquel.

Los **depósitos antropogénicos** presentaron predominantemente concentraciones de hierro, aluminio, calcio, plomo, zinc, cobre, manganeso, magnesio, arsénico y fósforo, con trazas de plata, antimonio, mercurio, cadmio, y otros.

Los metales predominantes de las unidades litoestratigráficas y rocas volcánicas se presentan en la Tabla 5.2. De igual modo, en la Figura 5.23 se muestra las concentraciones promedio con error estándar

Tabla 5.2.

Elementos predominantes y trazas de las unidades litoestratigráficas aledaños al PAM

Excelsior

Sector	Litología/ ubicación	Elementos predominantes (> 1000 mg/kg)	Elementos trazas (< 1000 mg/kg)
Grupo Cabanillas	Pizarras y areniscas	Hierro, potasio, aluminio, manganeso y magnesio	Calcio, zinc, arsénico, plomo, fósforo, bario, sodio, vanadio, estroncio, níquel, cobre, cromo y litio
	Cuarcitas en el sector Ayapoto (RC-CG-EXC2)	Hierro, calcio, manganeso, aluminio, zinc, cobre, arsénico, plomo, magnesio y fósforo	Potasio, bario, estroncio, plata, antimonio, cadmio, sodio, titanio, vanadio, talio, níquel y cromo
	Brecha en cuarcita y hornfels (RC-CG-EXC12)	Hierro, aluminio, calcio, fósforo, potasio, estroncio y bario	Plomo, zinc, magnesio, arsénico, manganeso, antimonio, sodio, boro, vanadio, cromo y talio
Formación Pocobamba - Miembro Shuco		Calcio++, magnesio++, hierro y fósforo	Aluminio, manganeso, potasio, arsénico, zinc, estroncio, sodio, plomo y bario
CV Cerro de Pasco - Diatrema		Hierro, calcio, magnesio, potasio, manganeso, aluminio y potasio	Zinc, sodio, plomo, bario, estroncio y arsénico

Sector	Litología/ ubicación	Elementos predominantes (> 1000 mg/kg)	Elementos trazas (< 1000 mg/kg)
Depósito aluvial	Parte norte del A.H. Champamarca	Hierro, calcio, aluminio, magnesio, manganeso, zinc, potasio, fósforo y plomo	Cobre, arsénico, bario, estroncio, sodio, plata, vanadio, níquel y litio
	Parte sur del A.H. Champamarca	Calcio++, hierro, magnesio, aluminio, manganeso, potasio, zinc y fósforo	Plomo, arsénico, cobre, estroncio, bario, sodio, talio y níquel
Depósito antropogénico – residuo minero	Zona de garita de control de AMSAC (RM-EXC3)	Hierro++, aluminio, calcio, plomo, fósforo, zinc y cobre	Manganeso, arsénico, potasio, magnesio, estroncio, bario, antimonio, vanadio, plata, sodio y cromo
	Zona sur de PAM (RM-EXC2)	Hierro++, calcio, plomo, zinc, manganeso, aluminio, magnesio y arsénico	Potasio, fósforo, cobre, bario, sodio, estroncio, plata, talio y cadmio
	Lado izquierdo del canal Champamarca (RM-EXC1)	Hierro++, plomo, calcio, zinc, aluminio y cobre	Potasio, arsénico, magnesio, manganeso, plata, potasio, antimonio, bario, sodio, estroncio, mercurio, molibdeno y selenio
	Costado de la Av. El Minero (RM-EXC0)	Hierro++, calcio, aluminio, zinc, manganeso, plomo, magnesio, fósforo y arsénico	Potasio, cobre, estroncio, bario, sodio, titanio, vanadio, cadmio, plata, antimonio, mercurio y selenio

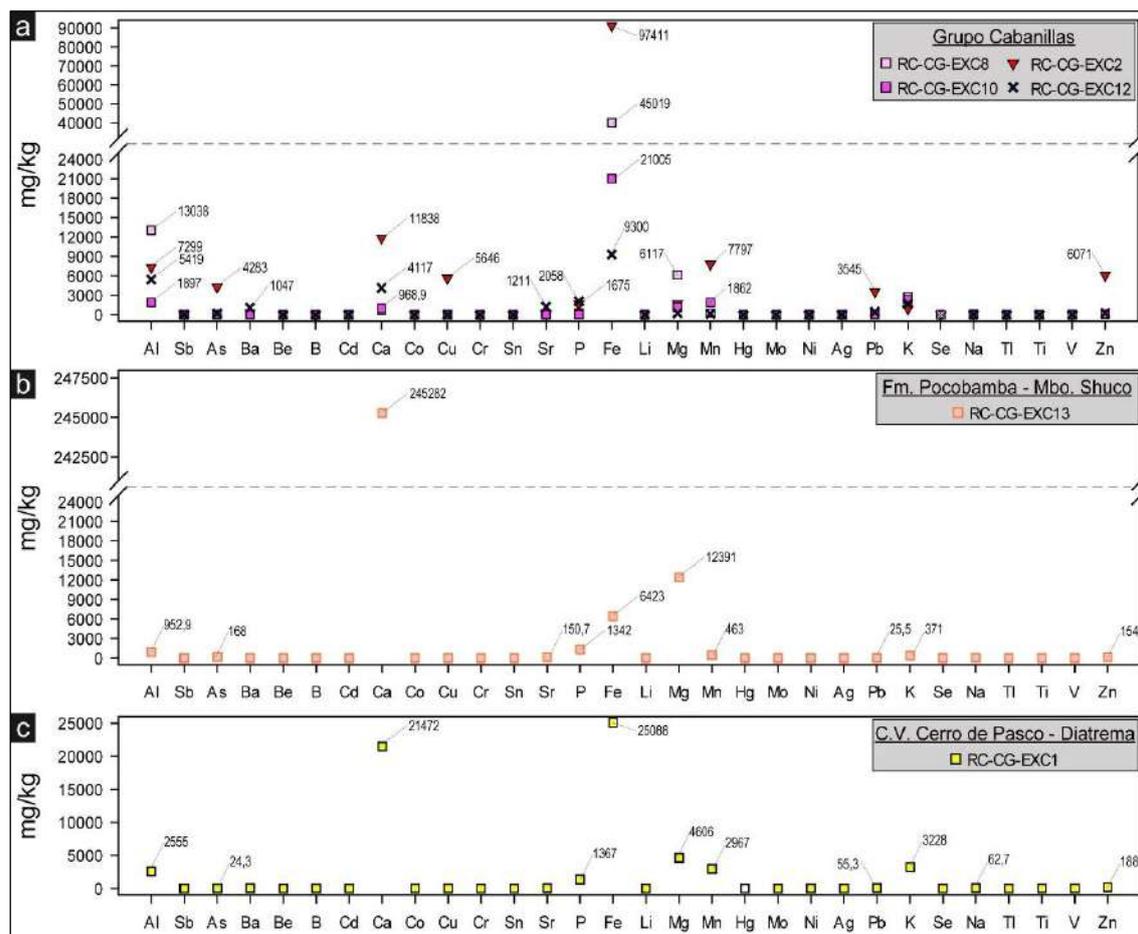
Fuente: Elaboración propia

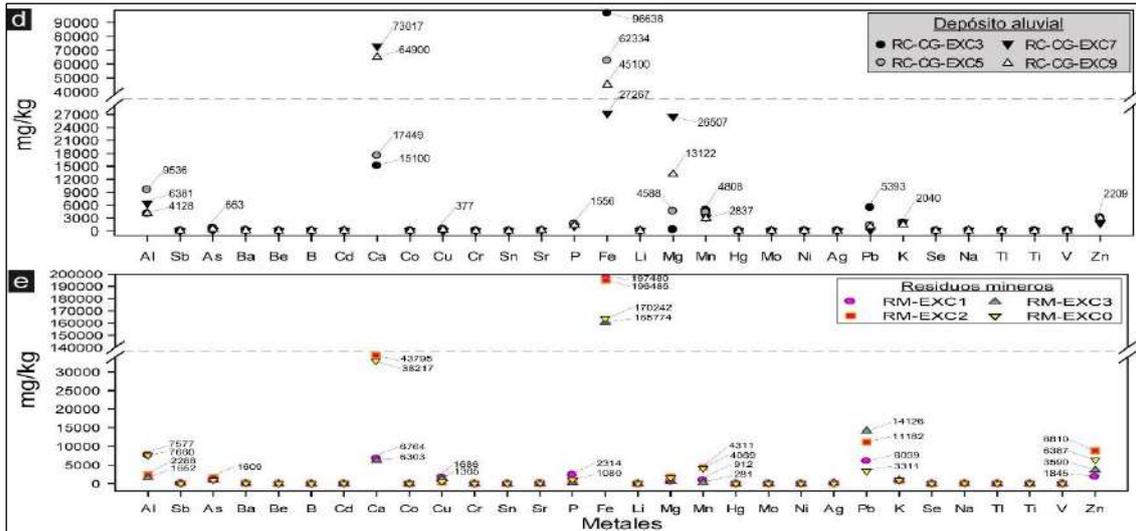
Nota: (++) Elemento con concentración elevada con respecto al resto

Figura 5.23.

Concentración de elementos predominantes y trazas de las unidades litoestratigráficas

aledaños al PAM Excelsior





Fuente: Elaboración propia.

NOTA: a) grupo Cabanillas, b) formación Pocobamba – Miembro Shuco, c) complejo volcánico Cerro de Pasco – Diatrema, d) depósito aluvial y e) depósito antropogénico.

Los iconos de color blanco corresponden a elementos con concentraciones menores al límite de detección (< L.D.).

Sector Quiulacocha

Las rocas del **Grupo Cabanillas** presentaron mayoritariamente hierro, magnesio, aluminio, calcio y potasio, y en menor proporción fósforo, manganeso, sodio, zinc y bario.

El **Grupo Mitu** presentó principalmente hierro, aluminio, magnesio, calcio, potasio y manganeso, y trazas de fósforo, zinc, sodio, bario y plomo.

En tanto, las rocas de la **Formación Pocobamba-Miembro Shuco** presentaron las mayores concentraciones de calcio, seguido de hierro, aluminio, magnesio y fósforo, con trazas de potasio, estroncio, manganeso, sodio, zinc y bario.

Los depósitos cuaternarios **Glaciar y Glaciar-fluvial** reportaron las mayores concentraciones de la mayoría de los elementos litófilos y calcófilos respecto a las rocas del basamento antes descritos. Es así que, el material Glaciar contiene mayoritariamente calcio, hierro, magnesio, manganeso, aluminio, zinc, potasio y fósforo; y el material Glaciar-fluvial reportó hierro, calcio, magnesio, aluminio, manganeso, potasio, zinc y fósforo, en ambos casos, acompañado de trazas de plomo, arsénico, cobre, bario, estroncio y sodio.

Los **depósitos antropogénicos** presentaron predominantemente concentraciones de hierro, plomo, calcio, aluminio, zinc, cobre, potasio, manganeso y fósforo, con trazas de arsénico, plata, antimonio y cadmio. Siendo el plomo con mayor concentración en el residuo minero del punto RC-QUI1.

Los metales predominantes de las unidades litoestratigráficas se presentan en la Tabla 5.3. De igual modo, en la Figura 5.24 se muestra las concentraciones promedio con error estándar.

Tabla 5.3.

Elementos predominantes y trazas de las unidades litoestratigráficas aledaños al PAM Quiulacocha

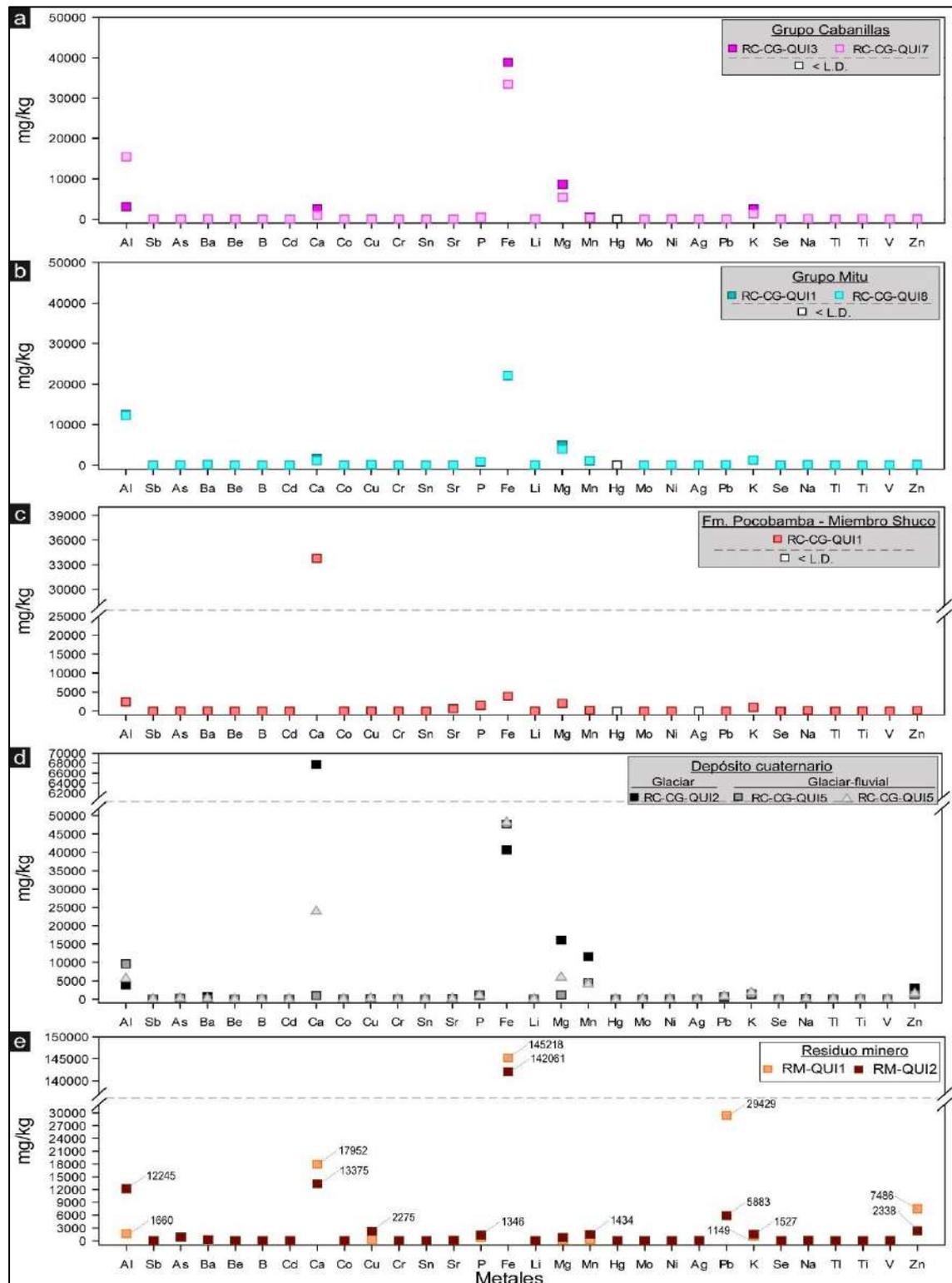
Unidad geológica		Elementos predominantes (> 1000 mg/kg)	Elementos trazas (< 1000 mg/kg)
Grupo Cabanillas		Hierro, magnesio, aluminio, calcio y potasio	Fósforo, manganeso, sodio, zinc y bario
Grupo Mitu		Hierro, aluminio, magnesio, calcio, potasio y manganeso	Fósforo, zinc, sodio, bario y plomo
Formación Pocobamba - Miembro Shuco		Calcio++, hierro, aluminio, magnesio y fósforo	Potasio, estroncio, manganeso, sodio, zinc y bario
Depósito glaciar	Lado sureste del CP Quiulacocha (RC-CG-QUI2)	Calcio, hierro, magnesio, manganeso, aluminio, zinc, potasio y fósforo	Bario, plomo, arsénico, estroncio y sodio
Depósito glaciar-fluvial	Lado norte del CP Quiulacocha (RC-CG-QUI6)	Hierro, calcio, magnesio, aluminio, manganeso, potasio, zinc y fósforo	Plomo, arsénico, cobre, bario, estroncio y sodio
Depósito antropogénico – residuo minero	Borde este del PAM Quiulacocha (RM-QUI1)	Hierro, plomo++, calcio, zinc, aluminio y potasio	Arsénico, fósforo, cobre, manganeso, magnesio, estroncio, bario, sodio, plata, antimonio y cadmio
	Borde oeste del PAM Quiulacocha (RM-QUI2)	Hierro, calcio, aluminio, plomo, zinc, cobre, potasio, manganeso y fósforo	Arsénico, magnesio, bario, sodio, estroncio, vanadio y plata

Fuente: Elaboración propia

Nota: (++) Elemento con concentración elevada con respecto al resto

Figura 5.24.

Concentración de elementos predominantes y trazas de las unidades litoestratigráficas aledaños al PAM Quiulacocho.



Fuente: Elaboración propia.

Nota: En a) Grupo Cabanillas, b) Grupo Mitu, c) Formación Pocobamba – Miembro Shuoco, d) depósitos glaciar y glaciar-fluvial y e) depósito antropogénico.

5.2.2. Test de generación de acidez

La prueba ABA reportó bajas concentraciones de azufre total en casi todas las muestras (entre 0,25 y 0,4 %), a excepción de las tobas del C.V. Cerro de Pasco (2,31 %) y depósitos antropogénicos (3,61 % y 9,15 %) donde fueron mayores. En tanto, el pH en pasta fue neutro en la mayoría de las muestras (7,38 a 8,06 unidades de pH), a excepción de las pizarras muestreadas en la parte sur del A.H. Champamarca (4,2 unidades de pH).

La relación entre el potencial de neutralización (PN) y el potencial de acidez (PA), evidenció que el potencial de acidez fue mayor en las tobas de CV Cerro de Pasco (71,25 t CaCO₃/1000t) y en el depósito antropogénico - residuo minero (132,19 t CaCO₃/1000t y 56,25 t CaCO₃/1000t); en cambio, el potencial de acidez fue menor en el Grupo Cabanillas, Formación Pocobamba-miembro Shuco, y depósitos aluvial, glacial y glacial-fluvial, que presentaron PA menor a 13,44 t CaCO₃/1000t.

Según los criterios de clasificación de la prueba ABA, las rocas metamórficas del Grupo Cabanillas y las tobas del C.V. Cerro de Pasco bajo potencial para generar acidez (PNN: incertidumbre; RPN: probable generador de acidez); en cambio los depósitos antropogénicos presentaron alto potencial para generar acidez debido al PNN de -119,41 y -56,25 t CaCO₃/1000t y RPN menor a 1; por el contrario, Formación Pocobamba-miembro Shuco, y depósitos aluvial, glacial y glacial-fluvial no presentan potencial para generación de drenaje ácido debido al bajo PA y alto PN asociado a la dolomita.

Los resultados de la prueba estática de balance ácido-base (ABA) para evaluar la generación de acidez y el potencial de neutralización de las rocas de las unidades litoestratigráficas y rocas volcánicas, se presentan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4.

Resultados de la prueba ABA en las unidades litoestratigráficas aledañas a los PAM Excelsior y Quiulacocho

Parámetros	Unidad	Grupo Cabanillas			Fm. Pocobamba Mbo. Shuco		CV Cerro de Pasco - Diatrema	Depósito aluvial	Depósito Glaciar	Depósito Glaciar-fluvial	Depósito antropogénico	
		RC-CG-EXC2	RC-CG-EXC8	ROxP-13	ROxP-11	ROxP-12	RC-CG-EXC1	RC-CG-EXC7	RC-CG-QUI2	RC-CG-QUI6	RM-EXC2	RM-QUI2
Azufre Total	%	0,25	0,4	0,04	0,01	0,02	2,31	0,4	0,46	0,44	9,15	3,61
Grado de Efervescencia	-	1	1	1	-	-	3	4	4	4	2	-
pH en Pasta	Unidades pH	7,380	4,200	7,13	8,46	8,4	8,050	8,060	8,220	8,060	3,89	3,77
Potencial de Acidez Máximo	CaCO ₃ /100t	5,94	6,88	0,94	< 0,30	0,31	71,25	8,44	13,44	11,88	132,19	56,25
Potencial de Neutralización	CaCO ₃ /100 t	1,06	<1,00	3,28	613,3	734,05	56,83	292,27	307,89	112,72	12,78	<1,00
Potencial de Neutralización Neto	CaCO ₃ /100 t	-4,88	-6,88	2,34	613,3	733,74	-14,42	283,83	294,45	100,84	-119,41	-56,25
Relación NP/MPA	-	0,18	<0,01	3,49	NA	>2000	0,80	34,63	22,91	9,49	0,1	<0,01
Clasificación según los criterios de la prueba ABA												
Conclusión de criterio 1 (PNN=PN-PA) ^(a)	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre	No PGA	No PGA	Incertidumbre	No PGA	No PGA	No PGA	No PGA	PGA	PGA
Conclusión de criterio 2 (ratio RPN=PN/PA) ^(b)	PGA	PGA	No PGA	No PGA	No PGA	PGA	No PGA	No PGA	No PGA	No PGA	PGA	PGA

Fuente: Elaboración propia

Nota: PAG: potencial de generar ácido; No PGA: no presenta potencial para generar ácido

Criterios de clasificación de la prueba ABA:

(a): Criterio 1: Para un PNN menor a cero, la muestra es «generadora neta de ácido». Sin embargo, para un PNN que varía entre -20 y +20 kg CaCO₃/Ton de muestra, corresponde a un rango de «incertidumbre». Para valores mayores a +20 kg CaCO₃/Ton, se considera a la muestra como «potencial no generador de ácido (PNGA)»; mientras que para valores menores a -20 kg CaCO₃/Ton se considera como «potencial generador de ácido».

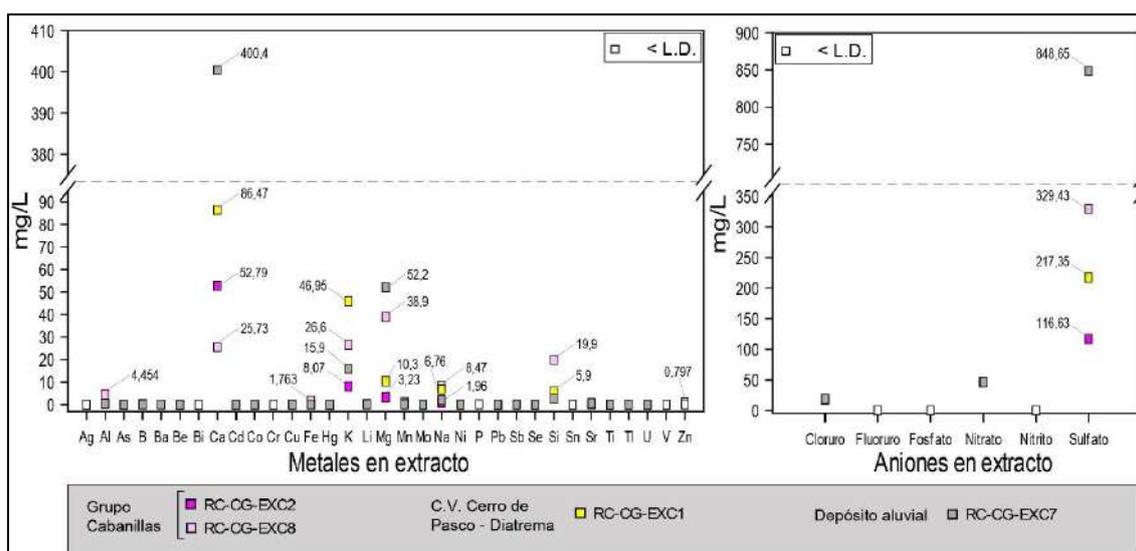
(b): Criterio 2: Para un RPN= PN/PA < 1:1 es «probable que se genere acidez», mientras que para el rango de PN/PA entre 1:1 y 3:1 corresponde a una zona de «incertidumbre». Cuando el PN/PA > 3:1, la muestra es «potencial no generador de acidez (PNGA)».

5.2.3. Prueba de lixiviación de metales

Aledaño al CP Champamarca, las rocas metamórficas del **Grupo Cabanillas** poseen la capacidad de lixiviar calcio, magnesio, potasio, silicio, sodio, aluminio, sulfato (116,63 mg/L a 329,43 mg/L), y en menor concentración hierro y zinc. Las tobas del diatrema del **C.V. Cerro de Pasco** presenta capacidad de lixiviar calcio, potasio, magnesio, sodio, silicio y sulfato (217,35 mg/L). Finalmente, los **depósitos aluviales** destacan por la alta solubilidad de calcio, seguido de concentraciones normales de magnesio, potasio, sodio, silicio y sulfato (848,65mg/L) (Figura 5.25).

Figura 5.25.

Concentración de metales y aniones lixiviables por la prueba Shake Flask de las unidades litoestratigráficas aledaños al PAM Excelsior



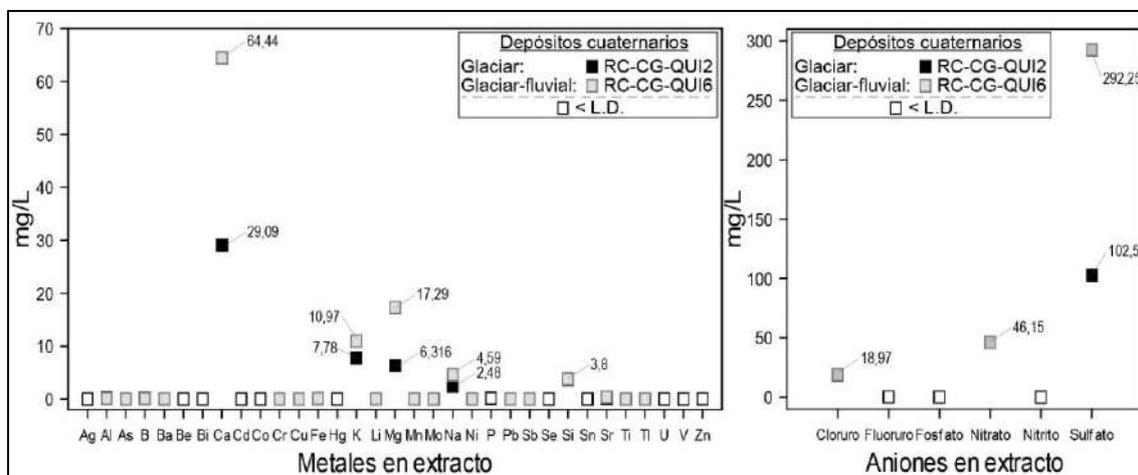
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los íconos de color blanco corresponden a elementos con concentraciones menores al límite de detección (< L.D.).

Aledaño al CP Quiulacochoa, los depósitos cuaternarios glacial y glacial-fluvial poseen la capacidad de lixiviar sulfato, calcio, magnesio, potasio, silicio y sodio. En cuanto a los elementos calcófilos (asociados a sulfuros), el arsénico, plomo y cobre presentaron bajas concentraciones, en tanto que el cadmio, zinc y mercurio se encontraron debajo del límite de detección (< L.D.). Se resalta que, el depósito Glacial-fluvial presentó mayor concentración que el depósito Glacial, del cual fue erosionado (Figura 5.26).

Figura 5.26.

Concentración de metales y aniones lixiviables por la prueba Shake Flask de las unidades litoestratigráficas aledaños al PAM Quiulacocha



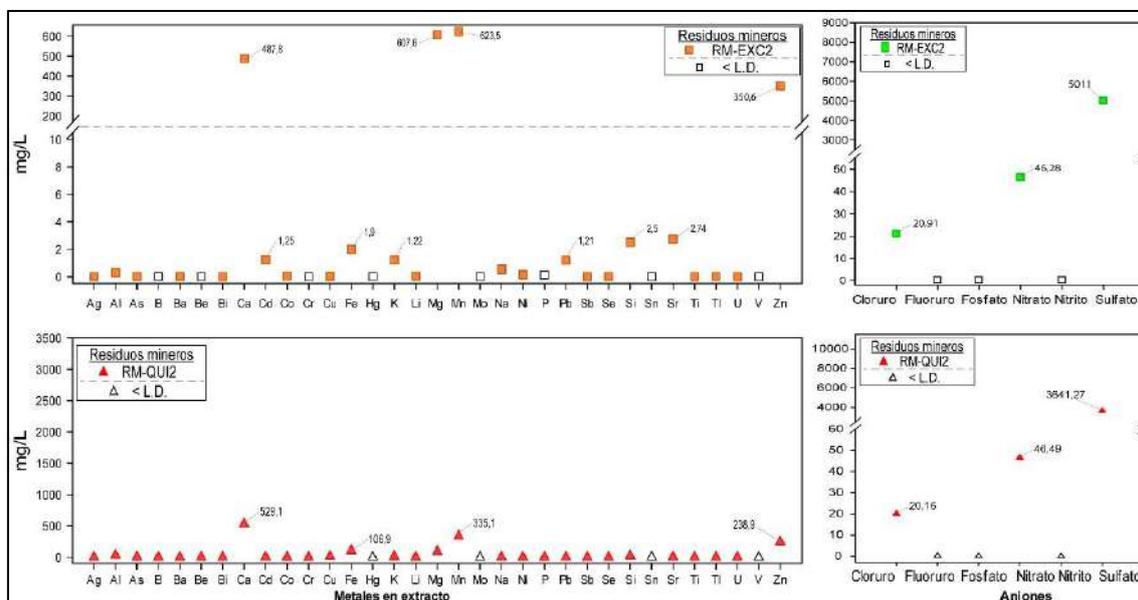
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los íconos de color blanco corresponden a elementos con concentraciones menores al límite de detección (< L.D.).

Respecto a los depósitos antropogénicos, aledaño al CP Champamarca, el residuo minero del punto RM-EXC2, presenta la capacidad de lixiviar sulfato, manganeso, magnesio, calcio y zinc, y en menor proporción estroncio, silicio, hierro, cadmio, potasio y plomo; mientras que, aledaño al CP Quiulacocha, los residuos mineros ubicados al pie del talud del dique de contención presentan capacidad de lixiviar sulfato, nitrato, calcio, manganeso, zinc, hierro y en menor proporción magnesio, aluminio silicio y cobre (Figura 5.27).

Figura 5.27.

Concentración de metales y aniones lixiviables por la prueba Shake Flask de las unidades litoestratigráficas aledaños al PAM Quiulacocha



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los íconos de color blanco corresponden a elementos con concentraciones menores al límite de detección (< L.D.).

Se precisa que las concentraciones de los elementos calcófilos como arsénico, cadmio, plomo y zinc, elementos litófilos de interés como magnesio y manganeso, y el anión sulfato lixiviables del material aluvial, glaciar y glaciar-fluvial, descritas anteriormente son menores en relación con las concentraciones reportadas en los PAM Excelsior y Quiulacocha, y depósitos antropogénicos -residuos mineros.

5.2.4. Extracción secuencial¹⁷

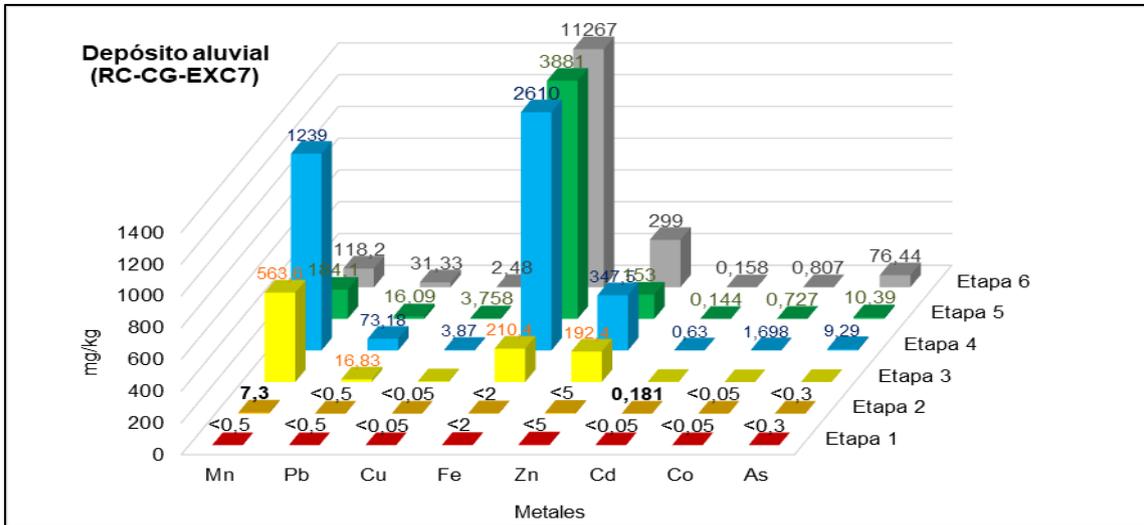
Dentro de este análisis se priorizó a los elementos predominantes y potencialmente tóxicos como manganeso, hierro, plomo, zinc, cobre, cadmio, arsénico y cobalto.

El depósito aluvial ubicado al sur del CP Champamarca presentó biodisponibilidad de manganeso (7,3 mg/kg) y cadmio (0,181 mg/kg); mientras que los demás elementos fueron menores al límite de cuantificación del método (Figura 5.28).

¹⁷ Este método de extracción secuencial determina la especiación de los metales trazas en rocas y complementa al análisis de metales totales. Las etapas de metales pesados que comúnmente se suelen diferenciar en los sólidos mediante este tipo de metodologías son: extraíbles (etapa 1), intercambiable y adsorbida (etapa 2), ligado a carbonatos (etapa 3), reducibles y óxidos Fe (etapa 4), ligado a materia orgánica (etapa 5) y etapa residual (etapa 6); en donde, las dos primeras etapas son consideradas como biodisponibles.

Figura 5.28.

Concentración de metales de las extracciones secuenciales por la prueba de Tessier del depósito aluvial aledaño al CP Champamarca

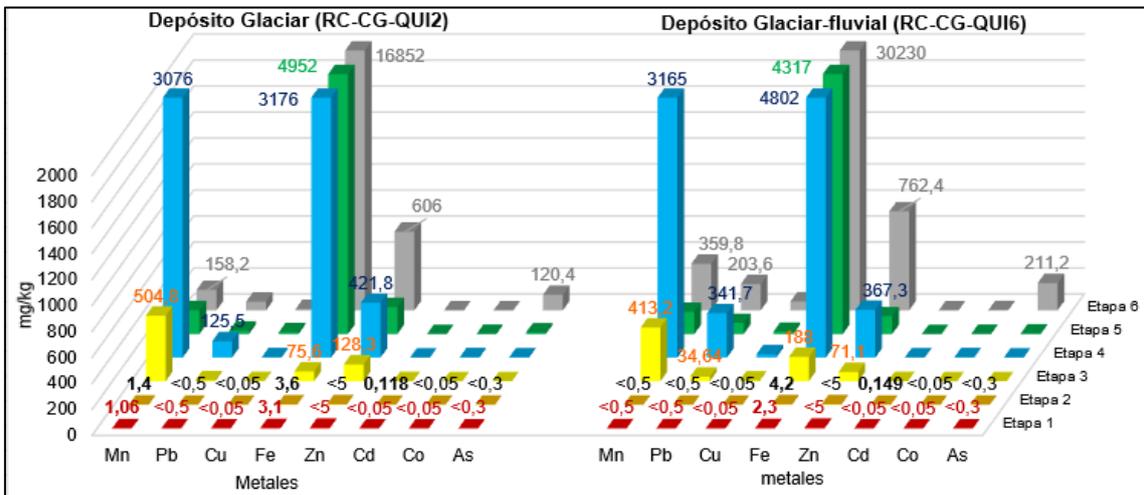


Fuente: Elaboración propia.

Aledaño al CP Quiulacocho, el depósito Glaciar presentó disponibilidad en las etapas extraíble e intercambiable al manganeso y hierro, y a cadmio solo en la etapa intercambiable. Por otra parte, el depósito Glaciar-fluvial presentó disponibilidad de hierro de forma extraíble y hierro y cadmio en la etapa intercambiable. En la etapa 3 (ligado a carbonatos) resaltó las concentraciones de manganeso, hierro, zinc, plomo y cobre, los cuales pueden ser liberados con descensos de pH del medio (Figura 5.29).

Figura 5.29.

Concentración de metales de las extracciones secuenciales por la prueba de Tessier de los depósitos cuaternarios aledaños al PAM Quiulacocho

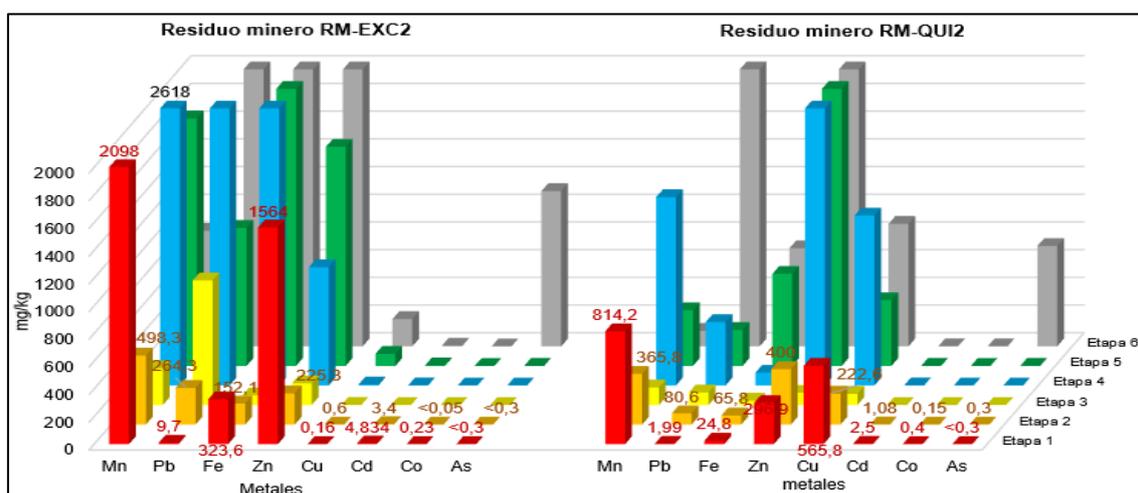


Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los depósitos antropogénicos, el residuo minero RM-EXC2 ubicado aledaños al CP Champamarca presentó disponibilidad en la etapa extraíble de manganeso (2098 mg/kg), zinc (1564 mg/kg), hierro (323,6 mg/kg), plomo y cadmio, y en menor concentración cobre y cobalto. Aledaño al CP Quiulacocha, el residuo minero del punto RM-QUI2 presentó disponibilidad en etapa extraíble de manganeso (814,2 mg/kg), cobre (565,8 mg/kg), zinc (296,9 mg/kg), hierro (24,8 mg/kg), cadmio, plomo y cobalto (Figura 5.30).

Figura 5.30.

Concentración de metales de las extracciones secuenciales por la prueba de Tessier de los depósitos antropogénicos-residuos mineros aledaños a los PAM Excelsior y Quiulacocha



Fuente: Elaboración propia.

6.1.1.1. Análisis mineralógico¹⁸

Según los resultados del análisis mineralógico por DRX, el Grupo Cabanillas, presentó en los niveles de pizarras (RC-CG-EXC8) abundantes minerales de cuarzo, seguido de clorita y plagioclasa (andesina); los niveles de arenisca (RC-CG-EXC10) presentan abundante cuarzo, acompañado de óxidos de hierro, sericita, biotita y goethita, y trazas de moscovita, zircón, rutilo, piritita y turmalina. Las brechas en cuarcitas

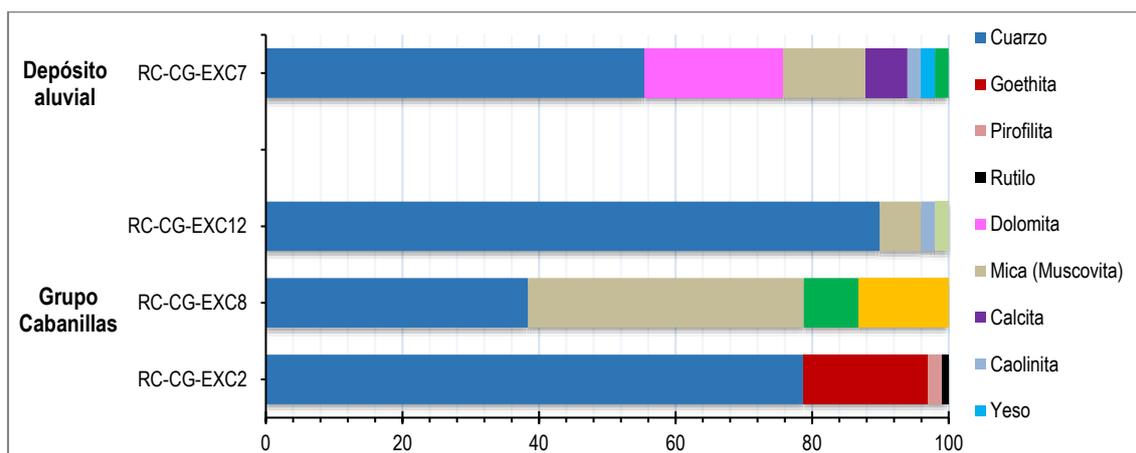
¹⁸ El análisis mineralógico se realizó por dos métodos distintos. Las muestras de roca alteradas, oxidadas o fracturadas y los depósitos cuaternario fueron analizados por difracción de rayos X (DRX), el cual indica la composición mineralógica total, a excepción de los minerales en concentraciones menores a 1 %, los cuales requieren otra escala de análisis. El otro método corresponde al análisis por microscopía óptica aplicado en muestras sólidas de roca.

y hornfels (RC-CG-EXC12) presentaron abundante cuarzo, acompañado de moscovita, caolinita y esvanbergita; y los niveles de cuarcitas del sector Ayapoto (RC-CG-EXC2) presentaron abundante cuarzo y óxidos de hierro (goethita), acompañado de pirofilita y rutilo.

En tanto, el contenido mineral del depósito aluvial muestreado en la parte sur del A.H. Champamarca presentó principalmente cuarzo, dolomita y moscovita, acompañado de calcita, caolinita, yeso y clorita. Estos minerales corresponderían al aporte del intemperismo y erosión de rocas calcáreas (calizas y dolomitas) y metamórficas (pizarras, esquistos, hornfels y cuarcitas). Ver Figuras 5.31 y 5.32.

Figura 5.31.

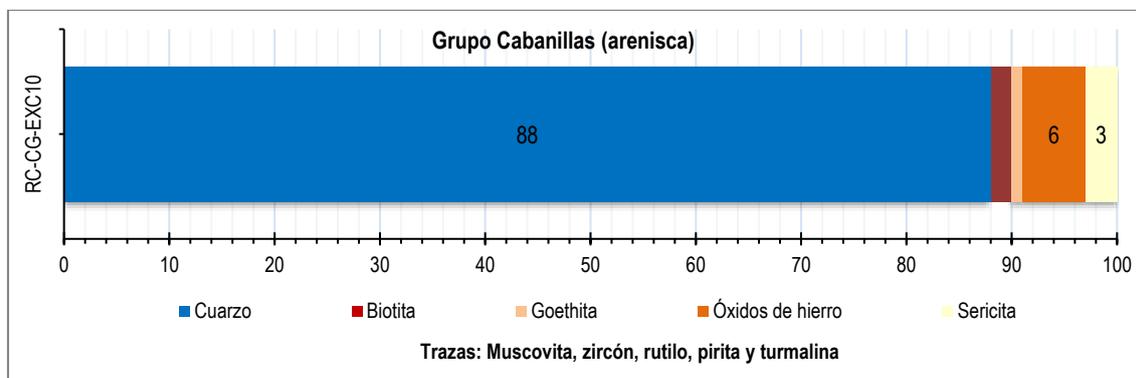
Composición mineralógica por DRX del Grupo Cabanillas y depósito aluvial aledaños al PAM Excelsior



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.32.

Composición mineralógica por petrominerografía del Grupo Cabanillas aledaño al PAM Excelsior

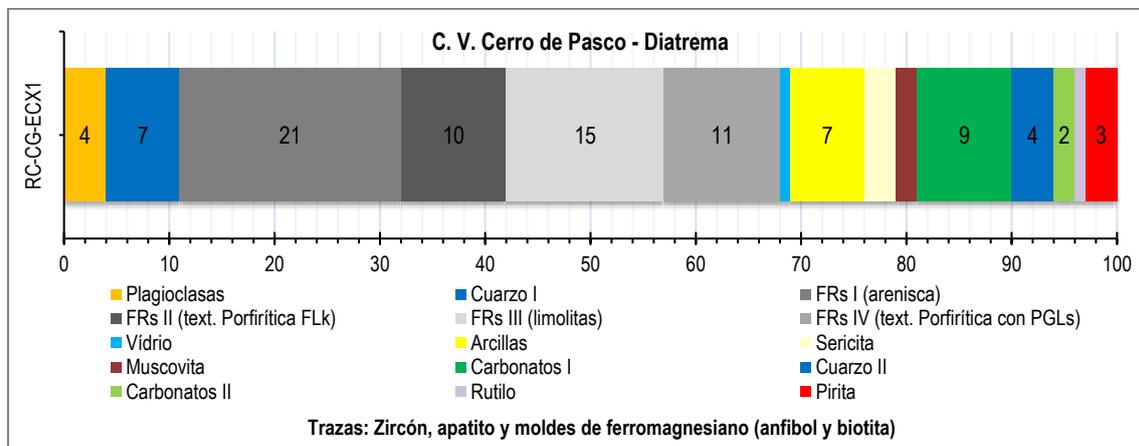


Fuente: Elaboración propia.

Las tobas del C.V. Cerro de Pasco (RC-CG-EXC1) fueron clasificados como tobas litocristalinas debido al alto porcentaje de fragmentos de rocas (areniscas, textura porfirítica con feldespatos, limolitas y textura porfirítica con plagioclasas), además presentaron minerales principales de cuarzo y plagioclasas con trazas de apatito y zircón, englobado en matriz de vidrio, de forma secundaria presenta arcillas, sericita, moscovita, carbonatos (I y II), cuarzo II, rutilo y 3 % de pirita (Figura 5.33).

Figura 5.33.

Composición mineralógica por petrominerografía del diatrema del CV Cerro de Pasco aledaño al PAM Excelsior

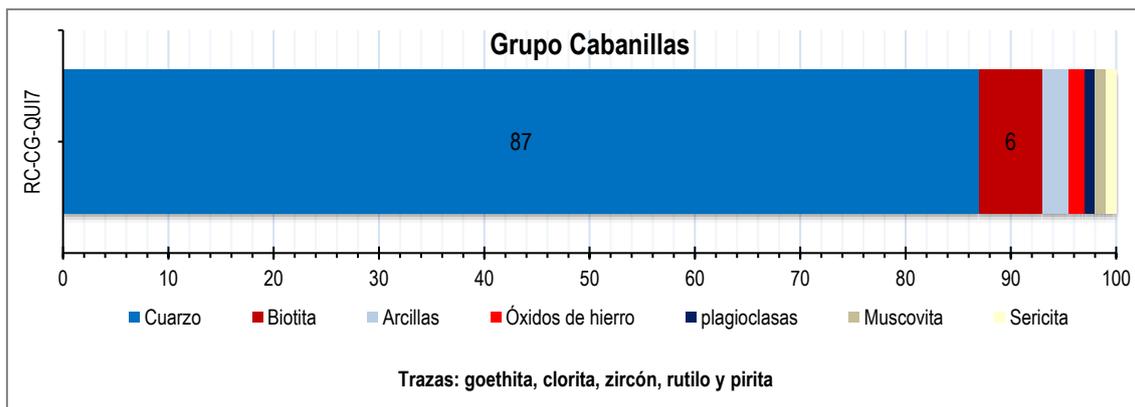


Fuente: Elaboración propia.

La muestra RC-CG-QUI7 tomada en el Grupo Cabanillas fue clasificada como metarenisca, presenta textura granoblástica débilmente foliada y alteración con oxidación débil, sericitización débil, argilización débil y cloritización incipiente. Contiene principalmente cristales de cuarzo, biotita, arcillas, óxidos de hierro, plagioclasas, muscovita, sericita y trazas de goethita, clorita, zircón, rutilo y pirita (Figura 5.34).

Figura 5.34.

Composición mineralógica por petrominerografía del diatrema del Grupo Cabanillas aledaño al CP Quiulacocho

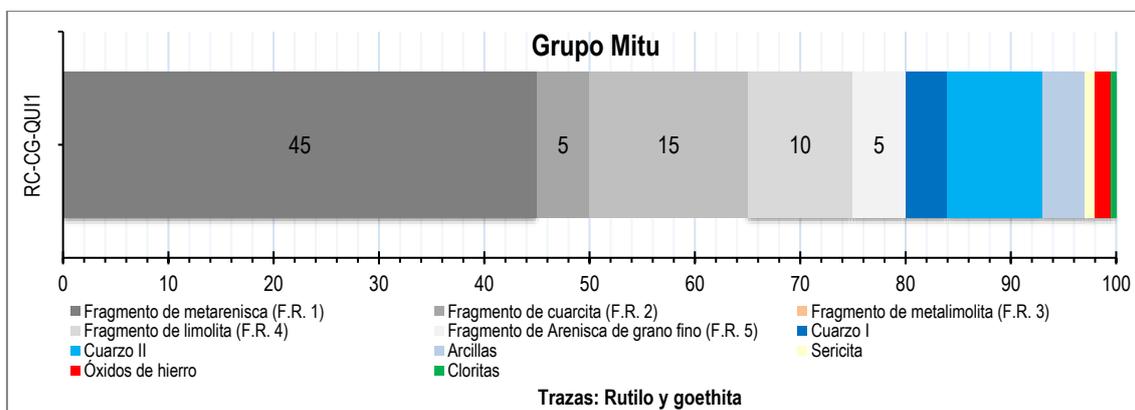


Fuente: Elaboración propia.

El Grupo Mitu, analizado en el punto RC-CG-QUI1, fue clasificado como **conglomerado** de textura clástica y alteración con oxidación débil y cloritización muy débil. Esta roca se encuentra compuesto principalmente por fragmentos de rocas (metarenisca, cuarcita, metalimolita, limolita y arenisca de grano fino) y fragmentos de cristales de cuarzo, englobado en matriz de cuarzo, arcillas y sericita, adicionalmente presenta minerales secundarios como rutilo, goethita, cloritas y óxidos de hierro (Figura 5.35).

Figura 5.35.

Composición mineralógica por petrominerografía del Grupo Mitu aledaño al CP Quiulacocho



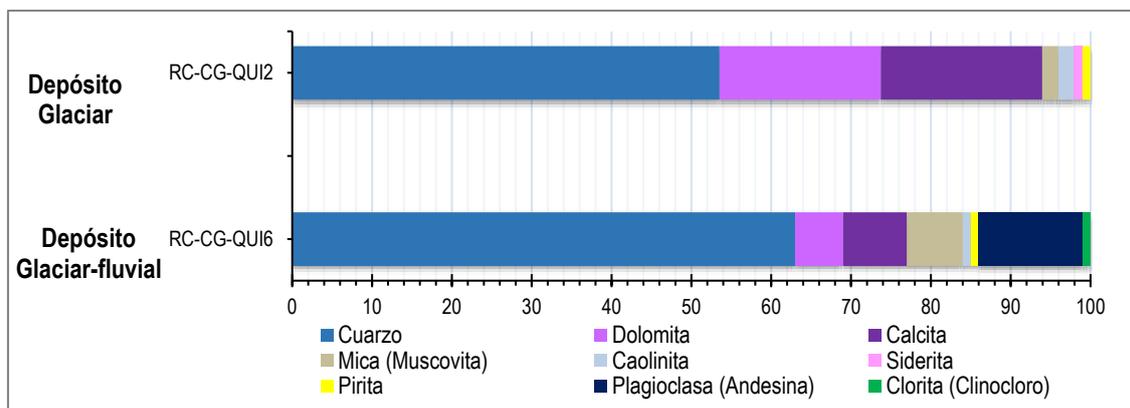
Fuente: Elaboración propia.

El contenido mineral de los depósitos cuaternarios presentó principalmente cuarzo, dolomita, calcita, muscovita, caolinita y plagioclasa, acompañado de trazas (<1%) de siderita, pirita y clorita. Estos minerales provienen de la erosión de las rocas metamórficas del Grupo Cabanillas (pizarras, esquisto y areniscas) y clásticas del Grupo

Mitu (areniscas y conglomerados) y Formación Pocobamba-Miembro Shuco (conglomerados con clastos de calizas), ver Figura 5.36.

Figura 5.36.

Composición mineralógica por DRX de los depósitos glaciar y glaciar-fluvial aledaño al CP Quiulacocha

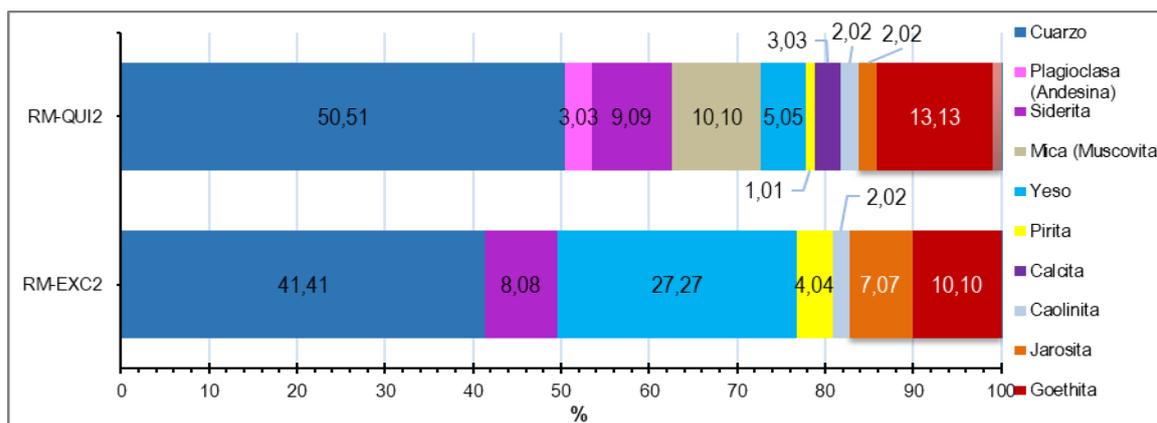


Fuente: Elaboración propia.

El contenido mineral de los residuos mineros se caracteriza principalmente por cuarzo, siderita, yeso, goethita, jarosita, pirita, calcita, plagioclasa, moscovita y caolinita (Figura 5.37).

Figura 5.37.

Composición mineralógica por DRX de los depósitos antropogénicos-residuos mineros aledaños a los CP Champamarca y Quiulacocha.



Fuente: Elaboración propia.

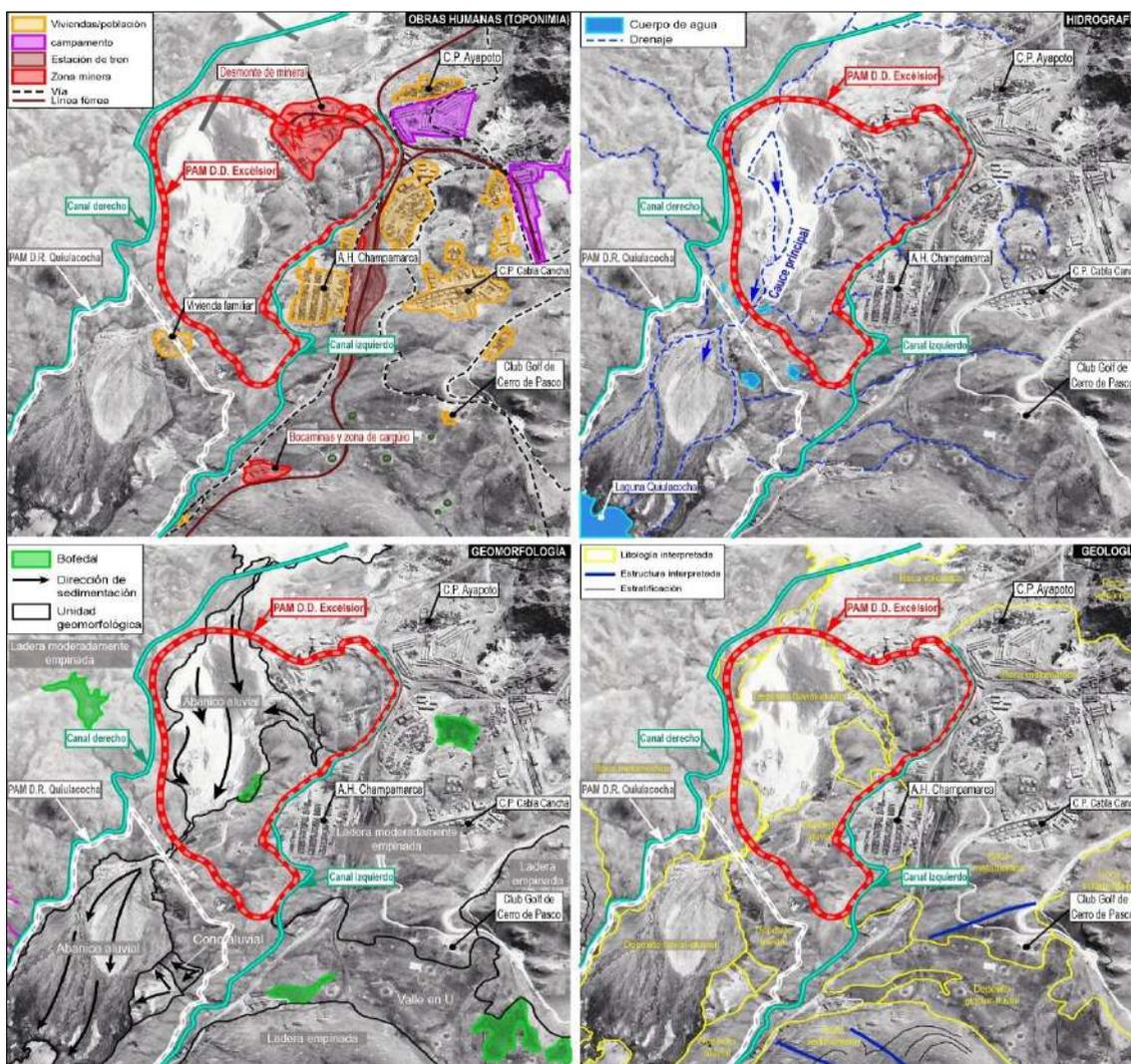
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Estado de las actividades en el área de estudio en 1962

En esta sección se presentan los resultados de la interpretación de las fotografías aéreas¹⁹ del 13 de julio de 1962 (códigos 21429 y 21430, ubicado en el cuadrángulo 22K), que abarcó el ámbito de influencia de los PAM Excelsior y Quiulacocho. La Figura 6.1 muestra las anotaciones sobre la fotografía de las obras humanas y toponimia, hidrografía, geomorfología e interpretación geológica.

Figura 6.1.

Interpretación de fotografías aéreas de 1962 del ámbito de los PAM Excelsior y Quiulacocho



Fuente: Elaboración propia.

¹⁹ Corresponde al programa de levantamiento fotográfico realizadas por el Servicio Aerofotográfico Nacional (SAN) en el periodo 1955 al 2003. El objetivo de este levantamiento fue la elaboración de cartografía básica, catastro urbano y rural, entre otras.

La interpretación de las fotografías basado en la tonalidad y textura²⁰ permitió identificar cuatro aspectos importantes, los cuales son descritos a continuación:

Obras humanas:

Las fotografías aéreas evidencian viviendas ubicadas en el sector este del área de interpretación (A.H. Champamarca y C.P. Cabla Cancha), en el sector noreste (C.P. Ayapoto), en la zona suroeste (vivienda familiar) y viviendas esporádicas en el actual club El Golf de Cerro de Pasco; por otra parte, se identificó 2 campamentos - probablemente mineros- ubicados entre los CC.PP. Ayapoto y Cabla Cancha, y una estación de tren establecido al lado oeste del A.H. Champamarca; adicionalmente, se observó 2 zonas mineras, uno en el sector sur (posibles bocaminas y zona de carguío de mineral) y otro en la zona norte (deposición de desmonte de mineral). En cuanto a las vías de comunicación, se identificó carreteras y vías férreas de orientación suroeste a noreste.

Hidrografía:

Se identificó un cauce principal en la parte central del área de estudio, cuyas aguas desembocan hacia la laguna Quiulacocha. A esta red hidrográfica se conectan quebradas y arroyos desde ambos márgenes, resaltando las redes ubicadas alrededor a los sectores Champamarca y Cabla Cancha. Los cuerpos de agua resaltantes se ubican en la parte baja del A.H. Champamarca y en la margen derecha del cauce principal.

Geomorfología:

El área de estudio muestra principalmente laderas moderadamente empinadas en ambos márgenes del cauce principal, a excepción del sector sur y sureste donde las laderas se encuentran empinadas asociadas a rocas sedimentarias. En el sector sureste se evidenció un valle en U característico de erosión glacial. EL cauce principal presenta

²⁰ El tono en las fotografías se refiere a la intensidad relativa de luz reflejada por el terreno y registrada en la película. En cambio, la textura representa la frecuencia de cambio de tonalidad en la foto (Gutierrez, 2005)

dos abanicos aluviales separados de un tramo macizo en la parte central, además, muestra conos aluviales en la desembocadura de las quebradas aportantes.

Geología²¹:

Se identificó rocas metamórficas en ambas márgenes del cauce principal (tonalidad gris medio, drenaje espaciado y relieve denudado), rocas sedimentarias en las partes altas de las laderas del sector sur y sureste (tonalidad gris claro, textura gruesa, drenaje espaciado y perfil en V), rocas volcánicas en la parte norte y noreste (tono gris claro a blanco, textura moteada y poco uniforme y drenaje poco definido) y depósitos cuaternarios glacial-fluvial, aluvial y fluvial-aluvial (tono gris medio a gris oscuro y blanco, textura de erosión, drenaje denso e irregular y presencia de vegetación). Adicionalmente, se identificó estructuras (fracturas o alineamientos) en las rocas sedimentarias y metamórficas.

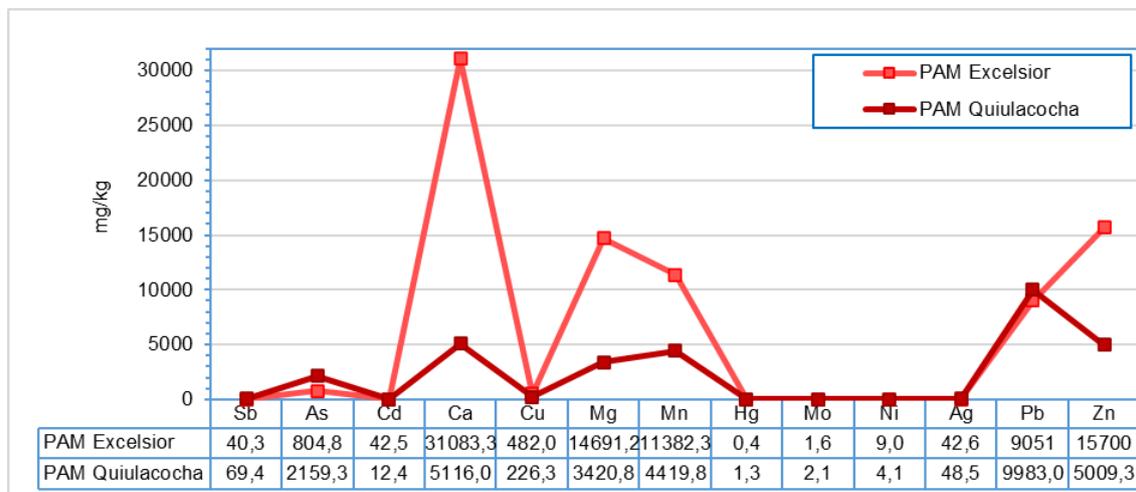
6.2. Background geoquímico basado en metales totales

Las evaluaciones ambientales realizadas en 2020 por parte del OEFA, reportaron que el material del depósito de desmonte Excelsior presenta altas concentraciones de calcio, zinc, magnesio, manganeso, plomo y arsénico, y cobre en menor concentración. Mientras que el material de relave de Quiulacocha se caracteriza por tener altas concentraciones de plomo, zinc, calcio, manganeso, arsénico y magnesio, y cobre en menor concentración (Figura 6.2).

²¹ La interpretación geológica comprendió la interpretación de capas, afloramientos, estructuras y otros rasgos, asimismo consideró el tipo de red hidrográfica y unidades geomorfológica.

Figura 6.2.

Concentraciones promedio de metales de los materiales de los PAM Excelsior y Quiulacocha



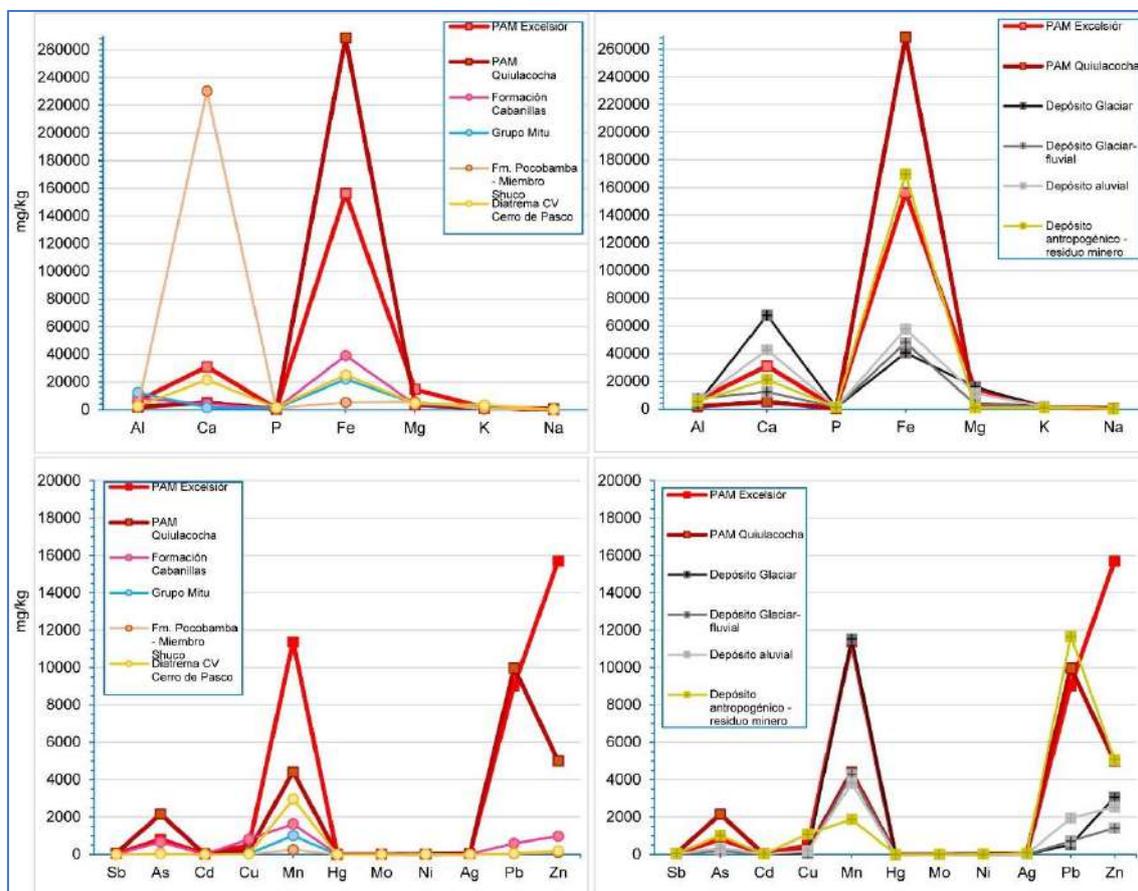
Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados concuerdan con los estudios realizados por Smuda et al. (2007) en el depósito Excelsior, quien registró elementos como Pb-Zn, Ag-Bi-Cu asociados a pirita, esfalerita, galena y enargita, y en menor porcentaje de tennantita, covelita y cerusita (presentan alto potencial para generar drenaje ácido de hasta 2,8 unidades de pH); provenientes del yacimiento polimetálico Cerro de Pasco; en tanto Wade *et al.* (2006) diferenció 2 tipos de relaves: ricos en zinc y plomo (anterior al dique flotante), y ricos en cobre (posterior al dique flotante), con menor producción de DAM) debido a la neutralización por efecto de los carbonatos subyacentes (dolomita y siderita).

La comparación de concentraciones de metales totales de las unidades litológicas con respecto a las concentraciones de los PAM Excelsior y Quiulacocha muestran que los conglomerados de la Fm. Pocobamba-Miembro Shuco y depósito glaciar presenta mayor concentración de calcio mayores a los PAM, y que los depósitos antropogénicos contienen altas concentraciones de hierro, similar al material del PAM Excelsior. Por otra parte, resaltan las altas concentraciones de arsénico, plomo y zinc del Grupo Cabanillas, y manganeso, plomo y zinc de los depósitos cuaternarios glaciar, glaciar-fluvial y aluvial (Figura 6.3).

Figura 6.3.

Comparación de concentraciones de metales entre las unidades litológicas y el material de los PAM Excelsior y Quiulacocho

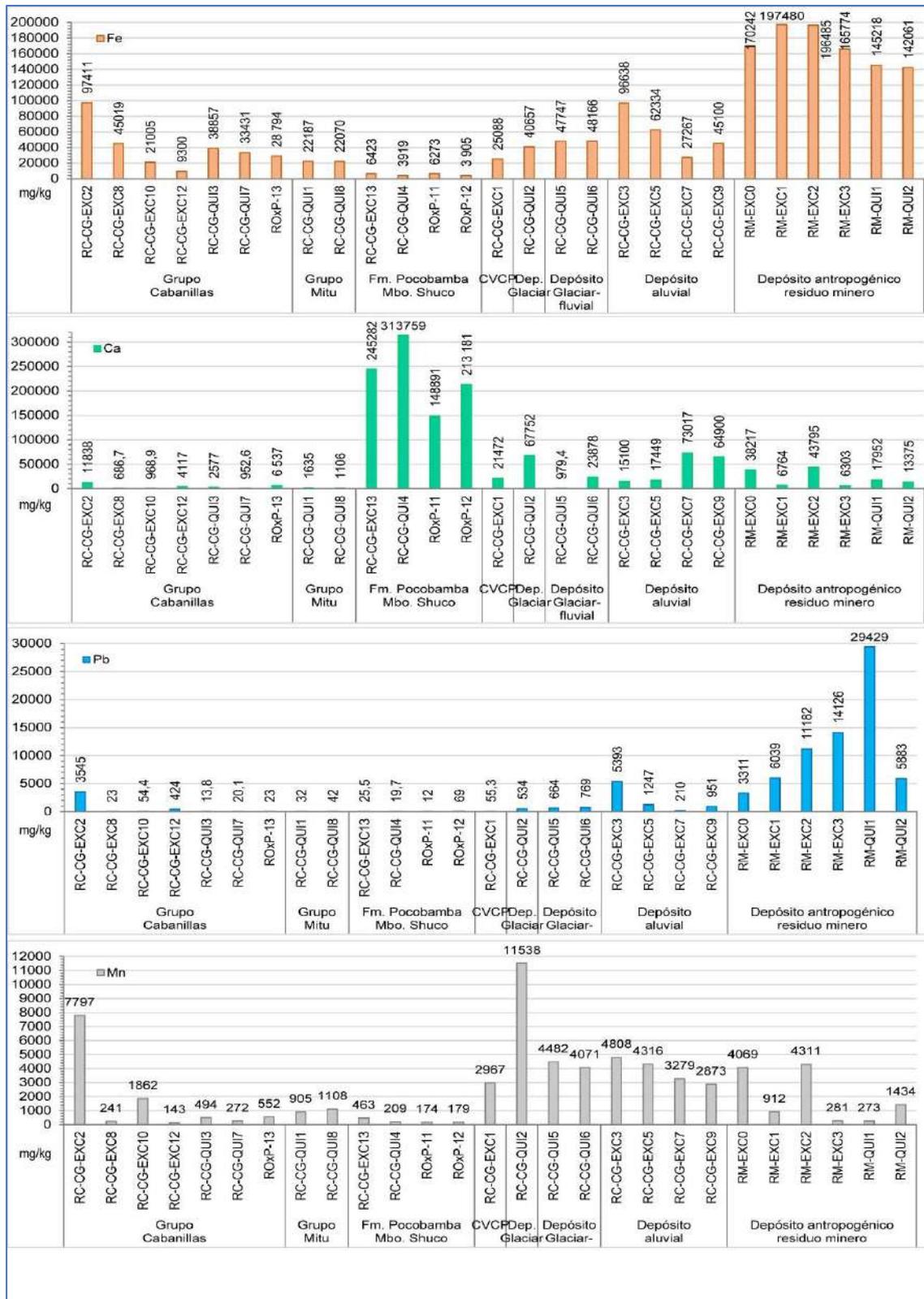


Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la distribución de los metales de interés y EPT, las concentraciones de hierro, plomo, zinc, cobre y arsénico fueron mayores en el depósito antropogénico, en la cuarcita del Grupo Cabanillas (sector Ayapoto) y en el depósito aluvial (punto RC-CG-EXC3) aledaño a estos afloramientos. Las mayores concentraciones de calcio fueron registradas en los conglomerados de la Formación Pocobamba-Miembro Shuco. La mayor concentración de manganeso fue registrada en el material glaciar ubicado al este del CP Quiulacocho y en la cuarcita del Grupo Copacabana que aflora en el sector Ayapoto (Figura 6.4 y 6.5).

Figura 6.4.

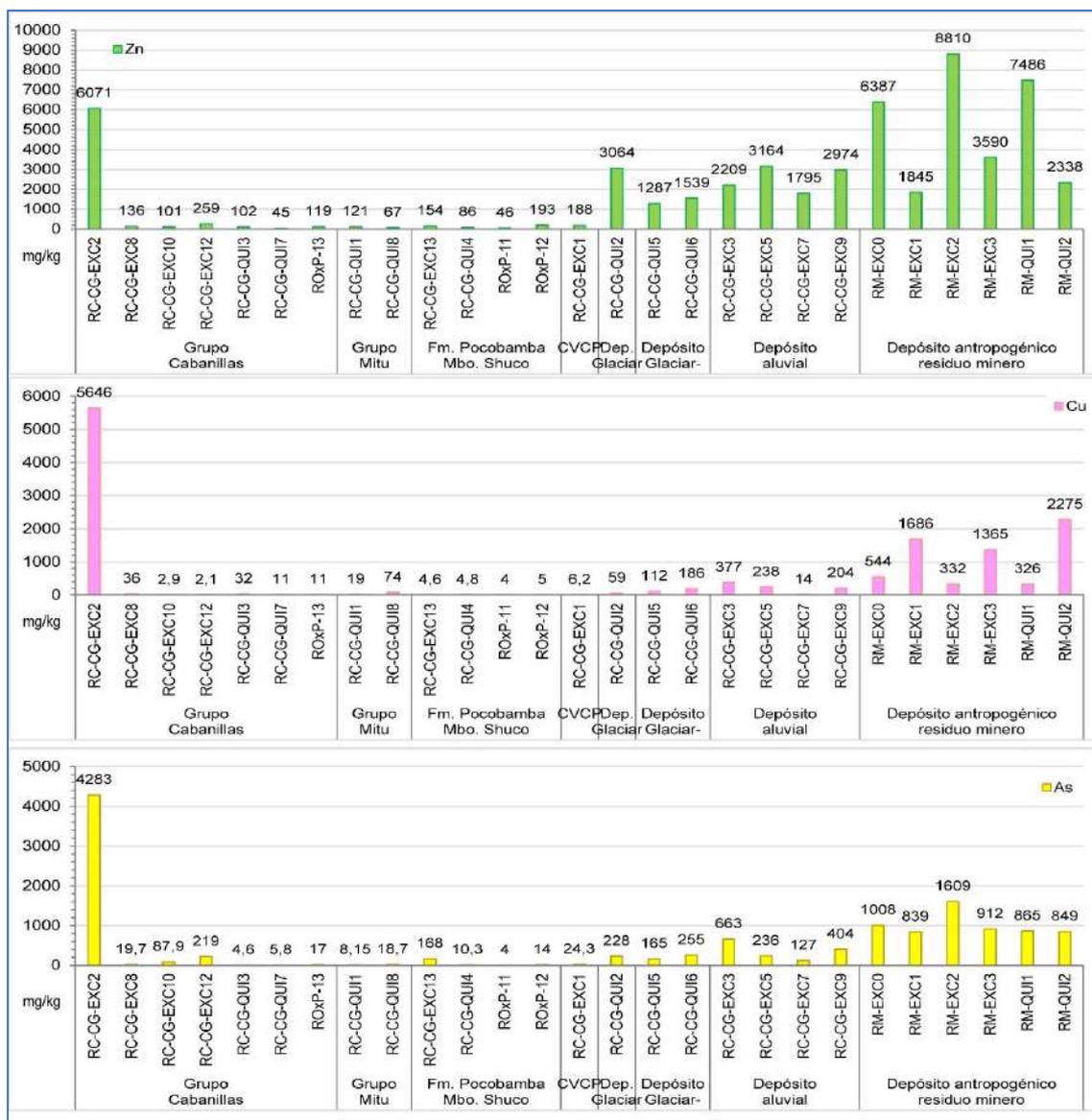
Distribución de concentraciones de hierro, calcio, plomo y manganeso en las unidades litológicas del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.5.

Distribución de concentraciones de zinc, cobre y arsénico en las unidades litológicas del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

6.2.1. Fuentes de generación de drenaje ácido de roca

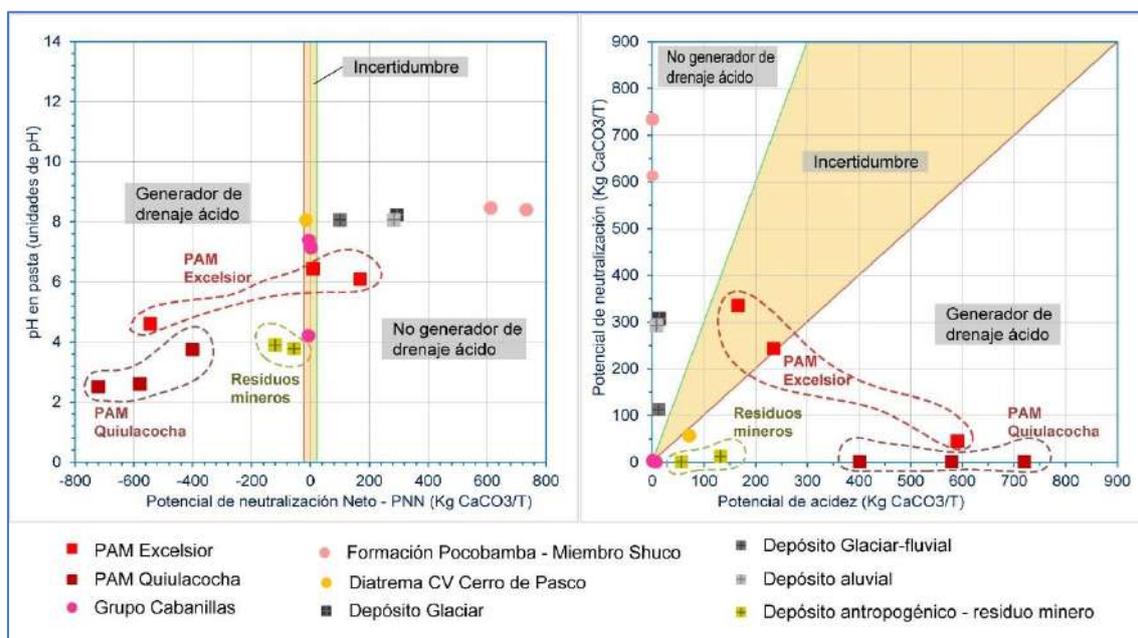
El material de los PAM Excelsior y Quiulacochoa presentan **alto** potencial para generar DAM (en la mayoría de las muestras) en el rango de 2,51 a 6,43 unidades de pH, con PNN menores a -401,25 Kg CaC03/T; otro material con potencial para generar drenaje ácido corresponde al depósito antropogénico - residuo minero que presentó un

PNN entre -119,41 Kg CaCO₃/T a -56,25 Kg CaCO₃/T, con pH en pasta de 3,61 a 9,15 unidades.

Las rocas del Grupo Cabanillas y CV Cerro de Pasco fueron clasificados como posibles generadores de DAR, mientras que la Formación Pocobamba-Miembro Shuco, y los depósitos cuaternarios glaciario, glaciario-fluvial y aluvial no presentan potencial para generar DAR, debido al alto potencial de neutralización por el contenido de carbonatos, cuyo pH en pasta fue mayor a 8 unidades (Figura 6.6).

Figura 6.6.

Comparación del potencial para generar drenaje ácido de las unidades litológicas y los PAM Excelsior y Quiulacocho



Fuente: Elaboración propia

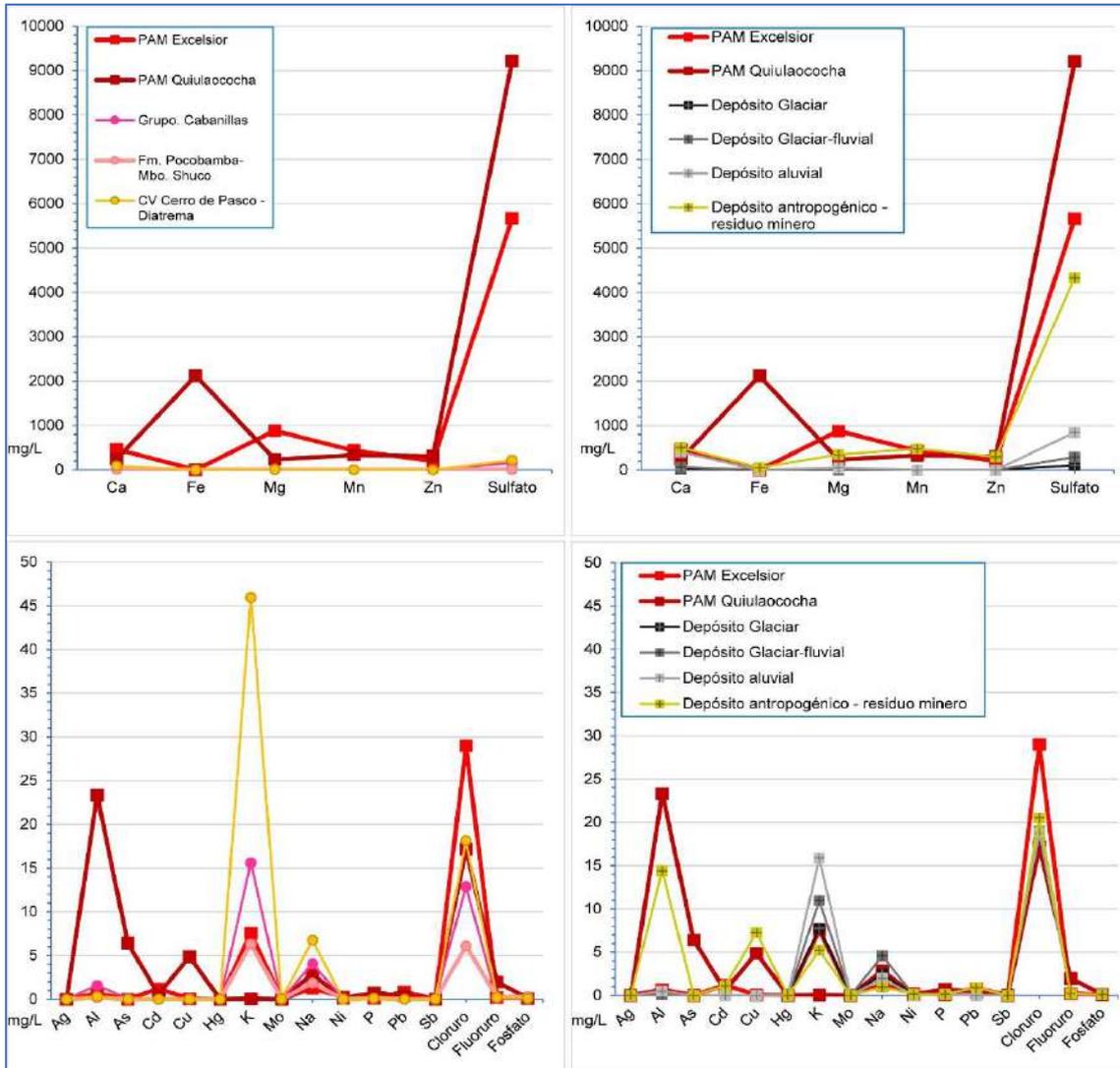
6.2.2. Disponibilidad de EPT lixiviables

Según la prueba de lixiviación SFE, el material de los PAM Excelsior y Quiulacocho presentan potencial para lixiviar sulfatos (mayores a 5000 mg/L), cloruros, hierro, magnesio, manganeso, calcio y zinc, y en cobre, plomo y arsénico en menor concentración. La unidad con similares concentraciones de lixiviación corresponde al depósito antropogénico que en promedio pueden lixiviar 4326,135 mg/L de sulfatos; a

diferencia de las demás unidades que registraron concentraciones menores a 848,65 mg/L (Figura 6.7).

Figura 6.7.

Comparación del potencial para lixiviar iones de las unidades litológicas, comparados con el material de los PAM Excelsior y Quiulacocha



Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Sobre la distribución espacial y las características petrológicas

1. La zona de estudio presenta unidades geológicas desde el Paleozoico al Cenozoico; siendo el más antiguo el Grupo Cabanillas de edad Devónico, seguido del Grupo Mitu de edad PermoTriásica; posteriormente, se depositaron los sedimentos continentales del Cenozoico de las formaciones Pocobamba - Miembro Shuco y Calera de edad Eoceno; luego, en el Mioceno se emplazó el complejo volcánico Cerro de Pasco compuesto por el domo de dacita y la diatrema controlado por la falla principal Cerro de Pasco o Longitudinal (FL); finalmente, se depositaron sobre las unidades precedentes los depósitos cuaternarios glaciario, fluvial-glaciario, aluvial y fluvial, y producto de la actividad minera antigua se presentan depósitos antropogénicos – residuos mineros (desmontes y relaves).

Sobre las características geoquímicas y mineralógicas

2. La composición geoquímica de las unidades litológicas es variable según la ubicación respecto a las estructuras principales y a la distancia del diatrema del CV Cerro de Pasco. En el sector Excelsior, las cuarcitas del Grupo Cabanillas en el CP Ayapoto presentan elevadas concentraciones de aluminio, zinc, cobre, arsénico, plomo; por otra parte, la Formación Pocobamba - Miembro Shuco resalta por las altas concentraciones de calcio y magnesio; y los depósitos cuaternarios aluviales contienen aluminio, magnesio, hierro, manganeso, zinc, plomo, calcio y potasio. En el sector Quiulacocha, el grupo Cabanillas presentó predominantemente hierro, magnesio, aluminio, calcio y potasio; el grupo Mitu presentó hierro, aluminio, magnesio, calcio, potasio y manganeso predominantemente; la Formación Pocobamba-Miembro Shuco se caracterizó por elevadas concentraciones de calcio; los depósitos Glaciario y Glaciario-fluvial presentaron preferencialmente calcio, hierro, magnesio, aluminio, potasio, zinc y fósforo.

3. El depósito antropogénico-residuo minero presentó elevadas concentraciones de hierro, plomo, zinc, calcio, cobre y arsénico, aluminio, potasio y fósforo, similar –en algunos casos– a las concentraciones de los PAM Quiulacocha y Excélsior.

Sobre el potencial de generación de drenaje ácido de roca

4. Las rocas del Grupo Cabanillas y el diatrema del Complejo volcánico Cerro de Pasco presentan bajo potencial para generar drenaje ácido (incertidumbre y posible generador) basado en los criterios PNN y RPN de la prueba ABA; mientras que las rocas de la Formación Pocobamba-Miembro Shuco y los depósitos cuaternarios aluvial, glaciar y fluvio-glaciar no presentan potencial para generar acidez debido al alto por el contenido de carbonatos, cuyo pH en pasta fue mayor a 8 unidades.
5. El depósito antropogénico - residuo minero presentó alto potencial para generar drenaje ácido debido a que según la prueba ABA reportó un PNN entre -119,41 Kg CaCO₃/T a -56,25 Kg CaCO₃/T, con pH en pasta de 3,61 a 9,15 unidades, relacionado al contenido de pirita reportado en el análisis mineralógico por DRX.

Sobre la disponibilidad geoquímica los elementos de preocupación

6. En el sector Excelsior, las rocas metamórficas del Grupo Cabanillas poseen la capacidad de lixiviar calcio, magnesio, potasio, silicio, sodio, aluminio, sulfato y en menor concentración hierro y zinc. Las tobas del C.V. Cerro de Pasco presentan capacidad de lixiviar calcio, potasio, magnesio, sodio, silicio y sulfato. Los depósitos aluviales destacan por la alta solubilidad de calcio, seguido de concentraciones normales de magnesio, potasio, sodio, silicio y sulfato.
7. En el sector Quiulacocha, los depósitos cuaternarios glaciar y glaciar-fluvial poseen la capacidad de lixiviar sulfato, calcio, magnesio, potasio, silicio y sodio, mientras que el arsénico, plomo y cobre presentaron bajas concentraciones.

8. Los depósitos antropogénicos-residuos mineros, aledaños al CP Champamarca presenta capacidad de lixiviar sulfato, manganeso, magnesio, calcio y zinc; mientras que, aledaño al CP Quiulacocha, los residuos mineros ubicados al pie del talud del dique de contención presentan capacidad de lixiviar sulfato, nitrato, calcio, manganeso, zinc, hierro.
9. La capacidad de lixiviación de EPT es mayor en los depósitos antropogénicos por el contenido litológico y mineral, respecto a las demás unidades caracterizadas, además, las concentraciones del extracto son elevadas y similares a los resultados de los PAM Excelsior y Quiulacocha.

RECOMENDACIONES

1. Considerar las concentraciones de metales totales, potenciar DAR y de lixiviación de EPT de las unidades litológicas como base de futuros estudios relacionados a determinar contaminación de suelos y agua por actividades antropogénicas.
2. Elaborar un plan de limpieza, remediación o plan de cierre (material impermeable) de los depósitos antropogénicos-residuos mineros donde se registraron altas concentraciones de EPT y potencial para generar drenaje ácido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, H. (1996). *Geología del yacimiento de Cerro de Pasco*. Segundo Simposium Internacional del Oro - Lima 1996, Sociedad Nacional de Minería y Petróleo (Comité Aurífero).
- Ángeles, C. (1999). *Los sedimentos cenozoicos de Cerro de Pasco: Estratigrafía, sedimentación y tectónica*. Sociedad Geológica del Perú, Volumen Jubilar N° 5.
- ASGMI (2022). *Manual de metodologías geoquímicas de países iberoamericanos*. Información Geoquímica para la Sociedad. Repositorio INGEMMET.
- Baumgartner, R. (2007). *Sources and evolution in space and time of hydrothermal fluids at the Cerro de Pasco Cordilleran base metal deposit, Central Peru*. *Terre & Environnement*, v. 66, 167 p.
- Baumgartner, R., Fontboté, L., and Vennemann, T. (2008). *Mineral zoning and geochemistry of epithermal polymetallic Zn-Pb-Ag-Cu-Bi mineralization at Cerro de Pasco, Peru*. *Economic Geology*, v. 103, p. 493–537.
- Baumgartner, R., Fontboté, L., Spikings, R., Ovtcharova, M., Schneider, J., Pace, L., and Gutjahr M. (2009). *Bracketing the age of magmatic-hydrothermal activity at the Cerro de Pasco epithermal polymetallic deposit, central Peru: A U-Pb and ⁴⁰Ar/³⁹Ar study*. *Economic Geology*, v. 104, p. 479–504.
- CCME (2016a). *Guidance manual for environmental site characterization in support of environmental and human health risk assessment*. Le Conseil canadien des ministères de l'environnement. Volumen 1
- Cobbing, J., Sanchez, A. y Martínez, W. (1996). *Geología de los Cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquián y Yanahuanca*. INGEMMET.
- Cobbing, E., Quispesivana, L. y Paz, M. (1996). *Geología de los cuadrángulos de Ambo, Cerro de Pasco y Ondores*. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 77, 238 p.

- Cueva, E. (2008). *Estratigrafía, sedimentología y tectónica de la Meseta de Bombón (Cerro de Pasco)*. Tesis Ing. Geólogo, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 123 p.
- Cueva, E., Romero, D., Cerpa, L. y Cárdenas, J. (2008). *Evolución sedimentológica de la Formación Pocobamba en el distrito de Huayllay, departamento de Cerro de Pasco (CD-ROM)*. Sociedad Geológica del Perú, 6 p.
- Einaudi, M.T. (1968). *Pyrrhotite-pyrite-sphalerite relations at Cerro de Pasco, Peru*. Ph.D. thesis, Cambridge, MA, Harvard University, 381 p.
- Einaudi, M.T. (1977). *Environment of ore deposition at Cerro de Pasco, Peru*. Economic Geology, v. 72, p. 893–924.
- Fernández G. y Cereceda C. (2021). Niveles de fondo de elementos traza en suelos de la subcuenca Linga - Arequipa, Perú. Boletín de la Sociedad Geologica del Perú, publicación N.º 14, ISSN 0079-1091.
- Graton, L.C., y Bowditch, S.I. (1936). *Alkaline and acid solutions in hypogene zoning at Cerro de Pasco*. Economic Geology, v. 31, p. 651–698.
- Gutiérrez, J. (2005). *Guía teórica de fotogeología*. Universidad de los Andes.
- INAP (2017). *Elemental composition of mineralized rocks*. Tomado de: [Elemental composition of mineralized rocks - GARDGuide](#)
- Jenks, W.F. (1951). *Triassic to Tertiary stratigraphy near Cerro de Pasco, Peru*. Geological Society of America Bulletin, 62(2): 203-220.
- Kusin, F., Azani, N., Syed Hasan, S. y Sulong, A. (2018). *Distribution of heavy metals and metalloid in surface sediments of heavily-mined area for bauxite ore in Pengerang, Malaysia and associated risk assessment*. CATENA, Volume 165.
- Lacy, W. (1949). *Types of pyrite and their relations to mineralization at Cerro de Pasco, Peru*. Unpublished Ph.D. thesis, Cambridge, MA, Harvard University, 193 p.
- Labor, 2006b Labor (2006b). *Balance de la Minería en Pasco*. Boletín Especial Participación N°2. Recuperado de:

http://www.laborpascooperu.org.pe/images/stories/pdfs_boletines/especiales/BoletinEspecial2.pdf

- Masciandaro, G., Macci, C., Peruzzi, E. (2013). *Materia orgánica-microorganismo-planta en la biorremediación del suelo: un enfoque sinérgico*. Rev Environ Sci Biotechnol 12, 399–419 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11157-013-9313-3>
- McLaughlin, D.H. (1924). *Geology and physiography of the Peruvian Cordillera. Departments of Junin and Lima*. Geological Society of America Bulletin, 35 (3).
- Mégard, F. (1978). *Étude géologique des Andes du Pérou Central*. Paris: ORSTOM, Mémoire 86, 310 p.
- Minam (2021). Guía para la evaluación de sitios contaminados y la elaboración de planes dirigidos a la remediación. Ministerio del Ambiente del Perú.
- Noble, D.C. (1992). *Coments on exploration, mapping and other studies at Colquijirca memorándum*. Sociedad Minera El Brocal S.A. 3 p.
- OEFA (2020a). Evaluación Ambiental de Causalidad en el ámbito del pasivo ambiental minero depósito de desmontes Excelsior a cargo de Activos Mineros S.A.C. en el 2020. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, informe N.º 00244-2020-OEFA-DEAM-STEAC.
- OEFA (2020b). Evaluación Ambiental de Causalidad en el ámbito del pasivo ambiental minero depósito de relaves Quiulacocha a cargo de Activos Mineros S.A.C. en el 2020. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, informe N.º 00258-2020-OEFA-DEAM-STEAC.
- OEFA (2020c). Evaluación ambiental de causalidad en el ámbito de los stocks pilas y depósito de relaves Ocroyoc de la unidad fiscalizable Planta de Óxidos, en el 2020. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, informe confidencial.
- OEFA (2020d). Evaluación ambiental de causalidad en el ámbito del depósito de desmonte Rumiallana, Miraflores, Stock Piles, tajo Raúl y polvorín, de la unidad

fiscalizable Cerro de Pasco, en el 2020. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, informe confidencial.

OEFA (2023). *Cerro de Pasco: ruta para la recuperación del río Ragra*. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2023-06120.

Perin, G., Craboledda, L., Lucchese, M., Cirillo, R., Dotta, L., Zanetta, ML. y Oro, AA. (1985). *Heavy metal speciation in the sediments of northern Adriatic Sea. A new approach for environmental toxicity determination*. In: Lakkas TD (ed) Heavy metals in the environment. CEP Consultants, Edinburgh

Pourret, O. y Hursthouse, A. (2019). *It's Time to Replace the Term "Heavy Metals" with "Potentially Toxic Elements" When Reporting Environmental Research*. International Journal of Environmental Research and Public Health

Quispesivana (1996). *Mapa geológico del cuadrángulo de Cerro de Pasco*. Ingemmet, Carta geológica del Perú: hoja 22-k.

Ramírez T. (2019). *Estrategias de vida y respuestas a la contaminación en Simón Bolívar, Pasco*. Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú.

Rodríguez (2010). *Mapa Geológico del cuadrángulo Cerro de Pasco (22-k), hoja 22-k-IV*. Ingemmet, Serie A: Carta Geológica Nacional a escala 1:50000.

Rodríguez R., Cueva E. y Carlotto V. (2013). *Fallas regionales y anomalías geoquímicas de sedimentos de quebrada como guías para la exploración de yacimientos minerales: El ejemplo de Cerro de Pasco*. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v. 107, p. 141-145.

Rodríguez, R., Cueva, E. y Carlotto, V. (2011). *Geología del cuadrángulo Cerro de Pasco – Hoja 22k*. Ingemmet, Boletín N° 144, Serie A: Carta Geológica Nacional a escala 1:50000, 164 p, 4 mapas.

Rogers, R.D. (1983). *Structural and geochemical evolution of a mineralized volcanic vent at Cerro de Pasco, Peru*. Doctoral thesis, University of Arizona, Tucson, 116 p.

- Rottier, B., Kouzmanov, K., Wälle, M., BendeZú, R. y Fontboté, L. (2016). *Sulfide Replacement Processes Revealed by Textural and LA-ICP-MS Trace Element Analyses: Example from the Early Mineralization Stages at Cerro de Pasco, Peru*. *Economic Geology*, v. 111, pp. 1347–1367
- Schütz, L. y Rahn, K. (1982). *Trace-element concentrations in erodible soils*. *Atmospheric Environment* (1967). [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(82\)90324-9](https://doi.org/10.1016/0004-6981(82)90324-9).
- Sernageomin (2015). *Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras*. Servicio Nacional de geología y minería, Chile.
- Silberman, M. y Noble, D. (1977). *Age of Igneous Activity and Mineralization, Cerro de Pasco, Central Peru*. *Economic Geology*, Vol. 72, p. 925-930.
- Smuda J., Dold, B., Friese, K., Morgenstern, P. y Glaesser, W. (2007). *Mineralogical and geochemical study of element mobility at the sulfide-rich Excelsior waste rock dump from the polymetallic Zn–Pb–(Ag–Bi–Cu) deposit, Cerro de Pasco, Peru*. *Journal of Geochemical Exploration* 92.
- Spikings R., Reitsma. M.J., Boekhout, F., Miškovic´, A, Ulianov, A, Chiaradia, M., Gerdes, A., and Schaltegger, U. (2016). *Characterization of Triassic rifting in Peru and implications for the early disassembly of western Pangaea*. *Gondwana Research*, v. 35, p. 124–143.
- Vargas, L., De la Cruz, C., Pascual, O., Aguilar, P., Agurto, A.; Vargas, J., Trelles, G.; Espinoza, I., Amado, J. y Chero, D. (2022). *Geoquímica multipropósito de suelos en la zona Jauja – Acostambo*. INGEMMET, Boletín, Serie B: Geología Económica, 76, 218 p.
- Wade, C., Dold, B., Fontboté, L. (2006). *Geochemistry and mineralogy of the Quiulacocha tailings impoundment from the polymetallic Pb-Zn-Ag-Bi-Cu mineralization Cerro de Pasco, Peru*. 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), March 26-30, 2006, St. Louis MO. R.I. Barnhisel (ed.)

Published by the American Society of Mining and Reclamation (ASMR), 3134
Montavesta Road, Lexington, KY 40502, 2199-2206.

Ward, H.J. (1961). *The pyrite body and copper orebodies, Cerro de Pasco mine, central Peru*. *Economic Geology*, 56 (2).

Wedepohl, K.H. (1994). *The composition of de continental crust (abstract)*, *Mineral. Mag.* 58 Suppl., pp. 959-960.

Wedepohl, K.H. (1995). *The composition of the continental crust. Geochimica et Cosmochimica. Acta* № 7, v. 59. Ndash, 1232, 1217.

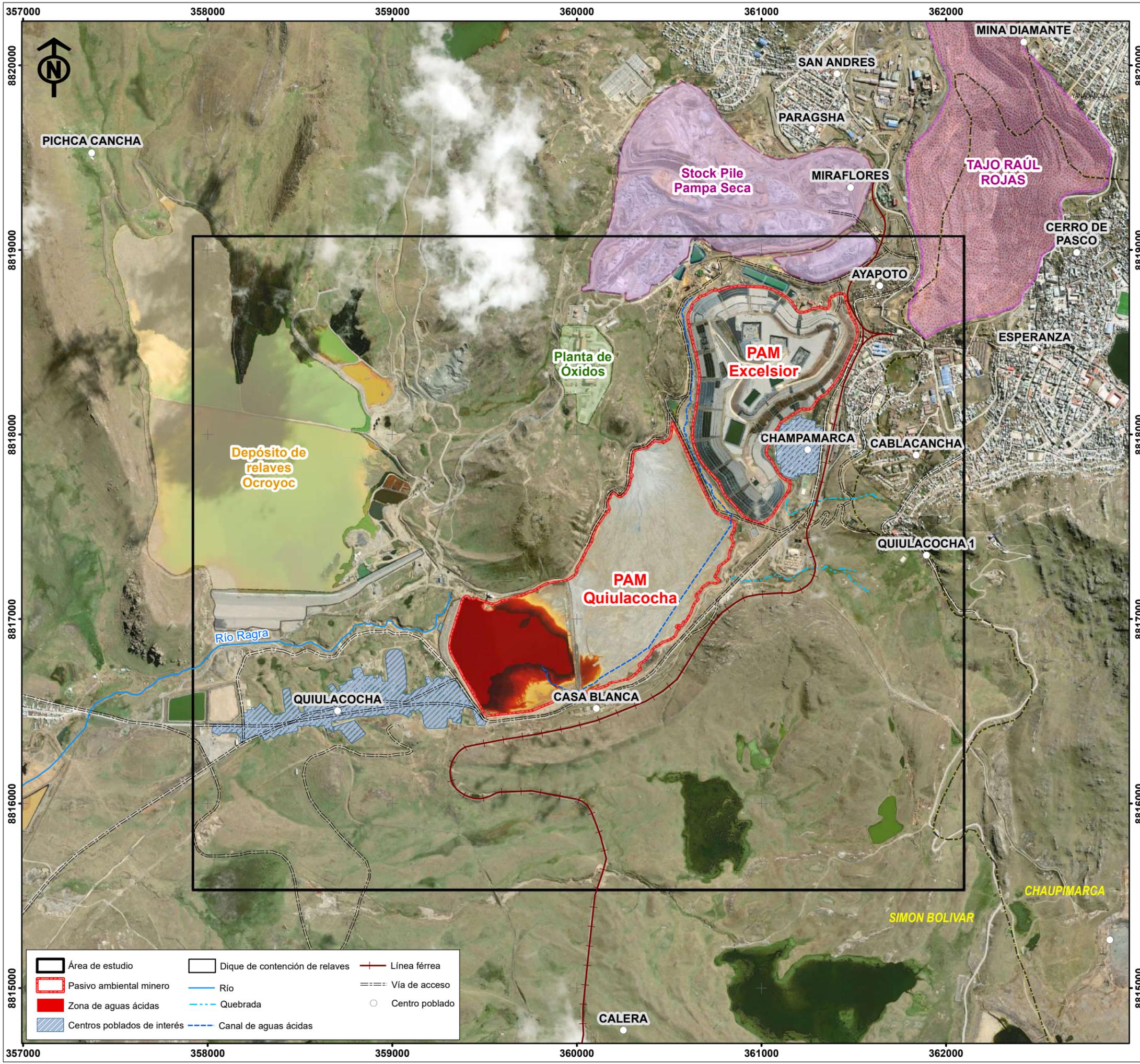
ANEXOS

Anexo A: mapas

Anexo B: tabla de resultados

Anexo C: control de calidad de muestras duplicadas

ANEXO A
MAPAS



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

«CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS ALEDAÑAS A LOS PAM EXCELSIÓR Y QUIULACOCHA, Y SU APLICACIÓN EN LOS ASPECTOS AMBIENTALES REPORTADOS EN LOS CENTROS POBLADOS DE CHAMPAMARCA Y QUIULACOCHA, DISTRITO SIMÓN BOLÍVAR, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO PASCO»

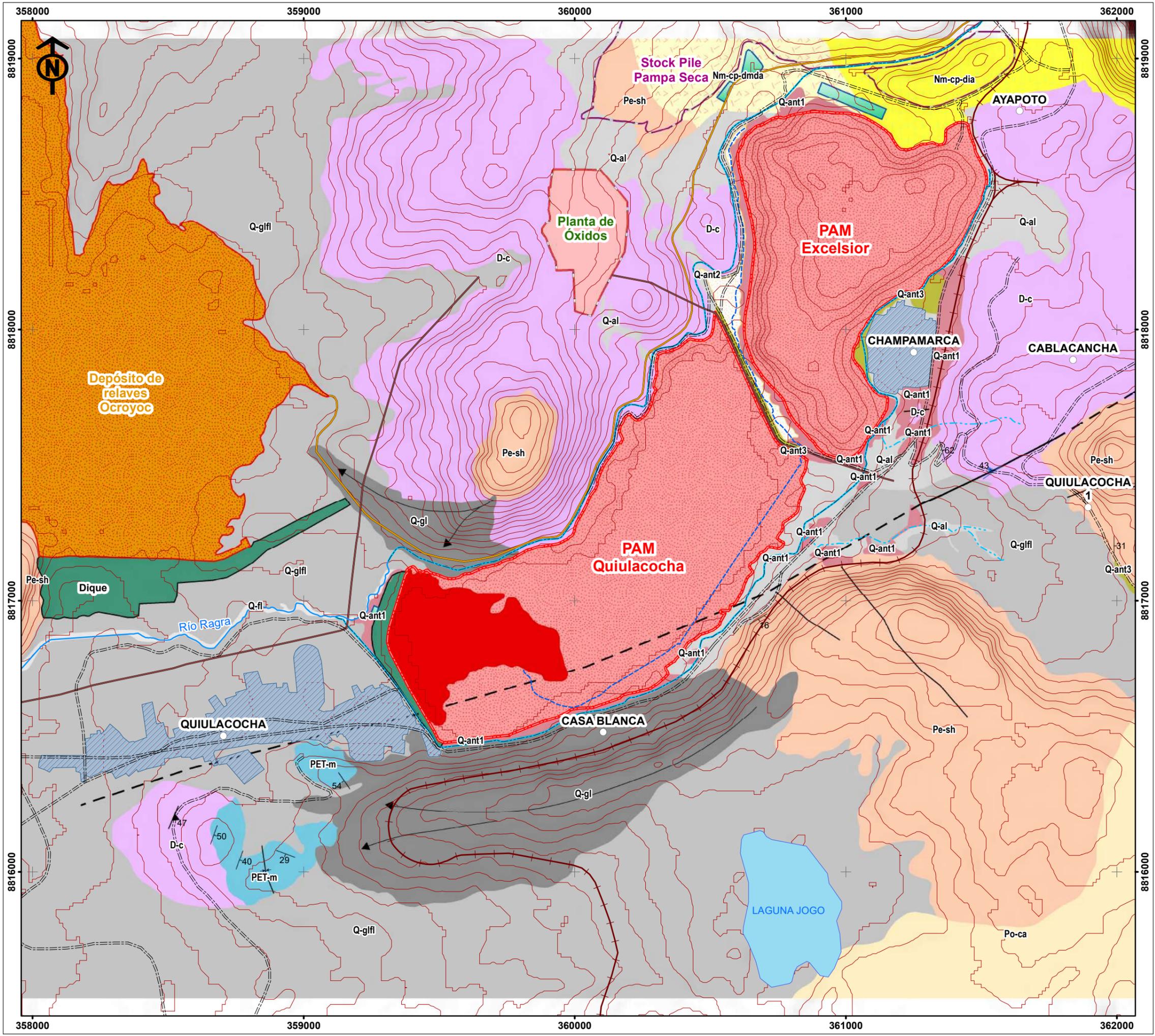
NOMBRE: MAPA DE UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

DEPARTAMENTO: PASCO **PROVINCIA:** PASCO **DISTRITOS:** SIMÓN BOLÍVAR

MAPA: 01

ELABORADO POR: Fray Luis Yanapa Huaquisto **ASESOR:** Mgt. José Dionicio Cárdenas Roque **FECHA:** Diciembre de 2024

FUENTE: IGN (Instituto Geográfico Nacional), INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática).



ESTRUCTURAS

- ▲ Esquistocidad
- Estratificación normal
- - - - - Falla inferida
- Lineamiento
- ⊥ Eje de sinclinal
- ← Sentido de morrena

SIMBOLOGÍA

- Curvas de nivel
- Línea férrea
- Vía
- - - - - Quebrada
- Río
- - - - - Canal de aguas ácidas
- Canal de derivación de agua

UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

Q-ant3	Depósito antropogénico - Material de relleno	
Q-ant2	Depósito Antropogénico - Sedimentos y relave	
Q-ant1	Depósito antropogénico - residuo minero	
Q-fi	Depósito fluvial	
Q-al	Depósito aluvial	
Q-gflf	Depósito glaciar, fluvial	
Q-gi	Depósito glaciar	
Nm-cp-dia	Diatrema	Complejo volcánico Cerro de Pasco
Nm-cp-dmda	Domo de dacita	
Po-ca	Formación Calera	
Pe-sh	Formación Pocobamba - Miembro Shuco	
PET-m	Grupo Mitu	
D-c	Grupo Cabanillas	

PASIVO AMBIENTAL MINERO

- Pasivo ambiental minero (PAM)
- Laguna de aguas ácidas

COMPONENTES - CERRO S.A.C.

- Tubería de conducción de agua
- Tubería de conducción de relave
- Depósito de relaves Ocroyoc
- Planta de óxidos
- Stock Pile Pampa Seca

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

«CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS ALEDAÑAS A LOS PAM EXCELSIÓR Y QUIULACOCHA, Y SU APLICACIÓN EN LOS ASPECTOS AMBIENTALES REPORTADOS EN LOS CENTROS POBLADOS DE CHAMPAMARCA Y QUIULACOCHA, DISTRITO SIMÓN BOLÍVAR, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO PASCO»

NOMBRE: **MAPA GEOLÓGICO LOCAL**

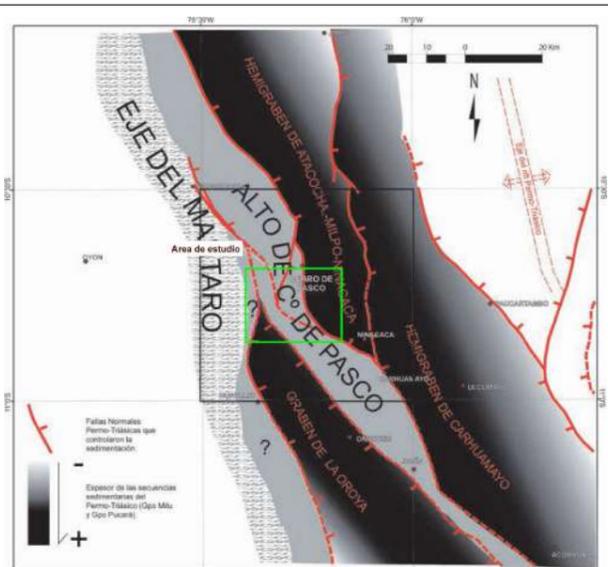
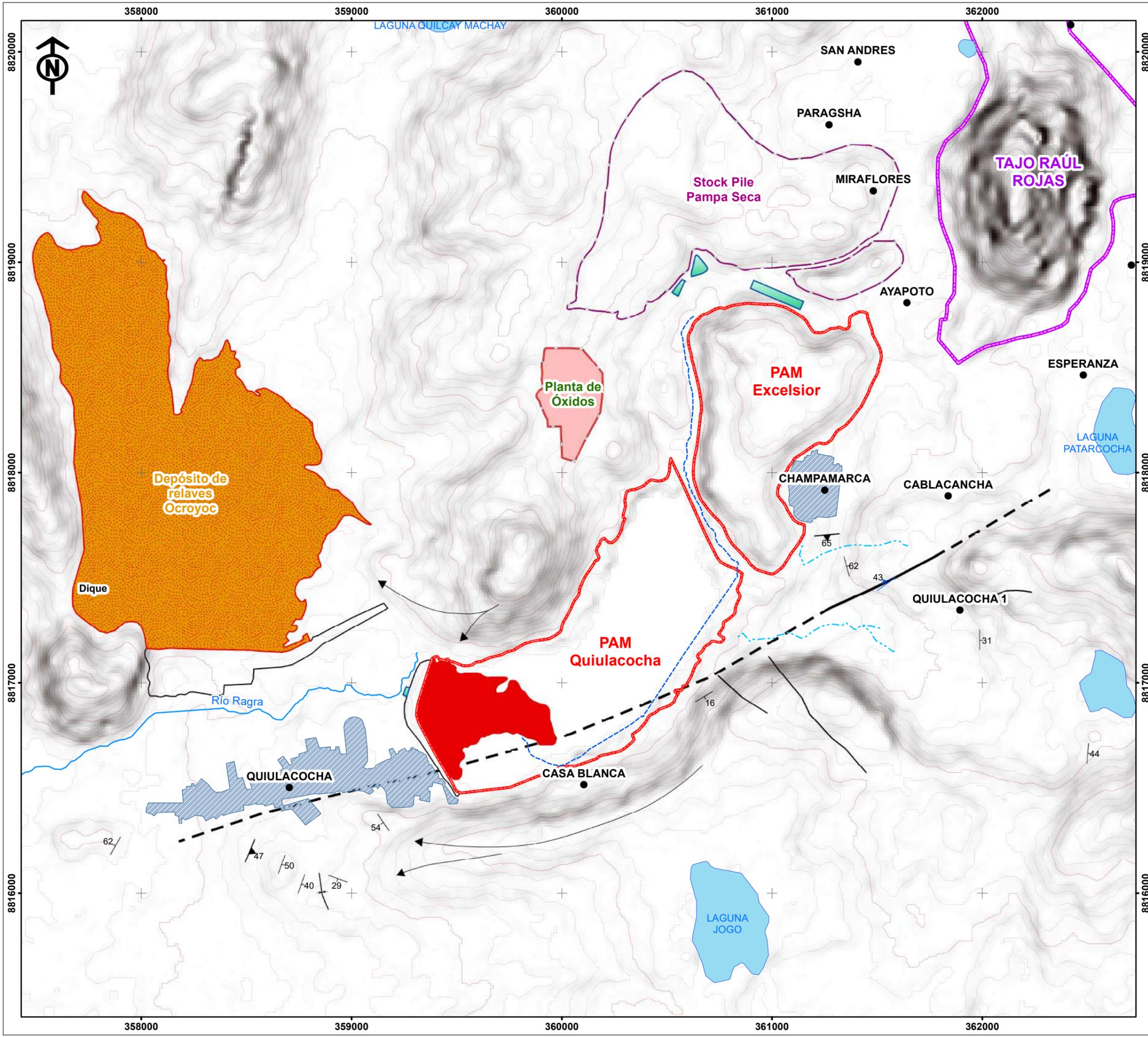
DEPARTAMENTO : PASCO PROVINCIA : PASCO DISTRITOS: SIMÓN BOLÍVAR

Escala: 1:13257
 0 80 160 320 480 640 m
 Proyección: UTM Datum: WGS 1984 - Zona 18 Sur

MAPA: **02**

ELABORADO POR : Fray Luis Yanapa Huaquisto ASESOR: Mgt. José Dionicio Cárdenas Roque FECHA: Diciembre de 2024

FUENTE : IGN (Instituto Geográfico Nacional); INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática); INGEMMET (Instituto Geológico minero y Metalúrgico); y elaboración propia



- ESTRUCTURAS**
- ▲ Esquistocidad
 - Estratificación normal
 - - - Falla inferida
 - Lineamiento
 - ⊥ Eje de sinclinal
 - ◀ Sentido de morrena
- SIMBOLOGÍA**
- Curvas de nivel
 - Línea férrea
 - ≡≡≡ Vía
 - - - Quebrada
 - Río
 - - - Canal de aguas ácidas
 - Canal de derivación de agua

- PASIVO AMBIENTAL MINERO**
- Pasivo ambiental minero (PAM)
 - Laguna de aguas ácidas
- COMPONENTES - CERRO S.A.C.**
- Tubería de conducción de agua
 - Tubería de conducción de relave
 - Depósito de relaves Ocroyoc
 - Planta de óxidos
 - Stock Pile Pampa Seca

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

«CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS ALEDAÑAS A LOS PAM EXCELSIÓR Y QUIULACOCHA, Y SU APLICACIÓN EN LOS ASPECTOS AMBIENTALES REPORTADOS EN LOS CENTROS POBLADOS DE CHAMPAMARCA Y QUIULACOCHA, DISTRITO SIMÓN BOLÍVAR, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO PASCO»

NOMBRE: **MAPA ESTRUCTURAL**

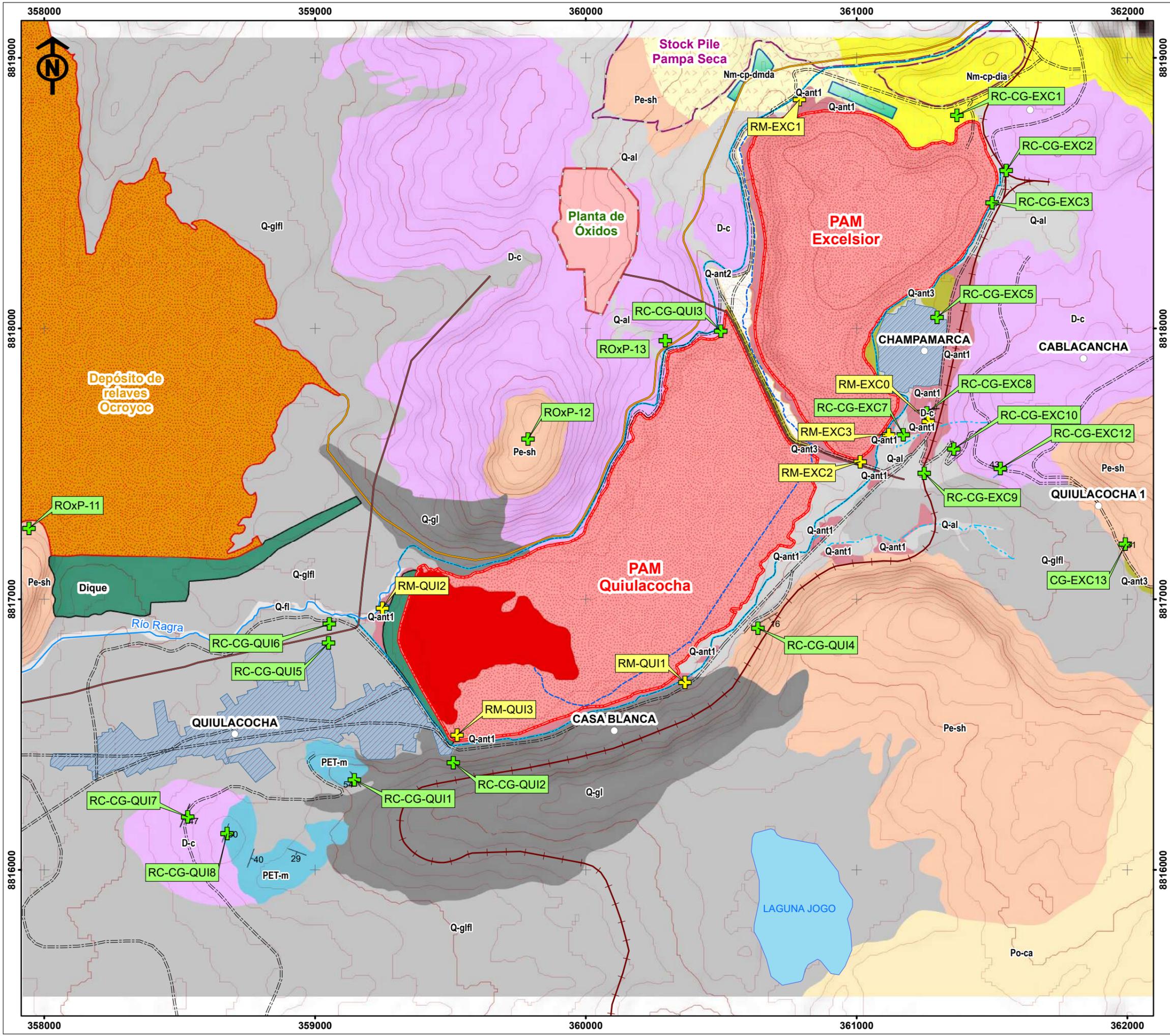
DEPARTAMENTO : PASCO PROVINCIA : PASCO DISTRITOS: SIMÓN BOLÍVAR

Escala: 1:17 102
 Proyección: UTM Datum: WGS 1984 - Zona 18 Sur

MAPA: **03**

ELABORADO POR : Fray Luis Yanapa Huaquisto ASESOR: Mgt. José Dionicio Cárdenas Roque FECHA: Diciembre de 2024

FUENTE : IGN (Instituto Geográfico Nacional); INE (Instituto Nacional de Estadística e Informática); INGEMMET (Instituto Geológico minero y Metalúrgico); y elaboración propia



- ESTRUCTURAS**
- ▲ Esquistocidad
 - Estratificación normal
 - - - - - Falla inferida
 - Lineamiento

- SIMBOLOGÍA**
- Curvas de nivel
 - Línea férrea
 - Vía
 - Quebrada
 - Río
 - Canal de aguas ácidas
 - Canal de derivación de agua
 - + Punto de muestreo de roca
 - + Punto de muestreo de residuos mineros

- UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS**
- | | | |
|------------|--|-----------------------------------|
| Q-ant3 | Depósito antropogénico - Material de relleno | |
| Q-ant2 | Depósito Antropogénico - Sedimentos y relave | |
| Q-ant1 | Depósito antropogénico - residuo minero | |
| Q-fl | Depósito fluvial | |
| Q-al | Depósito aluvial | |
| Q-glfl | Depósito glaciar, fluvial | |
| Q-gl | Depósito glaciar | |
| Nm-cp-dia | Diatrema | Complejo volcánico Cerro de Pasco |
| Nm-cp-dmda | Domo de dacita | |
| Po-ca | Formación Calera | |
| Pe-sh | Formación Pocobamba - Miembro Shuco | |
| PET-m | Grupo Mitu | |
| D-c | Grupo Cabanillas | |

- PASIVO AMBIENTAL MINERO**
- Pasivo ambiental minero (PAM)
 - Laguna de aguas ácidas
- COMPONENTES - CERRO S.A.C.**
- Tubería de conducción de agua
 - Tubería de conducción de relave
 - Depósito de relaves Ocroyoc
 - Planta de óxidos
 - Stock Pile Pampa Seca

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

«CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS ALEDAÑAS A LOS PAM EXCELSIOR Y QUIULACOCHA, Y SU APLICACIÓN EN LOS ASPECTOS AMBIENTALES REPORTADOS EN LOS CENTROS POBLADOS DE CHAMPAMARCA Y QUIULACOCHA, DISTRITO SIMÓN BOLÍVAR, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO PASCO»

NOMBRE: **MAPA DE UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO**

DEPARTAMENTO : PASCO PROVINCIA : PASCO DISTRITOS: SIMÓN BOLÍVAR

Escala: 1:13276
 Proyección: UTM Datum: WGS 1984 - Zona 18 Sur

MAPA: **04**

ELABORADO POR : Fray Luis Yanapa Huaquisto ASESOR: Mgt. José Dionicio Cárdenas Roque FECHA: Diciembre de 2024

FUENTE : IGN (Instituto Geográfico Nacional); INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática); INGEMMET (Instituto Geológico minero y Metalúrgico); y elaboración propia

ANEXO B
TABLA DE RESULTADOS

Resultados de metales totales (1)

Parámetro	Unidad	RC-CG-EXC2	RC-CG-EXC8	RC-CG-EXC10	RC-CG-EXC12	RC-CG-QUI3	RC-CG-QUI7	ROxP-13	RC-CG-QUI1	RC-CG-QUI8
		Metales totales por ICP-MS								
Aluminio Total	mg/kg PS	7299	13038	1897	5419	3074	15405	10 807	12507	12197
Antimonio Total	mg/kg PS	86,79	0,0156	0,2582	42,41	<0,0030	0,0328	0	0,0665	0,4341
Arsénico Total	mg/kg PS	4283	19,7	87,9	219	4,6	5,8	17	8,15	18,7
Bario Total	mg/kg PS	330,8	123,2	43,55	1047	50,01	61,78	42	33,27	100,8
Berilio Total	mg/kg PS	1,11	0,366	0,539	1,01	0,547	0,379	<0,006	0,567	0,42
Boro Total	mg/kg PS	3,28	6,02	4,422	20,74	4,745	3,165	2	4,234	2,621
Cadmio Total	mg/kg PS	62,92	0,44467	0,12131	0,16619	0,04372	0,04988	0	0,18507	0,09789
Calcio Total	mg/kg PS	11838	686,7	968,9	4117	2577	952,6	6 537	1635	1106
Cobalto Total	mg/kg PS	5,369	5,848	6,506	0,352	12,2	7,725	13	9,416	7,817
Cobre Total	mg/kg PS	5646	36	2,9	2,1	32	11	11	19	74
Cromo Total	mg/kg PS	12,1	20,5	5,049	10,4	10,5	18,3	11	12,1	12,5
Estaño Total	mg/kg PS	3,688	0,1879	0,2325	0,4143	0,15	0,4272	1	0,2919	0,318
Estroncio Total	mg/kg PS	107,9	16,82	18,06	1211	8,07	6,006	25	8,347	8,819
Fósforo Total	mg/kg PS	1675	273	45	2058	511	436	550	776	900
Hierro Total	mg/kg PS	97411	45019	21005	9300	38857	33431	28 794	22187	22070
Litio Total	mg/kg PS	4,633	22,98	1,034	1,416	5,435	45,36	23	38,5	29,04
Magnesio Total	mg/kg PS	1711	6117	1128	245	8599	5393	4 988	4921	3942
Manganeso Total	mg/kg PS	7797	241	1862	143	494	272	552	905	1108
Mercurio Total	mg/kg PS	5,3	<0,010	0,1	6,16	<0,010	<0,010	0	0,058	<0,010
Molibdeno Total	mg/kg PS	0,798	8,474	0,21	3,581	0,098	0,912	0	0,068	0,12
Níquel Total	mg/kg PS	14,4	22,4	14,4	2,13	26,2	13,3	24	19,9	15,6
Plata Total	mg/kg PS	88,88	0,4384	0,9465	0,0551	<0,0020	0,6147	3	0,1371	0,2328
Plomo Total	mg/kg PS	3545	23	54,4	424	13,8	20,1	23	32	42
Potasio Total	mg/kg PS	920	2736	2310	1673	2569	1304	1 322	1188	1252
Selenio Total	mg/kg PS	1,28	4,16	0,181	<0,006	1,186	0,537	2	0,578	1,82
Sodio Total	mg/kg PS	44,1	134	32,1	28	115	117	38	72	57,7
Talio Total	mg/kg PS	16,63	0,8228	0,5728	10,36	0,1379	0,1535	0	0,2757	0,1087
Titanio Total	mg/kg PS	24	10	2,1	5,1	1,9	106	21	12	13
Vanadio Total	mg/kg PS	20	50	11	13	26	24	23	13	16
Zinc Total	mg/kg PS	6071	136	101	259	102	45	119	121	67

Fuente: Elaboración propia

<: Valor menor al límite de cuantificación del método

Resultados de metales totales (2)

Parámetro	Unidad	RC-CG-EXC13	RC-CG-QUI4	ROxP-11	ROxP-12	RC-CG-EXC1	RC-CG-QUI2	RC-CG-QUI5	RC-CG-QUI6	RC-CG-EXC3
		Metales totales por ICP-MS								
Aluminio Total	mg/kg PS	952,9	2405	2842	1 879	2555	3869	9587	5609	3991
Antimonio Total	mg/kg PS	1,574	0,3436	<0,0030	1	0,416	1,598	0,8667	2,119	10,79
Arsénico Total	mg/kg PS	168	10,3	4	14	24,3	228	165	255	663
Bario Total	mg/kg PS	12,36	48,11	19	12	43,69	717	108,6	162,8	194,5
Berilio Total	mg/kg PS	0,125	0,269	<0,006	<0,006	0,929	0,742	0,882	0,719	0,682
Boro Total	mg/kg PS	1,85	6,885	3	4	4,817	3,772	2,856	4,142	4,702
Cadmio Total	mg/kg PS	0,47773	0,35261	0	4	0,43491	5,2278	4,1788	6,1644	5,4722
Calcio Total	mg/kg PS	245282	313759	148891	213 181	21472	67752	979,4	23878	15100
Cobalto Total	mg/kg PS	1,265	1,649	2	1	6,653	17,1	12	10,1	12,1
Cobre Total	mg/kg PS	4,6	4,8	4	5	6,2	59	112	186	377
Cromo Total	mg/kg PS	5,222	5,987	5	5	0,632	6,524	10	7,469	8,672
Estaño Total	mg/kg PS	0,4098	0,3349	1	1	0,4412	0,2233	0,172	0,4827	1,674
Estroncio Total	mg/kg PS	150,7	629,1	271	415	36,73	158,6	14,15	87,92	71,42
Fósforo Total	mg/kg PS	1342	1496	682	1 021	1367	1048	1116	963	1379
Hierro Total	mg/kg PS	6423	3919	6273	3 905	25088	40657	47747	48166	96638
Litio Total	mg/kg PS	0,5571	1,719	0	<0,0160	0,4698	4,757	6,317	7,755	2,511
Magnesio Total	mg/kg PS	12391	2015	5516	2 686	4606	16122	1146	5912	263
Manganeso Total	mg/kg PS	463	209	174	179	2967	11538	4482	4071	4808
Mercurio Total	mg/kg PS	1,78	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	1,49	1,54	0,561	2,8
Molibdeno Total	mg/kg PS	0,223	0,18	0	0	0,533	0,962	0,447	0,72	0,963
Níquel Total	mg/kg PS	4,34	9,18	7	4	5,66	26,8	21,8	18,7	9,24
Plata Total	mg/kg PS	0,1924	<0,0020	0	0	0,1055	1,138	1,842	3,543	52,41
Plomo Total	mg/kg PS	25,5	19,7	12	69	55,3	534	664	769	5393
Potasio Total	mg/kg PS	371	936	748	667	3228	1290	1418	1834	1702
Selenio Total	mg/kg PS	0,694	0,507	0	0	1,378	1,109	1,699	1,592	1,542
Sodio Total	mg/kg PS	61,6	113	15	20	62,7	111	39,6	67,6	91,6
Talio Total	mg/kg PS	2,095	0,2572	0	0	0,6372	20,81	2,187	2,661	10,86
Titanio Total	mg/kg PS	2,8	15	15	12	3	3,8	10	14	15
Vanadio Total	mg/kg PS	9	10	9	8	2	15	21	17	21
Zinc Total	mg/kg PS	154	86	46	193	188	3064	1287	1539	2209

Fuente: Elaboración propia

<: Valor menor al límite de cuantificación del método

Resultados de metales totales (3)

Parámetro	Unidad	RC-CG-EXC5	RC-CG-EXC7	RC-CG-EXC9	RM-EXC0	RM-EXC1	RM-EXC2	RM-EXC3	RM-QUI1	RM-QUI2
		Metales totales por ICP-MS								
Aluminio Total	mg/kg PS	9536	6381	4128	7660	7577	2288	1652	1660	12245
Antimonio Total	mg/kg PS	1,119	0,707	4,239	15,61	99,7	49,46	130,2	28,39	14,28
Arsénico Total	mg/kg PS	236	127	404	1008	839	1609	912	865	849
Bario Total	mg/kg PS	121,7	70,84	85,34	103,9	134,2	103,4	66,7	117,5	249
Berilio Total	mg/kg PS	0,909	0,837	0,678	0,373	0,42	0,301	0,144	0,088	0,501
Boro Total	mg/kg PS	4,592	6,295	5,013	3,238	3,082	4,671	2,645	2,565	4,093
Cadmio Total	mg/kg PS	9,4404	4,5676	9,4237	30,494	6,3602	19,983	12,918	27,329	5,3353
Calcio Total	mg/kg PS	17449	73017	64900	38217	6764	43795	6303	17952	13375
Cobalto Total	mg/kg PS	9,879	7,373	11,9	1,739	0,213	0,747	2,258	0,618	1,626
Cobre Total	mg/kg PS	238	14	204	544	1686	332	1365	326	2275
Cromo Total	mg/kg PS	11,7	7,145	6,963	11	14,9	4,022	3,583	5,136	16,1
Estaño Total	mg/kg PS	0,879	0,1937	0,5859	2,527	5,381	7,574	10,74	1,305	2,176
Estroncio Total	mg/kg PS	67,4	138,5	118,5	110	174,5	66,64	43,2	122	67,41
Fósforo Total	mg/kg PS	1556	1140	1220	1080	2314	648	207	786	1346
Hierro Total	mg/kg PS	62334	27267	45100	170242	197480	196485	165774	145218	142061
Litio Total	mg/kg PS	16,72	11,1	4,255	4,492	2,282	2,29	2,436	1,556	6,477
Magnesio Total	mg/kg PS	4588	26507	13122	1604	538	1832	651	168	777
Manganeso Total	mg/kg PS	4316	3279	2873	4069	912	4311	281	273	1434
Mercurio Total	mg/kg PS	1,06	0,452	2,12	1,7	1,23	0,884	1,53	6,84	4,19
Molibdeno Total	mg/kg PS	0,901	0,364	1,131	0,925	1,113	1,615	2,495	1,127	1,215
Níquel Total	mg/kg PS	22,7	14,7	22,2	5,14	1,94	2,73	8,11	2,05	5,31
Plata Total	mg/kg PS	2,492	1,037	2,549	20,62	57,16	45,45	232,8	47,97	48,81
Plomo Total	mg/kg PS	1247	210	951	3311	6039	11182	14126	29429	5883
Potasio Total	mg/kg PS	1857	2040	1382	998	603	769	928	1149	1527
Selenio Total	mg/kg PS	1,629	0,879	1,979	6,834	2,973	3,12	5,826	2,749	4,505
Sodio Total	mg/kg PS	62,5	76,8	68,1	77,5	42,8	87,3	60,4	102	80,6
Talio Total	mg/kg PS	6,528	5,086	23,55	7,302	22,7	36,44	13,18	12,84	15,45
Titanio Total	mg/kg PS	9,7	2,8	3,3	36	3,5	12	5,8	12	8,7
Vanadio Total	mg/kg PS	29	14	14	31	61	18	7	23	58
Zinc Total	mg/kg PS	3164	1795	2974	6387	1845	8810	3590	7486	2338

Fuente: Elaboración propia

<: Valor menor al límite de cuantificación del método

Resultados de la prueba ABA

Parámetro	Unidad	RC-CG-EXC2	RC-CG-EXC8	ROxP-13	ROxP-11	ROxP-12	RC-CG-EXC1
		Potencial de generación de drenaje ácido					
Azufre Total	%	0,25	0,4	0,04	0,01	0,02	2,31
Azufre como sulfuro	%	-	-	-	-	-	-
Azufre como sulfato	%	-	-	-	-	-	-
Grado de Efervescencia	NA	1	1	1	-	-	3
pH en Pasta	Unidades pH	7,38	4,2	7,13	8,46	8,4	8,05
Potencial de Acidez Máximo (MPA)	t CaCO3/1000t	5,94	6,88	0,94	< 0,30	0,31	71,25
Potencial de Neutralización (PN)	t CaCO3/1000 t	1,06	<1,00	3,28	613,3	734,05	56,83
Potencial de Neutralización Neto (PNN)	t CaCO3/1000 t	-4,88	-6,88	2,34	613,3	733,74	-14,42
Relación NP/MPA	-	0,18	<0,01	3,49	NA	>2000	0,8

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Unidad	RC-CG-QUI2	RC-CG-QUI6	RC-CG-EXC7	RM-EXC2	RM-QUI2
		Potencial de generación de drenaje ácido				
Azufre Total	%	0,46	0,44	0,4	9,15	3,61
Azufre como sulfuro	%	-	-	-	-	-
Azufre como sulfato	%	-	-	-	-	-
Grado de Efervescencia	NA	4	4	4	-	-
pH en Pasta	Unidades pH	8,22	8,06	8,06	3,89	3,77
Potencial de Acidez Máximo (MPA)	t CaCO3/1000t	13,44	11,88	8,44	132,19	56,25
Potencial de Neutralización (PN)	t CaCO3/1000 t	307,89	112,72	292,27	12,78	<1,00
Potencial de Neutralización Neto (PNN)	t CaCO3/1000 t	294,45	100,84	283,83	-119,41	-56,25
Relación NP/MPA	-	22,91	9,49	34,63	0,1	<0,01

Fuente: Elaboración propia

<: Valor menor al límite de cuantificación del método
 >: Valor mayor al límite de cuantificación del método
 -: Parámetro sin resultado de laboratorio
 NA: No aplica

Resultados de shake Flask Extraction (1)

Parámetro	Unidad	RC-CG-EXC2	RC-CG-EXC8	ROxP-13	ROxP-11	ROxP-12	RC-CG-EXC1
		Metales por ICP-MS en extracto SFE					
Plata (Ag)	mg/L	<0,00025	<0,00025	< 0,00025	< 0,00025	< 0,00025	<0,00025
Aluminio (Al)	mg/L	0,272	4,454	0,032	0,154	0,233	0,31
Arsénico (As)	mg/L	0,058	<0,0006	< 0,0006	0,0064	0,0077	0,0013
Boro (B)	mg/L	0,081	0,32	0,015	< 0,012	0,019	0,04
Bario (Ba)	mg/L	0,0517	0,0416	0,0122	0,0032	0,0029	0,0225
Berilio (Be)	mg/L	<0,0004	0,0036	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004	<0,0004
Bismuto (Bi)	mg/L	<0,0004	<0,0004	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004	<0,0004
Calcio (Ca)	mg/L	52,79	25,63	13,63	16,19	10,64	86,47
Cadmio (Cd)	mg/L	0,00123	0,01012	< 0,00025	< 0,00025	< 0,00025	<0,00025
Cobalto (Co)	mg/L	<0,0004	0,0386	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004	<0,0004
Cromo (Cr)	mg/L	<0,0012	<0,0012	< 0,0012	< 0,0012	< 0,0012	<0,0012
Cobre (Cu)	mg/L	0,0415	0,1116	0,0024	0,0145	0,0086	0,0009
Hierro (Fe)	mg/L	0,057	1,763	< 0,048	< 0,048	< 0,048	<0,048
Mercúrio (Hg)	mg/L	0,00082	<0,00010	< 0,00010	< 0,00010	< 0,00010	<0,00010
Potasio (K)	mg/L	8,07	26,61	12,12	6,98	5,65	45,95
Litio (Li)	mg/L	0,0118	0,3203	0,0023	0,0073	0,0034	0,0068
Magnesio (Mg)	mg/L	3,226	38,92	3,201	1,659	4,588	10,32
Manganeso (Mn)	mg/L	0,0381	1,044	0,3554	0,0016	0,0007	0,355
Molibdeno (Mo)	mg/L	0,0009	<0,0004	< 0,0004	0,0005	0,0005	0,0147
Sodio (Na)	mg/L	0,91	8,47	2,78	1,74	1,95	6,76
Níquel (Ni)	mg/L	<0,0004	0,1333	0,0011	0,0013	0,0019	<0,0004
Fósforo (P)	mg/L	<0,13	<0,13	< 0,13	< 0,13	< 0,13	<0,13
Plomo (Pb)	mg/L	0,0011	0,0013	0,0004	< 0,0004	< 0,0004	0,0005
Antimonio (Sb)	mg/L	0,0799	<0,0004	0,0004	0,0026	0,0032	0,0132
Selenio (Se)	mg/L	<0,0014	0,0114	< 0,0014	< 0,0014	< 0,0014	<0,0014
Silicio (Si)	mg/L	5,2	19,9	4,5	3,5	2,9	5,9
Estaño (Sn)	mg/L	<0,0005	<0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	<0,0005
Estroncio (Sr)	mg/L	0,1558	0,107	0,0234	0,2065	0,1449	0,1762
Titanio (Ti)	mg/L	<0,0013	0,0144	< 0,0013	< 0,0013	< 0,0013	<0,0013
Talio (Tl)	mg/L	0,0021	0,0014	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004	0,0011
Uranio (U)	mg/L	<0,0004	0,0008	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004	0,0021
Vanadio (V)	mg/L	<0,0004	<0,0004	< 0,0004	0,003	0,0009	<0,0004
Zinc (Zn)	mg/L	0,053	0,797	< 0,020	< 0,020	< 0,020	<0,020
Cloruro	mg/L	18,87	19,06	0,72	4,5	7,7	18,15
Fluoruro	mg/L	<0,20	<0,20	0,12	0,31	0,21	<0,20
Fosfato	mg/L	<0,10	<0,10	< 0,0012	0,2877	0,2852	<0,10
Nitrato	mg/L	46,23	47,04	2	< 2	< 2	46,27
Nitrito	mg/L	<0,05	<0,05	0,1378	0,1658	0,0561	<0,05
Sulfato	mg/L	116,63	329,43	28,6	9,51	12,4	217,35

Fuente: Elaboración propia

<: Valor menor al límite de cuantificación del método

Resultados de shake Flask Extraction (2)

Parámetro	Unidad	RC-CG-QUI2	RC-CG-QUI6	RC-CG-EXC7	RM-EXC2	RM-QUI2
		Metales por ICP-MS en extracto SFE				
Plata (Ag)	mg/L	<0,00025	<0,00025	<0,00025	0,00046	0,00044
Aluminio (Al)	mg/L	0,245	0,096	0,488	0,299	28,49
Arsénico (As)	mg/L	0,0023	0,0014	0,0018	0,0085	0,004
Boro (B)	mg/L	0,108	0,043	0,064	<0,012	0,02
Bario (Ba)	mg/L	<0,0014	0,0214	0,0151	0,0184	0,0228
Berilio (Be)	mg/L	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	0,0029
Bismuto (Bi)	mg/L	<0,0004	<0,0004	<0,0004	0,0008	0,0007
Calcio (Ca)	mg/L	29,09	64,44	400,4	487,8	529,1
Cadmio (Cd)	mg/L	<0,00025	<0,00025	<0,00025	1,247	0,986
Cobalto (Co)	mg/L	<0,0004	<0,0004	<0,0004	0,0601	0,1704
Cromo (Cr)	mg/L	0,0015	0,0013	<0,0012	<0,0012	0,0016
Cobre (Cu)	mg/L	0,0013	0,0018	0,0012	0,0322	14,48
Hierro (Fe)	mg/L	<0,048	0,062	0,063	1,989	106,9
Mercúrio (Hg)	mg/L	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010
Potasio (K)	mg/L	7,78	10,97	15,9	1,22	9,24
Litio (Li)	mg/L	0,039	0,0393	0,0389	0,0449	0,0973
Magnesio (Mg)	mg/L	6,316	17,29	52,18	607,6	90
Manganeso (Mn)	mg/L	0,0142	0,0055	0,024	623,5	335,1
Molibdeno (Mo)	mg/L	0,003	0,0011	0,0009	<0,0004	<0,0004
Sodio (Na)	mg/L	2,48	4,59	1,96	0,54	1,35
Níquel (Ni)	mg/L	0,0008	<0,0004	0,0006	0,1424	0,175
Fósforo (P)	mg/L	<0,13	<0,13	<0,13	<0,13	<0,13
Plomo (Pb)	mg/L	0,0006	0,002	0,0011	1,208	0,5936
Antimonio (Sb)	mg/L	0,0032	0,005	0,0037	0,0024	0,0014
Selenio (Se)	mg/L	<0,0014	<0,0014	<0,0014	0,0064	0,005
Silicio (Si)	mg/L	3,7	3,8	2,6	2,5	21
Estaño (Sn)	mg/L	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Estroncio (Sr)	mg/L	0,1158	0,3631	0,6938	2,736	1,09
Titanio (Ti)	mg/L	<0,0013	0,0028	0,0024	0,0018	0,002
Talio (Tl)	mg/L	0,0011	<0,0004	0,002	0,0043	0,0165
Uranio (U)	mg/L	<0,0004	<0,0004	0,0008	0,0004	0,0418
Vanadio (V)	mg/L	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004
Zinc (Zn)	mg/L	<0,020	<0,020	<0,020	350,6	238,9
Cloruro	mg/L	18,62	18,97	18,8	20,91	20,16
Fluoruro	mg/L	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Fosfato	mg/L	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Nitrato	mg/L	46,16	46,15	46,08	46,28	46,49
Nitrito	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Sulfato	mg/L	102,5	292,25	848,65	5011	3641,27

Fuente: Elaboración propia

<: Valor menor al límite de cuantificación del método

Resultados de análisis mineralógico por DRX

Parámetro	Unidad	Fórmula general	RC-CG-EXC2	RC-CG-EXC8	RC-CG-EXC12	RC-CG-QUI2	RC-CG-QUI6	RC-CG-EXC7	RM-EXC2	RM-QUI2
			Composición mineralógica							
Cuarzo	%	SiO ₂	78	38	89	53	63	55	41	50
Goethita	%	FeO(OH)	18	-	-	-	-	-	10	13
Pirofilita	%	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2	-	-	-	-	-	-	-
Rutilo	%	TiO ₂	<L.D.	-	-	-	-	-	-	-
Dolomita	%	CaMg(CO ₃) ₂	-	-	-	20	6	20	-	-
Mica (Muscovita)	%	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	-	40	6	2	7	12	-	10
Calcita	%	CaCO ₃	-	-	-	20	8	6	-	3
Caolinita	%	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-	-	2	2	<L.D.	2	2	2
Yeso	%	CaSO ₄ ·2(H ₂ O)	-	-	-	-	-	2	27	5
Clorita (Clinocloro)	%	(Mg,Fe) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	-	8	-	-	<L.D.	2	-	-
Plagioclasa (Andesina)	%	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	-	13	-	-	13	-	-	3
Esvanbergita	%	SrAl ₃ (PO ₄)(SO ₄)(OH) ₆	-	-	2	-	-	-	-	-
Siderita	%	FeCO ₃	-	-	-	<L.D.	-	-	8	9
Jarosita	%	(K,H ₃ O)Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	-	-	-	-	-	-	7	2
Pirita	%	FeS ₂	-	-	-	<L.D.	<L.D.	-	4	<L.D.
Galena	%	PbS	-	-	-	-	-	-	-	<L.D.

Fuente: Elaboración propia

<L.D.: Valor menor al límite de detección del método
 -: Mineral no identificado en el análisis de laboratorio

Resultados de análisis mineralógico por microscopía óptica

Parámetro	Unidad	Clasificación, características y composición mineralógica			
		CG-EXC10	CG-QUI7	CG-QUI1	CG-EXC1
Tipo de roca	NA	Arenisca	Conglomerado	Metarenisca débilmente foliada	Toba litocristalina
Téxtura	NA	Clástica	Clástica	Granoblástica, débilmente foliada	Fragmental
Alteración	NA	Sericitización débil Oxidación débil	Oxidación débil Cloritización muy débil	Óxidación débil Sericitización débil Argilización débil Cloritización incipiente	Carbonatación moderada Argilización débil Silicificación débil Sericitización débil
Fragmento de metarenisca	%	-	45	-	-
Fragmento de cuarcita	%	-	5	-	-
Fragmento de metalimolita	%	-	15	-	-
Fragmento de limolita	%	-	10	-	15
Fragmento de Arenisca	%	-	5	-	21
Fragmento de roca con textura porfírica	%	-	-	-	10
Fragmento de roca IV	%	-	-	-	11
Cuarzo/Cuarzo I	%	88	4	87	7
Cuarzo II	%	-	9	-	4
Arcillas	%	-	4	2,5	7
Sericita	%	-	1	1	3
Rutilo	%	Tr	Tr	-	1
Goethita	%	1	Tr	Tr	-
Cloritas	%	-	0,5	Tr	-
Óxidos de hierro	%	6	1,5	1,5	-
plagioclasas	%	-	-	1	4
Zircón	%	Tr	-	tr	Tr
Rutilo	%	-	-	tr	-
Biotita	%	2	-	6	-
Muscovita	%	Tr	-	1	2
Pirita	%	Tr	-	Tr	3
Sericita	%	3	-	-	-
Turmalina	%	Tr	-	-	-
Vídrio	%	-	-	-	1
Moldes de ferromagnesianos	%	-	-	-	-
Apatito	%	-	-	-	Tr
Carbonatos I	%	-	-	-	9
Carbonatos II	%	-	-	-	2

Fuente: Elaboración propia

Tr: Mineral identificado como traza
 -: Mineral no identificado en el análisis de laboratorio
 NA: No aplica

Legenda:

	Minerales primarios
	Minerales secundarios
	Fragmentos de roca
	Matriz/cemento
	Fragmentos de cristales

ANEXO C
CONTROL DE CALIDAD DE
MUESTRAS DUPLICADAS

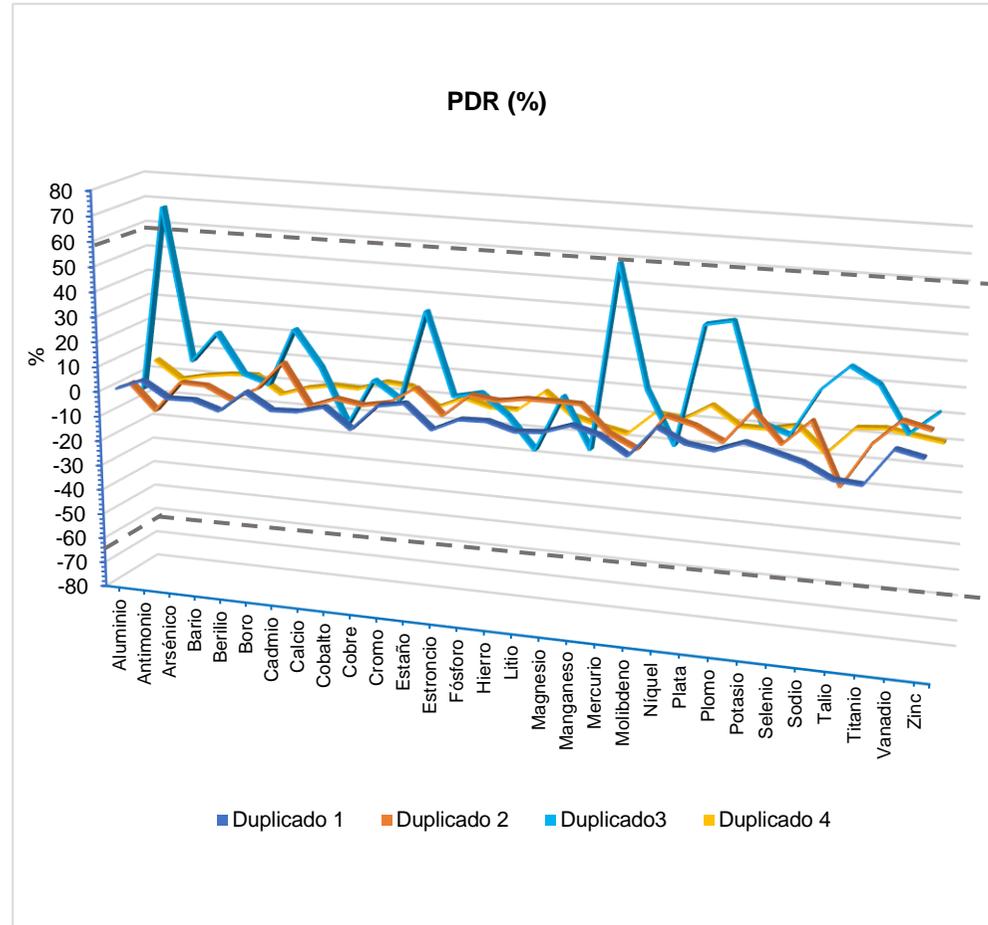
Resultados de metales en muestras duplicadas y originales

Parámetro	Unidad	Duplicado 1		Duplicado 2		Duplicado 3		Duplicado 4	
		RC-CG-QUI4	RC-DUP1	RC-CG-EXC12	RC-DUP2	RM-EXC1	RM-DUP1	RM-QUI2	RM-DUP2
Metales totales por ICP-MS									
Aluminio Total	mg/kg PS	2 405	2 372	5419	5356	7577	8368	12 245	11 136
Antimonio Total	mg/kg PS	0,3436	0,3119	42,41	51,9	99,70	17,69	14,28	14,97
Arsénico Total	mg/kg PS	10,3	10,6	219	209	839	708	849	850
Bario Total	mg/kg PS	48,11	49,24	1047	1006	134,2	87,81	249,0	241,8
Berilio Total	mg/kg PS	0,269	0,294	1,01	1,07	0,420	0,379	0,501	0,481
Boro Total	mg/kg PS	6,885	6,351	20,74	19,67	3,082	2,972	4,093	4,511
Cadmio Total	mg/kg PS	0,35261	0,36878	0,16619	0,12544	6,3602	3,8181	5,3353	5,4768
Calcio Total	mg/kg PS	313 759	325 095	4117	4313	6764	5461	13 375	13 190
Cobalto Total	mg/kg PS	1,649	1,615	0,352	0,341	0,213	0,268	1,626	1,616
Cobre Total	mg/kg PS	4,8	5,5	2,1	2,1	1686	1455	2 275	2 102
Cromo Total	mg/kg PS	5,987	5,582	10,4	10	14,9	14,8	16,1	15,1
Estaño Total	mg/kg PS	0,3349	0,3004	0,4143	0,3479	5,381	2,498	2,176	2,367
Estroncio Total	mg/kg PS	629,1	679,1	1211	1238	174,5	162,0	67,41	66,75
Fósforo Total	mg/kg PS	1 496	1 463	2058	1758	2314	2048	1 346	1 412
Hierro Total	mg/kg PS	3 919	3 805	9300	8154	197480	205670	142 061	148 818
Litio Total	mg/kg PS	1,719	1,773	1,416	1,197	2,282	3,061	6,477	5,744
Magnesio Total	mg/kg PS	2 015	2 045	245	207	538	461	777	820
Manganeso Total	mg/kg PS	209	197	143	121	912	1169	1 434	1 603
Mercurio Total	mg/kg PS	< 0,010	< 0,010	6,16	6,43	1,23	0,297	4,19	4,90
Molibdeno Total	mg/kg PS	0,180	0,206	3,581	4,133	1,113	0,849	1,215	1,178
Níquel Total	mg/kg PS	9,18	8,27	2,13	1,86	1,94	2,26	5,31	5,31
Plata Total	mg/kg PS	< 0,0020	< 0,0020	0,0551	0,0508	57,16	24,48	48,81	42,88
Plomo Total	mg/kg PS	19,7	20,3	424	434	6039	2448	5 883	5 978
Potasio Total	mg/kg PS	936	888	1673	1319	603	555	1 527	1 550
Selenio Total	mg/kg PS	0,507	0,508	<0,006	<0,006	2,973	2,932	4,505	4,366
Sodio Total	mg/kg PS	113	120	28	22,9	42,8	29,2	80,6	95,1
Talio Total	mg/kg PS	0,2572	0,3040	10,36	13,71	22,70	12,56	15,45	14,64
Titanio Total	mg/kg PS	15	18	5,1	4,8	3,5	2,2	8,7	8,1
Vanadio Total	mg/kg PS	10	9	13	10	61	55	58	56
Zinc Total	mg/kg PS	86	81	259	210	1845	1384	2 338	2 330

Fuente: Elaboración propia

Porcentaje de diferencia relativa (PDR)

Parámetro	RPD%			
	Duplicado 1	Duplicado 2	Duplicado3	Duplicado 4
Metales totales				
Aluminio	0,7	0,6	-5,0	4,74
Antimonio	4,8	-10,1	69,9	-2,36
Arsénico	-1,4	2,3	8,5	-0,06
Bario	-1,2	2,0	20,9	1,47
Berilio	-4,4	-2,9	5,1	2,04
Boro	4,0	2,6	1,8	-4,86
Cadmio	-2,2	14,0	25,0	-1,31
Calcio	-1,8	-2,3	10,7	0,70
Cobalto	1,0	1,6	-11,4	0,31
Cobre	-6,8	0,0	7,4	3,95
Cromo	3,5	2,0	0,3	3,21
Estaño	5,4	8,7	36,6	-4,20
Estroncio	-3,8	-1,1	3,7	0,49
Fósforo	1,1	7,9	6,1	-2,39
Hierro	1,5	6,6	-2,0	-2,32
Litio	-1,5	8,4	-14,6	6,00
Magnesio	-0,7	8,4	7,7	-2,69
Manganeso	3,0	8,3	-12,3	-5,56
Mercurio	0,0	-2,1	61,1	-7,81
Molibdeno	-6,7	-7,2	13,5	1,55
Níquel	5,2	6,8	-7,6	0,00
Plata	0,0	4,1	40,0	6,47
Plomo	-1,5	-1,2	42,3	-0,80
Potasio	2,6	11,8	4,1	-0,75
Selenio	-0,1	0,0	0,7	1,57
Sodio	-3,0	10,0	18,9	-8,25
Talio	-8,3	-13,9	28,8	2,69
Titanio	-9,1	3,0	22,8	3,57
Vanadio	5,3	13,0	5,2	1,75
Zinc	3,0	10,4	14,3	0,17



Variabilidad en suelos (Minam, 2021)

Duplicado de laboratorio	PDR < 30%
Duplicado de campo	PDR < 60%