

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Evaluación geoquímica-metalogenética de la subcuenca
Antabamba para determinar clusters potenciales de pórfidos de
cobre-molibdeno, Apurímac**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

Elaborado por

Carlos Nicolás Fernández Geraldino

 [0009-0007-4004-6918](https://orcid.org/0009-0007-4004-6918)

Asesor

MSc. Carlos Alberto Rojas León

 [0009-0004-0770-4104](https://orcid.org/0009-0004-0770-4104)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Fernández Geraldino [1]
Referencia/Reference	[1] C. Fernández Geraldino, “Evaluación geoquímica-metalogenética de la subcuenca Antabamba para determinar clusters potenciales de pórfidos de cobre-molibdeno, Apurímac” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Fernández, 2024)
Referencia/Reference	Fernández, C. (2024). <i>Evaluación geoquímica-metalogenética de la subcuenca Antabamba para determinar clusters potenciales de pórfidos de cobre-molibdeno, Apurímac</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todos los amigos, docentes, compañeros de trabajo y jefes que estuvieron dispuestos a compartir sus conocimientos y contribuir a mi formación como profesional

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Ingeniería, por formarme para ser un profesional de nivel mundial dispuesto a contribuir con el crecimiento del país.

De igual manera, al equipo de ANAPs y Metalogenia del INGEMMET, en especial a los ingenieros Luis Quispe, Eder Villarreal y Víctor Torres, compañeros, guías y mentores en el trabajo, por el apoyo en cada etapa de mi formación y sus grandes enseñanzas.

Finalmente, a mis compañeros Alonso Otiniano y Joseps Andrade por sus grandes ideas y enseñanzas en los campos de la estadística, geoquímica, programación y análisis de datos.

Resumen

El presente trabajo se realizó en la subcuenca Antabamba, región de Apurímac, con el fin de determinar clusters exploratorios potenciales para pórfidos cupríferos en el entorno del Batolito Andahuaylas-Yauri. En esta zona afloran rocas intrusivas de dioritas-tonalitas relacionadas a la mineralización del Eoceno-Oligoceno, y los yacimientos de tipo Pórfido de Cu-Mo La Yegua, Los Chancas, Antilla, Utupara, y Trapiche.

Se estandarizó la información geoquímica de 962 muestras de sedimentos de quebrada proporcionada por INGEMMET entre los años 2008 a 2014 analizados por espectrometría de plasma (ICP-MS) y digestión con agua regia, posteriormente se corrigieron los valores por debajo de límite de detección, se obtuvo que el promedio de la Intercuenca Alto Apurímac es de 161 ppm de Cu, 33 ppm de Pb, 117 ppm de Zn y 45 ppm de As.

Para delimitar los clusters exploratorios se realizó un mapa de probabilidades mediante el cálculo de índices mineralógicos tomando la asociación geoquímica de Cu-Pb-Zn-Mo-As-Sb-Bi, se concluyó la microcuenca 02 es la de mayor potencial dado que contiene un promedio de 324 ppm de cobre, 41 ppm de Pb, 55 ppm de Zn y 68 ppm de As, se evidencian alteraciones relacionadas a pórfidos como silicificación al oeste de la subcuenca, alteraciones propilitica-argílica al centro, y rocas de composición granodiorita-diorita con valores promedio de 685 ppm de Cu, 131 ppm de As, 35 ppm de Zn con valores máximos en zonas de alteración potásica-argílica.

Palabras clave — Cluster, batolito, valor umbral, sedimento de quebrada, índices mineralógicos

Abstract

This study was conducted in the Antabamba sub-basin, located in the Apurimac region, with the aim of identifying potential exploratory clusters for copper porphyries in the proximity of Andahuaylas-Yauri Batholith. In this area, intrusive rocks of diorites and tonalites related to Eocene-Oligocene mineralization outcrop, alongside the Cu-Mo porphyry deposits of La Yegua, Los Chancas, Antilla, Utupara, and Trapiche.

The geochemical information from 962 sediment samples collected from streams, provided by INGEMMET between 2008 and 2014, was standardized. These samples were analyzed using mass spectrometry (ICP-MS) with aqua regia dilution. Subsequently, values below the detection limit were corrected, resulting in a global average of 161 ppm Cu, 33 ppm Pb, 117 ppm Zn, and 45 ppm As.

To delineate the exploratory clusters, a probability map was created by calculating mineralogical index based on the chemical association of Cu-Pb-Zn-Mo-As-Sb-Bi. It was concluded that micro-basin 02 exhibits the highest potential, containing an average of 324 ppm copper, 41 ppm Pb, 55 ppm Zn, and 68 ppm As. Alterations related to porphyries are evidenced, such as silicification in the western part of the sub-basin, propylitic-argillic alterations in the center, and granodiorite-diorite rocks with average values of 685 ppm Cu, 131 ppm As, and 35 ppm Zn, with maximum values found in areas of potassic-argillic alteration.

Keywords — clusters, batholith, threshold, stream sediment, mineralogical index.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción.....	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	3
1.2.1 Situación problemática.....	3
1.2.2 Formulación del problema.....	3
1.2.3 Justificación de la investigación.....	4
1.3 Objetivos del estudio.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.3.3 Hipótesis general.....	4
1.3.4 Hipótesis específicas.....	4
1.4 Antecedes investigativos.....	5
1.4.1 Antecedentes internacionales.....	5
1.4.2 Antecedentes nacionales.....	7
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	9
2.1. Marco teórico.....	9
2.1.1 Evaluación geoquímica.....	9
2.1.2 Evaluación metalogenética.....	10
2.2 Marco conceptual.....	13
2.2.1 Geoquímica.....	13
2.2.2 Anomalías geoquímicas, Background (BG) y Threshold (TH).....	13
2.2.3 Pórfido cuprífero.....	13
2.2.4 Parámetros estadísticos.....	14

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	15
3.1 Geología regional	15
3.1.1 Estratigrafía	15
3.1.2 Unidades intrusivas	25
3.1.3 Geología estructural	25
3.1.4 Minas en el área de estudio	25
3.2 Recolección de información existente	26
3.2.1 Metodología	26
3.2.2 Sedimentos de quebrada de muestreo y muestras de roca	27
3.2.3 Óxidos y arcillas – Imágenes LANDSAT 18S	31
3.3 Análisis estadístico univariante y distribución estadística	34
3.3.1 Análisis estadístico por elemento	36
3.4 Análisis multivariado	38
3.4.1 Análisis bivariado (AB)	38
3.4.2 Índices mineralógicos	44
3.4.3 Mapa de valores atípicos	45
3.4.4 Mapas probabilísticos – Índices 01 al 05	49
3.5 Delimitación de microcuencas de mayor potencial	52
3.5.1 Análisis estadístico por microcuencas	54
3.5.2 Validación petrográfica de campo	57
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	67
4.1 Análisis de anomalías geoquímicas y alteraciones	67
4.2 Identificación de asociaciones geoquímicas significativas	67
4.3 Integración de análisis geoquímico y geológico	67
4.4 Discusión de resultados	67
4.5 Propuesta ingenieril	68
Conclusiones	69
Recomendaciones	70

Referencias bibliográficas..... 71

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Acceso a la zona de estudio	1
Tabla 2 : Subcuencas y áreas de la Intercuenca Alto Apurímac	28
Tabla 3 : Muestras de sedimentos y rocas, Intercuenca Alto Apurímac	31
Tabla 4 : Proporción de datos detectados en la subcuenca Antabamba	34
Tabla 5 : Parámetros estadísticos del Cu, Pb, Zn, Mo, As, Sb, Bi, Ag	35
Tabla 6 : Background y thresholds del Cu, Pb, Zn, Mo, As, Sb, Bi, Ag	35
Tabla 7 : Valores de fondo y umbrales de dominios geológicos regionales	36
Tabla 8 : Valores de correlación de Pearson entre los elementos en ppm	39
Tabla 9 : Porcentaje de varianza explicada por componente	41
Tabla 10: Valores por encima de los threshold, plata (Ag)	42
Tabla 11: Asociaciones químicas según cada índice mineralógico	44
Tabla 12: Parámetros estadísticos, microcuenca 01	54
Tabla 13: Parámetros estadísticos, microcuenca 02	55
Tabla 14: Parámetros estadísticos, microcuenca 03	55
Tabla 15: Parámetros estadísticos, microcuenca 04	55
Tabla 16: Parámetros estadísticos, microcuenca 05	56
Tabla 17: Estudios a realizar y propuesta económica	68

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Ubicación de la zona de estudio	2
Figura 2 : Alteraciones y mineralización en pórfidos	11
Figura 3 : Mineralización en yacimientos epitermal.....	12
Figura 4 : Formación Puente, areniscas alteradas plegadas	19
Figura 5 : Formación Auzangate, pelitas intercaladas con areniscas arcóscicas.....	19
Figura 6 : Formación Labra, areniscas rosadas en estratos delgados	20
Figura 7 : Formación Cachíos, lutitas oscuras con lentes de carbón	20
Figura 8 : Columna estratigráfica de la subcuenca Antabamba	23
Figura 9 : Mapa geológico de la subcuenca Antabamba.....	24
Figura 10: Divisiones de la Intercuenca Alto Apurímac.....	27
Figura 11: Muestreo de sedimentos en el río Caraibamba.....	29
Figura 12: Ubicación de las muestras de sedimentos de quebrada	30
Figura 13: Ubicación de las muestras de roca.....	30
Figura 14: Distribución de óxidos y arcillas, Intercuenca Alto Apurímac	31
Figura 15: Unidades mineras, zonas de óxidos y arcillas, Intercuenca Alto Apurímac	33
Figura 16: Análisis estadístico de componentes principales (PCA).....	40
Figura 17: Varianza explicada por cada componente en el análisis PCA.....	41
Figura 18: Correlación bivariable entre las concentraciones elementales.....	43
Figura 19: Ubicación de muestras sobre valores umbrales, plata (Ag)	45
Figura 20: Ubicación de muestras sobre valores umbrales, arsénico (As).....	46
Figura 21: Ubicación de muestras sobre valores umbrales, bismuto (Bi).....	46
Figura 22: Ubicación de muestras sobre valores umbrales, molibdeno (Mo)	47
Figura 23: Ubicación de muestras sobre valores umbrales, plomo (Pb)	47
Figura 24: Ubicación de muestras sobre valores umbrales, antimonio (Sb).....	48
Figura 25: Ubicación de muestras sobre valores umbrales, zinc (Zn).....	48
Figura 26: Ubicación de muestras sobre valores umbrales, cobre (Cu).....	49

Figura 27: Mapa probabilístico-índice 01	50
Figura 28: Mapa probabilístico-índice 02	50
Figura 29: Mapa probabilístico-índice 03	51
Figura 30: Mapa probabilístico-índice 04	51
Figura 31: Mapa probabilístico-índice 05	52
Figura 32: Subdivisión por microcuencas de la subcuenca Antabamba.....	53
Figura 33: Mapa probabilístico-índice 01, y subdivisión por microcuencas	53
Figura 34: Mapa de mayores valores anómalos, y subdivisión por microcuencas	54
Figura 35: Mapa probabilístico-índice 01, y subdivisión por microcuencas	56
Figura 36: Ubicación de las muestras de roca tomadas en campo.....	57
Figura 37: Muestra Ant_01, granodiorita con feldespatos potásicos alterados.....	58
Figura 38: Muestra Ant_02, granodiorita con alteración potásica y magnetita	58
Figura 39: Muestra Ant_03, veta de cuarzo con halos de clorita-epidota.....	59
Figura 40: Muestra Ant_04, diorita con clorita-calcita	59
Figura 41: Muestra Ant_05, venilla de cuarzo con halos de clorita-epidota.....	60
Figura 42: Muestra Ant_07, veta de cuarzo con presencia de caolinita	61
Figura 43: Muestra Ant_06, diorita con alteración propilitica y epidota-clorita.....	61
Figura 44: Muestra Ant_08, granodiorita con alteración potásica-biotita secundaria.....	62
Figura 45: Muestra Ant_09, diorita con epidota con venilla de calcita y óxidos.....	63
Figura 46: Muestra Ant_10, andesita con venillas de cuarzo con óxidos y clorita	63
Figura 47: Muestra Ant_12, granodiorita con presencia de cuarzo-sericita	64
Figura 48: Muestra Ant_11, granodiorita con biotita secundaria y magnetita	64
Figura 49: Muestra Ant_13, granodiorita con alteración potásica y calcopirita	65
Figura 50: Muestra Ant_15, veta de cuarzo con diseminación de pirita-calcopirita	65
Figura 51: Muestra Ant_16, veta de cuarzo con diseminación de pirita-calcopirita	66
Figura 52: Mapa de zonas prospectivas y muestras propuestas.....	68

Introducción

El crecimiento de la población y necesidad de recursos económicos en un país minero como el Perú dónde más del 15 % del producto bruto interno (PBI) proviene de actividades mineras por lo que es de vital importancia hallar nuevos yacimientos y por ende mejorar o afinar técnicas de exploración usando toda la información disponible y en la época actual combinarlo con la programación con el fin de mejorar la precisión y minorizar tiempos.

Desde un punto de vista minero, los sedimentos de quebrada y las anomalías geoquímicas asociadas son significativas en la exploración, y desempeñan un papel importante dado la cantidad de información que otorgan, por lo que se encuentran entre los mejores métodos de muestreo ya que facilitan las mediciones de concentración química de rocas y suelos en el cauce de un río.

Las anomalías identificadas son importantes indicadores geoquímicos utilizados en estudios regionales por lo que se utilizan diferentes métodos de interpolación según sea el caso, como IDW (interpolación por inverso de la distancia) o kriging, por lo que es prioritario determinar el método más eficaz dependiendo de la información existente y los objetivos de la exploración, por lo que dado que existen múltiples formas de interpolación por elemento y se tiene como fin exploratorio Pórfidos de cobre, se realizó una interpolación por asociaciones químicas, dado que este método utiliza múltiples combinaciones de elementos que permitirían adecuar e inferir el comportamiento geoquímico en el área, tomando como puntos de referencia los yacimientos presentes en la zona, y así determinar las zonas con mayor potencial de contener mineralización.

Como parte de un análisis estadístico para entender el comportamiento de la información química existente se debe considerar la normalidad, distribución y estadísticos descriptivos de cada variable para así tener una mejor visión de la información y mejores resultados al determinar zonas de mayor potencial.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

Se detallan aspectos relevantes de la subcuenca Antabamba como la ubicación, delimitación del área, catastro minero, puntos de muestreo de sedimentos de quebrada y toma de muestras de roca con fines exploratorios.

1.1 Generalidades

La subcuenca Antabamba se encuentra enmarcada en los cuadrángulos de Andayhuaylas (28p), Abancay (28q), Chalhuanca (29p), Antabamba (29q), Pacapausa (30p), y Chulca (30q), dentro de las siguientes coordenadas UTM-1984 zona 18S:

8 360 000 m S	670 000 m E	8 520 000 m S	670 000 m E
8 360 000 m S	765 000 m E	8 520 000 m S	765 000 m E

La zona de estudio se ubica entre las provincias de Andahuaylas, Abancay, Aymaraes, y Antabamba, región de Apurímac (ver Figura 1). La extensión del área de estudio es de 8034 km² aproximadamente.

Tabla 1

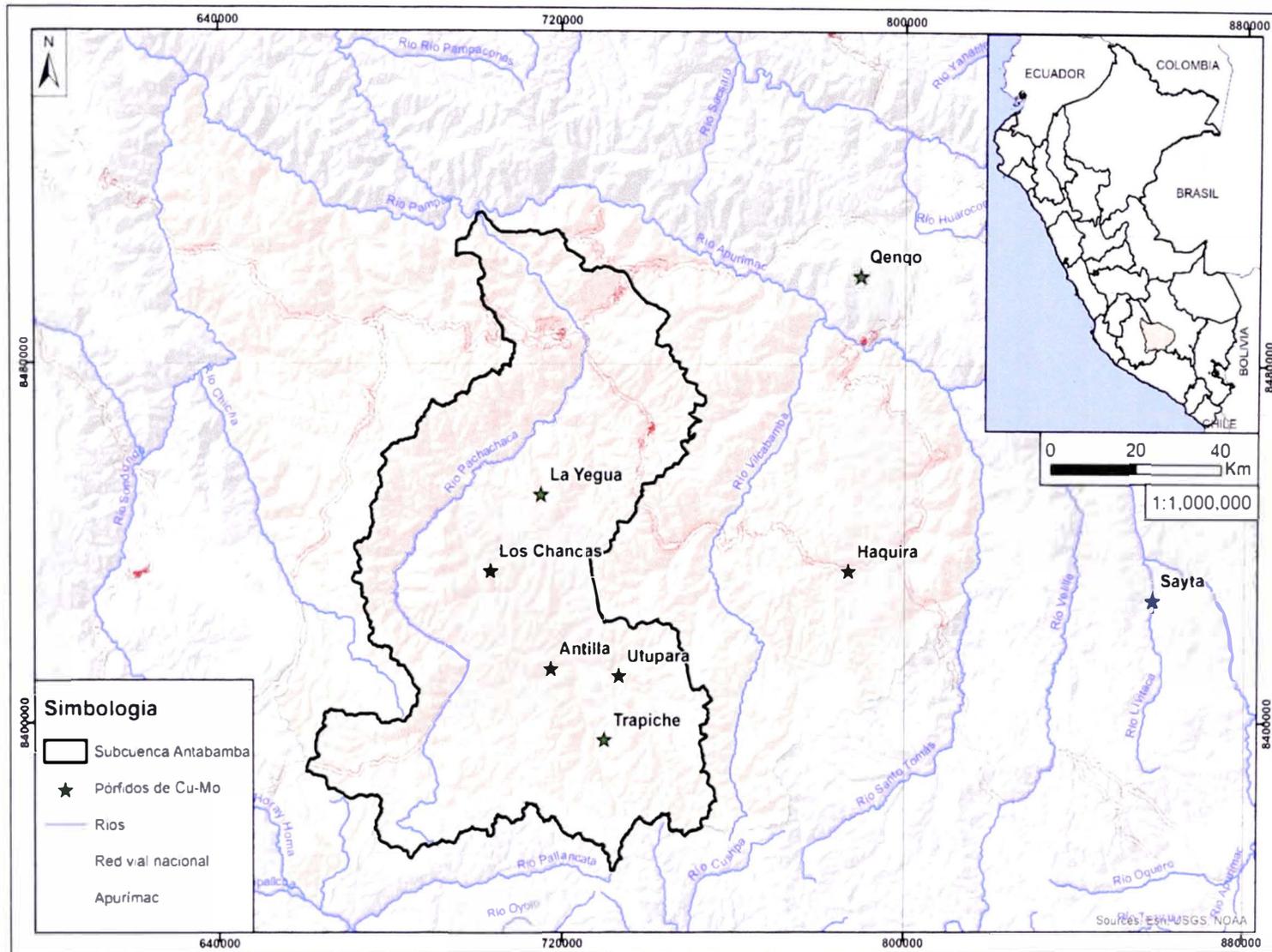
Acceso a la zona de estudio.

Lugar	Vía	km	Tiempo
Lima – Cusco	Aérea	586.0	1h 30min
Cusco – Apurímac	Terrestre	328.0	06 horas
Lima – Apurímac	Terrestre	888.9	16 horas

En el Tabla 1 se muestran los medios de acceso al área de trabajo. El acceso se realiza, preferentemente, por vía aérea y terrestre, pasando de vía afirmada a trocha carrozable por diferentes vías que lleguen hasta la ciudad de Abancay

Figura 1

Ubicación de la zona de estudio.



Nota: fuente <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main> (Sistema de información geográfica que recopila la información geológica y catastral minera generada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET)

1.2 Descripción del problema de investigación

En esta sección se plantea la situación problemática, la formulación del problema y la justificación de la investigación.

1.2.1 Situación problemática

En los últimos 30 años el descubrimiento de nuevos yacimientos minerales ha ido decayendo por lo que se han ido creando y probando nuevos métodos de exploración, estudios y tecnologías con el fin de incrementar la precisión y exactitud en una campaña exploratoria (Okada, 2021); y dado que el cobre, uno de los metales más utilizados en múltiples industrias, proviene en un 60 % de yacimientos tipo Pórfido, se tiene como prioridad económica el determinar nuevas zonas potenciales de cobre de este tipo yacimiento (Tabelin et al., 2021). Por otro lado, Perú no es una excepción dado que el cobre es de suma importancia ya que representa el 32.8 % del valor de todas las exportaciones (20´698 millones de dólares), estando incluso por encima del oro que representa un 16 % (10´121 millones de dólares), posicionando la región de Ancash con la mayor producción de cobre con un 20 %, seguido de Arequipa con 19.4 % y Apurímac con 13.1 % del total (MINEM, 2022).

Dentro de la región de Apurímac existen yacimientos tipo Pórfido de cobre como Las Bambas, Haqira, Antabamba o Trapiche, pero aún se tiene la necesidad de encontrar nuevas zonas potenciales para lo que es necesario utilizar metodologías diferentes a las ya empleadas, como un análisis estadístico por asociaciones geoquímicas y herramientas como un lenguaje de programación mediante un lenguaje como R o Python, todo esto con el fin de delimitar nuevas zonas con mayor precisión, exactitud, y en un menor tiempo.

1.2.2 Formulación del problema

La disminución en el descubrimiento de nuevos yacimientos minerales, la importancia económica del cobre y la limitación de nuevas metodologías en la exploración han conducido al desarrollo de nuevos métodos para identificar zonas potenciales de yacimientos tipo Pórfidos de cobre en la subcuenca Antabamba, región de Apurímac.

1.2.3 Justificación de la investigación

La importancia económica del cobre en Perú subraya la necesidad de optimizar los métodos de exploración para identificar nuevas zonas potenciales de yacimientos tipo Pórfido. Además, el desarrollo y aplicación de herramientas como el análisis estadístico por asociaciones geoquímicas y el uso de lenguajes de programación como R pueden ofrecer soluciones más eficientes y precisas para abordar este desafío.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Evaluación geoquímica-metalogenética de la subcuenca Antabamba para determinar clusters potenciales de pórfidos de cobre-molibdeno, Apurímac

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluación geoquímica de la subcuenca Antabamba para determinar clusters potenciales de pórfidos de cobre-molibdeno.
- Evaluación metalogenética de la subcuenca Antabamba para determinar clusters potenciales de pórfidos de cobre-molibdeno.
- Integrar el análisis de datos geoquímicos y geológicos para la delimitación de nuevas zonas potenciales de yacimientos tipo Pórfido de cobre.

1.3.3 Hipótesis general

La evaluación geoquímica-metalogenética de la subcuenca Antabamba determinará clusters potenciales de pórfidos de cobre-molibdeno.

1.3.4 Hipótesis específicas

- La evaluación geoquímica de la subcuenca Antabamba determinará clusters potenciales de pórfidos de cobre-molibdeno.
- La evaluación metalogenética de la subcuenca Antabamba determinará clusters potenciales de pórfidos de cobre-molibdeno.
- Al integrar el análisis de datos geoquímicos y geológicos se delimitarán nuevas zonas potenciales de yacimientos tipo Pórfido de cobre.

1.4 Antecedes investigativos

1.4.1 Antecedentes internacionales

Turel (2012) en su trabajo *Interpretación geoquímica de los datos multielemento de sedimentos de corriente de la carta La Quiaca*, realizó una interpretación de datos geoquímicos multielementales a partir del reanálisis geoquímico de 80 muestras de sedimentos de quebrada mediante un método estadístico factorial para la reducción de variables y la definición de componentes principales e índices de mineralización, concluyendo que los índices o factores de mineralización se asocian con los tipos de yacimientos en el área.

Gozalvez et al. (2016) en su trabajo de investigación titulado *Carta Minero-Metalogenética 2366-III Susques*, analizaron 890 sedimentos de quebrada por 48 elementos por el método de análisis químico Emisión en Plasma Inductivamente Acoplado (ES-ICP), posteriormente con el fin de identificar las anomalías geoquímicas realizaron un tratamiento estadístico con base en los índices de mineralización propuestos por Amor et al. (1998), y de esta forma concluyeron la existencia de la correlación entre los índices de mineralización más altos con la ubicación de los yacimientos.

Chen et al. (2015) en su trabajo *Principal Component Analysis of Geochemical Data from the REE-rich Maw Zone, Athabasca Basin, Canada*, analizaron los resultados químicos de 545 areniscas procesadas por el tratamiento de digestión total, con el fin de obtener los ensambles químicos relacionados al enriquecimiento de Fe, U, V, y tierras raras. Realizaron una reducción de variables mediante un PCA (principal component analysis), concluyendo que la asociación Sr-Th-P en monacitas, y la presencia U-Fe confirman la existencia de minerales de U en ambientes oxidados. Se destaca la utilidad y eficiencia del análisis PCA al evaluar el potencial de la correlación entre las asociaciones químicas y los procesos geológicos.

Fauß et al. (2021) en su estudio *Minimax robust detection: Classic results and recent advances*, realizan un análisis y comparación entre diversos métodos de corrección de datos por debajo del límite de detección, denotando las ventajas y desventajas de cada

método, concluyendo que la corrección mediante métodos robustos (ROS) generan menor error y divergencia sin modificar los parámetros de dispersión.

Wang & Zuo (2020) en su trabajo *Assessing geochemical anomalies using geographically weighted lasso*, realizaron un análisis de 4092 muestras de sedimentos de quebrada en el distrito de Fujian, China, analizadas por fluorescencia de rayos X y espectrometría de rayos Y obteniéndose los elementos Al, Fe, K, P, Si, Cr, Ti, Y, Zr y Cu, Pb, Bi, Cd, Co, Mo, W, La, Nb, Th, U respectivamente, posteriormente analizaron esta química por un método de pesos por distancias (GWL- geographically weighted lasso) para reducir la heterogeneidad al realizar una regresión multivariable, obteniendo que la asociación de elementos químicos como Cu-Mo-Pb-Zn-As y otros factores como el entorno de las fallas, y unidades geológicas permite tener una interpolación más precisa con un error de GWL de 0.007 y un coeficiente de determinación de 0.96.

Zuo & Xiong (2020) en su trabajo *Geodata science and geochemical mapping. Journal of Geochemical Exploration*, realizaron un análisis de muestras de sedimentos de quebrada con una densidad de 1 muestra por 4 km² en la provincia Yunnan, China, mediante ICP-MASA obteniéndose el valor de Bi, Cd, Co, Cu, La, Mo, Nb, Th, U, W, por Fluorescencia de rayos X (XRF) se obtuvieron Al, Cr, Fe, K, P, Si, Ti, Y, Zr, por espectrometría de plasma inductivo (ICP-AES) obteniendo Ba, Be, Ca, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Sr, V, Zn, por emisión espectrometría (ES) se obtuvieron Ag, B, Sn, por fluorescencia hidruro espectro (HG-AFS) se obtuvo As, Sb, y por absorción espectro atómico con grafito se obtuvo Au, Hg, F. Estos valores fueron procesados por un análisis PCA, cálculo del promedio (background), el umbral geoquímico (threshold), procesamiento mediante una asociación geoquímica de Ag, Au, As, Bi, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, W, Zn para yacimientos polimetálicos de Sn, concluyendo con un mapa de interpolación de probabilidades que mejoraría los métodos de exploración actuales dada su precisión por un análisis de asociaciones geoquímicas según el tipo de yacimiento.

1.4.2 Antecedentes nacionales

Huanacuni (2009) en el estudio titulado *Recursos minerales de la provincia de Cotabambas de Apurímac*, menciona el potencial de la región dado que predomina la Franja XV de Pórfidos-Skars de Cu-Mo (Au, Zn) y depósitos Cu-Au-Fe relacionados con intrusiones del Eoceno-Oligoceno, la mineralización está relacionada con los intrusivos intermedios a ácidos del Batolito Andahuaylas-Yauri (Eoceno-Oligoceno), presenta sistemas de fallas Urcos-Sicuani-Ayaviri, Cusco-Lagunillas-Mañazo, Abancay-Andahuaylas-Totos-Licapa, y Abancay-Condorama-Caylloma, y yacimientos como Cotabambas, Las Bambas, y Haqira.

Acosta et al. (2009) en el estudio titulado *Memoria del mapa metalogenético del Perú*, se detalla la base teórica en la delimitación de las franjas metalogenéticas, las características de cada franja como los yacimientos presentes, siendo el apartado de-Skarn de Cu-Mo y depósitos Au-Cu-Fe relacionado a intrusivos del Eoceno, dónde se indica que la mineralización está relacionada con granitoides dioríticos-granodioríticos del Batolito Andahuaylas-Yauri del Eoceno-Oligoceno y controlados por las fallas Urcos-Sicuani-Ayaviri, Cusco-Lagunillas-Mañazo, Abancay-Andahuaylas-Totos-Chincheros-Licapa, Abancay-Condorama-Caylloma. Los intrusivos intermedios-ácidos se relacionan con la mineralización Cu-Mo, mientras que los básicos se relacionan con la mineralización Fe-Cu-Au, siendo los yacimientos más representativos de la franja Tintaya, Las Babas, Cotabambas, Antapacay, Haqira, Los Chancas y Trapiche, con edades entre 42 a 30 Ma.

Rivera et al. (2011), en el estudio titulado *Metalogenia del Batolito Andahuaylas - Yauri y sus implicancias en la exploración de pórfidos Cu-Au*, mediante el análisis de 2040 muestras de sedimentos de quebrada por ICP-MS, el análisis de rocas por óxidos, geocronología, isótopos y una interpretación estructural, se determinó el potencial de la región de Apurímac, pórfidos de edades promedio de 35.5 Ma, un dominio metaluminoso-peraluminoso, anomalías de Sr, Ca, Na, un alto potencial para pórfidos de Cu-Mo, y concluyendo con la delimitación del cluster Cotabambas y Colca.

Rivera y Condori (2010) en el estudio titulado *Uso de la geoquímica regional para caracterizar provincias Metalogénicas con una visión para la exploración*, analizaron 8225 muestras de sedimentos de quebrada por ICP obteniendo los elementos Au, Hg, Al, Sb, As, Be, Bi, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Fe, La, Pb, Mg, Mn, Mo, Ni, P, K, Sc, Ag, Na, Sr, Sn, Ti, W, V, Y, Zn, Zr y Tl, posteriormente procesaron la información mediante el software Geosoft Chimera 5.1 para obtener una interpolación que se correlacionan con los yacimientos como La Granja, Cañariaco, Conga, Yanacocha, entre otros, concluyendo el gran potencial e importancia del uso de la geoquímica regional en la exploración.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1. Marco teórico

2.1.1 *Evaluación geoquímica*

Una evaluación geoquímica se define (White, 2005) como el estudio de la composición química de elementos para determinar anomalías mediante cálculos estadísticos, modelos estadísticos, asociaciones químicas, elementos asociados y modelos de probabilidad.

2.1.1.1 Modelos estadísticos. Para la creación de modelos estadísticos se utiliza un análisis multivariable mediante elementos principales o PCA (“principal components analysis”), método que ha ido evolucionando desde sus fundamentos teóricos (Pearson, 1901), hasta su aplicación en estudios geológicos realizados por Jöreskog (1996), Davis (1986) y Jackson (2003). Posteriormente para fines exploratorios se añadieron las anomalías geoquímicas (Turkey, 1993), los “Box-Plot” (Williamson, 1989) y de esta forma detectar outliers (Shevlyakov et al., 2013). Menciona De Llano (2003) que el método más eficiente para completar datos bajo el límite de detección es el semiparamétrico, (Robust Regression of Order Statistics, ROS). Adicionalmente, para el análisis exploratorio de datos (AED), se realiza el gráfico cuantil-cuantil (qqplot) para determinar el ajuste de la distribución (EPA QA/G-9S, 2006).

2.1.1.2 Asociaciones geoquímicas. Las asociaciones geoquímicas, también llamados índices de mineralización, se definen como el resultado del cálculo a partir de la normalización, estandarización de datos geoquímicos de sedimentos de quebrada, la media aritmética de valores normalizados y desviación estándar, obteniéndose el índice como la proporción entre la diferencia y la media con la desviación estándar (Turel, 2012), donde se tomó el índice PCI (Porphyry Copper Index) obtenido las variables $Cu+Mo+Au+Ag+Re+As+Pb+Zn+Te+Sb+Bi$.

2.1.1.3 Elementos químicos asociados. Dentro del estudio de los yacimientos tipo pórfido se tienen elementos asociados a la mineralización como el arsénico o bismuto

sirviendo como sustento al índice de pórfido de cobre (PCI) seleccionado que toma como referencia los elementos pathfinders para pórfidos de cobre (Wang, 2020).

2.1.1.4 Modelo de probabilidad. Un modelo estadístico se define como una representación matemática de los elementos químicos cuyo fin es predecir zonas de mayor valor y simplificar el entendimiento del comportamiento de los elementos químicos en la zona en comparación a un análisis univariante, esto es una herramienta útil en la exploración dado que indica la mayor probabilidad en una zona (Helba, 2021).

2.1.2 Evaluación metalogenética

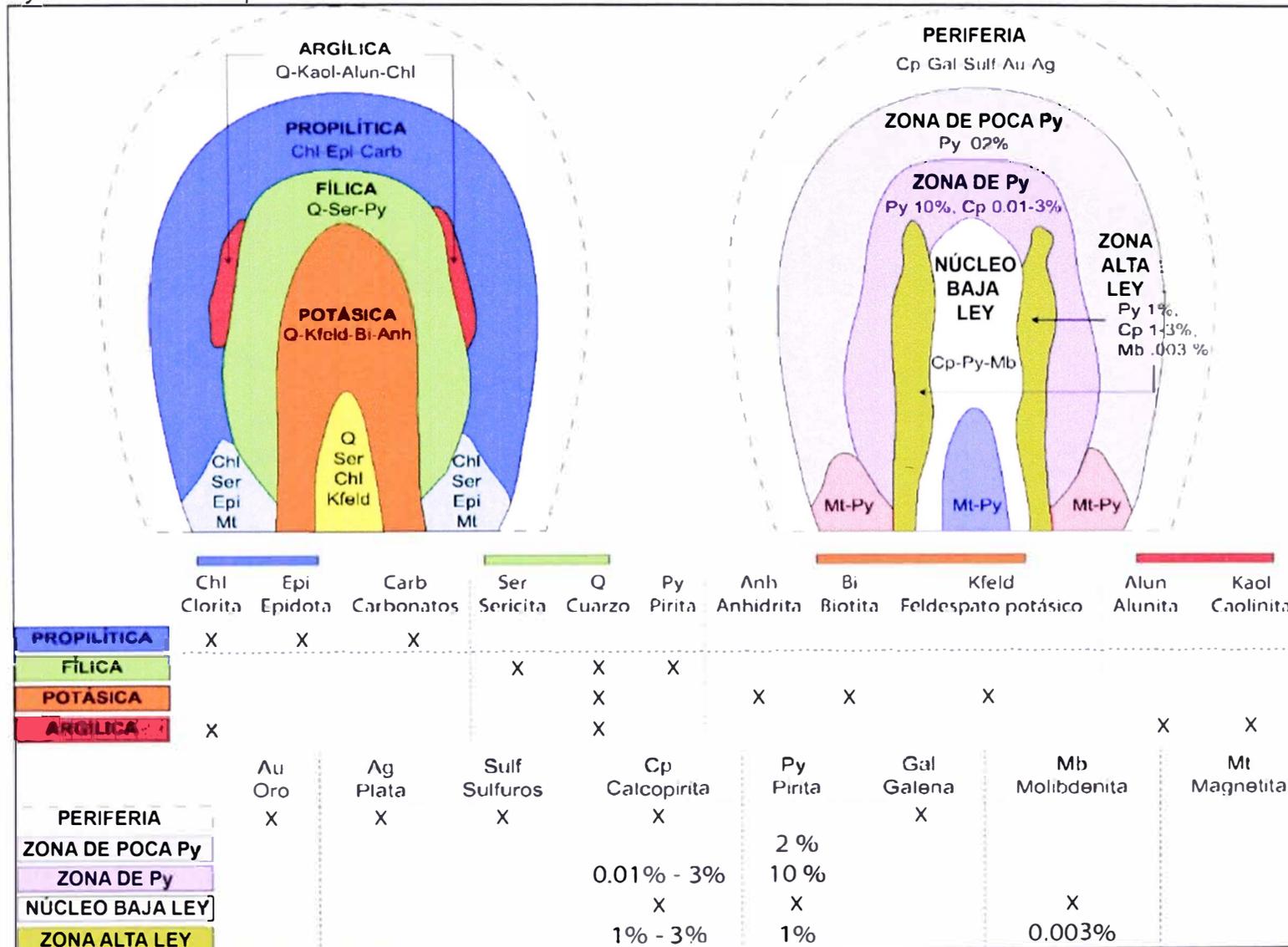
Una evaluación metalogenética se define como el estudio y análisis de la distribución, origen y factores de la formación de yacimientos para identificar zonas potenciales, mediante una caracterización geológica-estructural, y presencia de óxidos (Bellido, 1972).

2.1.2.1 Caracterización geológica. La caracterización geológica es el proceso que permite analizar las características y propiedades de la información geológica de un área mediante el estudio principalmente de la estratigrafía, geología, y estructuras presentes en el área, y de forma complementaria la geoquímica, geofísica, tectónica o hidrología (Valencia et al., 2021).

2.1.2.2 Mineralización supérgena-óxidos y arcillas. La presencia de óxidos o Leachcapping es definida como una cobertura de óxidos generado por fenómenos supérgenos y relacionado a yacimientos epitermales y en los alrededores de yacimientos tipo Pórfido (Sillitoe, 1995), por otro lado la presencia de arcillas está relacionada al intemperismo de minerales como illita, esmectita, y caolinitas en zonas argílicas de alta temperatura (cuarzo, illita, illita/esmectita), argílicas de baja temperaturas (cristobalita, esmectita, caolinita), y propilíticas de baja temperatura (esmectita, plagioclasa), lo que indicaría los halos de distancia media a los focos de mineralización (Figura 2 y Figura 3).

Figura 2

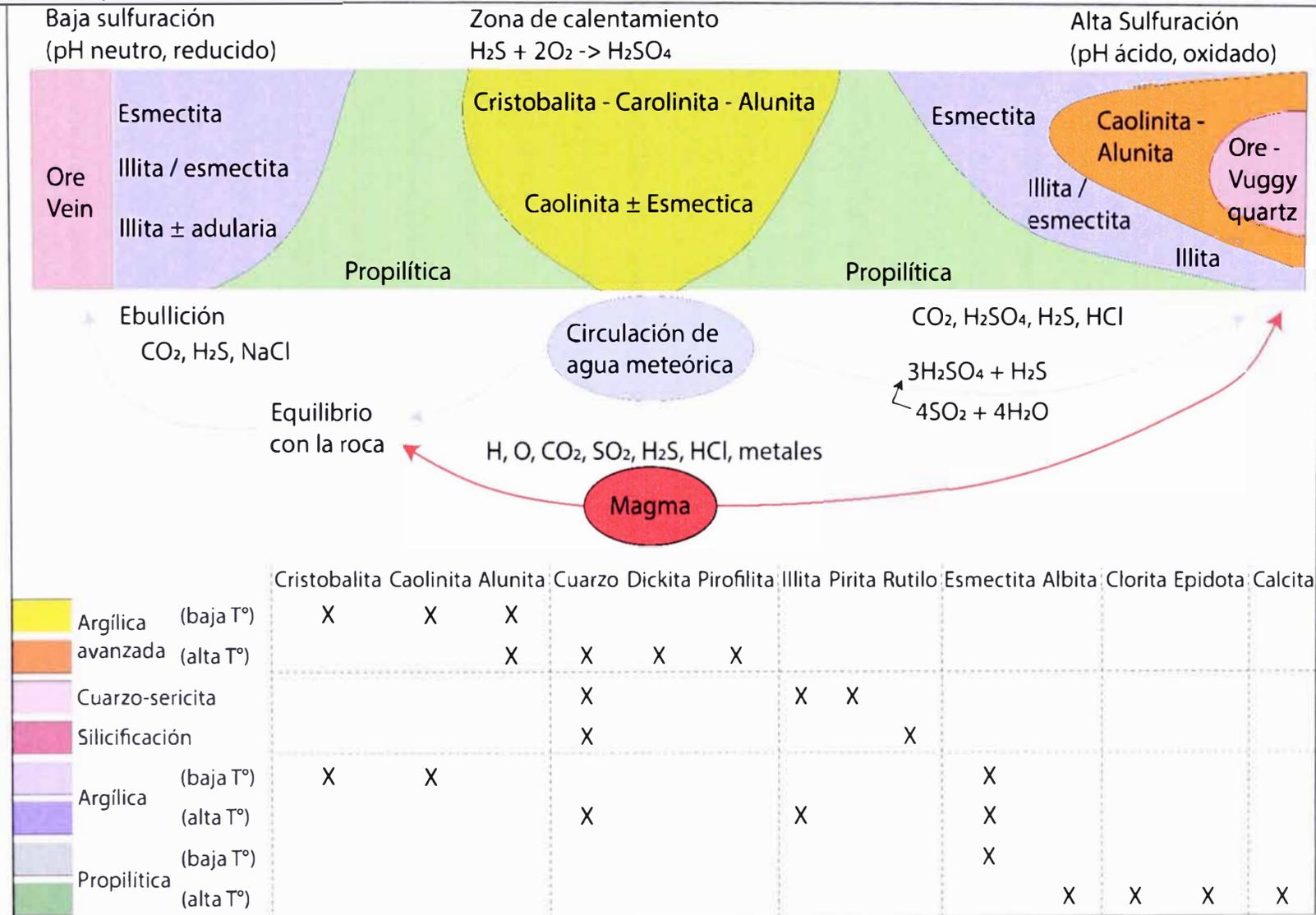
Alteraciones y mineralización en pórfidos.



Nota: Modificado de Lowell (1970)

Figura 3

Mineralización en yacimientos epitermal.



Nota: modificado de Hedenquist (1996)

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Geoquímica

White (2020) define la Geoquímica como la ciencia interdisciplinaria que estudia la distribución e interacciones de los elementos químicos en la Tierra, el estudio de la composición química de la corteza y su correlación. Dentro de este campo se tienen estudios de la corteza terrestre, del medio ambiente, de cuerpos de agua superficiales o subterráneos, océanos, y exploración de yacimientos minerales e isótopos, todo esto mediante el muestreo de suelos, rocas, aguas, y minerales. De forma complementaria Grunsky (2020) indica la importancia entre la geoquímica en la exploración y búsqueda de yacimientos minerales desde el muestreo hasta el procesamiento de información y correlación entre elementos, factores geológicos, alteraciones, mineralización, presencia de óxidos, y zoneamiento para determinar zonas de mayor potencial de contenido metálico.

2.2.2 Anomalías geoquímicas, Background (BG) y Threshold (TH)

Zuo y Xiong (2020) definen las anomalías geoquímicas como el enriquecimiento químico en las rocas con respecto al promedio de la zona, y también señalan que los parámetros estadísticos como el background, son la concentración química promedio de las rocas en un área. El threshold es el valor umbral obtenido de la suma entre el background y dos desviaciones estándar tomado como referencia para determinar los valores, y los pathfinders, elementos indicadores en la exploración geoquímica, ya que por condiciones fisicoquímicas se encuentran asociados a minerales económicos, ya que son la base para cualquier análisis estadístico con fines exploratorios para determinar nuevas áreas con potencial económico y por ende la base de la creación de interpolaciones geoquímicas y definición de targets exploratorios.

2.2.3 Pórfido cuprífero

Los sistemas de pórfidos cupríferos se definen como grandes extensiones (10 a 100 km²) de roca alterada hidrotermalmente centrada en stocks porfíricos de cobre que también pueden contener skarn, reemplazamiento carbonatado, y epitermales de alta a intermedia sulfuración con mineralización económicamente explotable; en la parte más

profunda del sistema de pórfidos cupríferos pueden contener un depósito de pórfido Cu-Mo-Au de dimensiones variables así como skarns Cu-Au-Zn así como cuerpos epitermales de intermedia sulfuración. Estos depósitos se desarrollan en un ambiente magmático-hidrotermal donde predominan fluidos hidrotermales ácidos y magmático con contenidos de H₂O, CO₂, HCL, H₂S y SO₂ con aporte de aguas meteóricas (Sillitoe, 2010).

2.2.4 Parámetros estadísticos

McCullagh (2002) define los parámetros estadísticos como el cálculo numérico que describe características de una población como la media, mediana, moda, varianza, desviación estándar, entre otros, indica la importancia de entender la distribución de los datos para un mejor análisis dado que las pruebas estadísticas, cálculos, estimaciones, hipótesis, inferencias, modelados y anomalías dependen del tipo de distribución de datos. Sumado a esto Norbert (2020) y Ammar et al. (2020) definen y clasifican la distribuciones estadísticas como distribución normal o Gaussiana caracterizada por ser simétrica, tener forma de campana, y basarse en los parámetros de media (μ) y la desviación estándar (σ), distribución lognormal caracterizada por obtenerse al tomar el logaritmo natural de una variable que sigue una distribución normal, por lo tanto, no es simétrica ni con forma de campana, pero se basa en la media (μ) y la desviación estándar (σ) pero de la variable logarítmica, y distribución gamma caracterizada por basarse basándose en parámetros de forma (α) y el parámetro de escala (β). Por otro lado, definen el test de normalidad Shapiro-Francia con una mejora en la detección de desviaciones de normalidad para muestras pequeñas y el gráfico Q-Q plot o Quantile-Quantile para evaluar la distribución.

De forma complementaria Mohammadi y Rezaei (2020) definen el Criterio Bayesiano de Información (BIC) como la medida de ajuste para la comparación de modelos estadísticos, y el análisis de componentes principales (PCA) definido por Chen et al. (2015) como un análisis más detallado y preciso mediante la creación de variables artificiales denominadas "componentes principales".

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

El presente capítulo tiene como finalidad explicar los aspectos geológicos principales con el fin de correlacionarlos con las muestras de sedimentos, los cálculos estadísticos, y delimitación de subcuencas de mayor potencial económico. La geología en la subcuenca Antabamba es diversa y compuesta de formaciones sedimentarias con edades entre el Carbonífero y Neógeno (aproximadamente 50 % del total) y cuerpos intrusivos del Paleógeno-Neógeno pertenecientes al Batolito Andahuaylas-Yauri.

El tectonismo y la geología estructural tienen un rol muy importante en la formación de yacimientos tipo pórfido dado que son el mecanismo de migración de fluidos hidrotermales portantes del contenido metálico. Los principales trabajos en la subcuenca con respecto a la estratigrafía fueron realizados por Marocco (1975) y Pecho (1981).

En el marco de la Carta Geológica Nacional serie A, la subcuenca Antabamba se ubica en la parte central de la región Apurímac, abarcando los cuadrángulos Hojas 28p, 28q, 29p, 29q, 30p, 30q. La información que se detalla a continuación ha sido tomada del Boletín N°27 (Marocco, 1975), Boletín N°35 (Pecho, 1981), Boletín N°51 (Palacios, 1994), y Boletín N°41 (Dávila, 1991).

3.1 Geología regional

3.1.1 Estratigrafía

En la subcuenca Antabamba afloran unidades sedimentarias del Mesozoico dentro de las que destacan las Formaciones Puente, Gramadal, Hualhuani y Auzangate; así como unidades del Paleozoico siendo las principales los Grupos Ollantaytambo, Tarma, Mitu y Copacabana (Figura y Figura). En el Paleógeno se distinguen la Unidad Cotabambas de composición granodiorita, la Unidad Lambrama de composición microgranítica, la Unidad Ocobamba de composición cuarzo-diorita, y la Unidad Parco de composición granodiorita. En el Cuaternario se emplazaron los volcánicos pertenecientes al Grupo Barroso, y areniscas del Grupo Puno.

3.1.1.1 Paleozoico. En el Paleozoico resaltan los metavolcánicos, mármol, esquistos y pizarras del Grupo Ollantaytambo, intercalaciones de lutitas y calizas del Grupo Tarma, e intercalaciones de calizas con conglomerados y areniscas del Grupo Copacabana

3.1.1.1.1 Grupo Ollantaytambo (CAOi-o). En la parte inferior metavolcánicos, mármol, esquistos y pizarras, esquistos y cuarcitas en la parte superior. El Grupo Ollantaytambo infrayace a la Formación Verónica y al Grupo San José. Su contacto inferior no se ha observado, se considera que yace sobre el Complejo Iscaybamba (Sánchez y Zapata, 2003).

3.1.1.1.2 Grupo Tarma (Cp-t). Consiste en lutitas bituminosas gris oscuro con intercalaciones de limolita gris a parda, niveles de calizas gris oscura, lenticular, masiva, niveles de chert en la parte superior. Las capas de caliza tienen menos de 3 m. de espesor (Dunbar y Newel, 1946).

3.1.1.1.3 Grupo Copacabana (PEc-c). Calizas claras a oscuras (Cabrera y Petersen, 1936), calizas grises a marrón, compacta, maciza, con concreciones de chert hacia la parte superior y conglomerados intercalados con areniscas rojas de grano medio (Sánchez, 1995). Así también areniscas de grano fino, gris, intercaladas con limoarcillitas margosas verdosas y calizas oscuras en estratos medianos, en la parte superior yacen calizas gris oscuras.

3.1.1.1.4 Grupo Mitu (PET-m). Areniscas arcósicas rojas, lutitas, clásticos gruesos y volcánicos de gran espesor (Newell et al., 1949). Se han reconocido dos tipos de litofacies principales en el Grupo Mitu: una clástica (conglomerados, brechas, areniscas, lodolitas, limoarcillitas rojas) y la otra mayoritariamente volcánica que varían desde lavas basálticas alcalinas a riolitas.

3.1.1.2 Mesozoico. En el Mesozoico resaltan las areniscas cuarcíticas de la Formación Puente, las lutitas pizarrosas de la Formación Cachios, intercalaciones de areniscas y lutitas de la Formación Labra, calizas silicificadas de la Formación Gramadal, cuarcitas de la Formación Hualhuani, pizarras rojizas de la Formación Murco,

intercalaciones de calizas con lutitas negras de la Formación Arcurquina, e intercalaciones de pelitas rojizas con limoarcillitas de la Formación Auzangate.

3.1.1.2.1 Formación Puente (Jm-p). Predominancia de areniscas cuarcíticas de grano muy fino, apenas discernible, de colores amarillentos, pardos y verdosos aceitunados, que intemperizan a colores pardo oxidado claro, rojo oxidado o rojo grisáceo, en algunos sitios con chispas ferruginosas; generalmente en estratos medianos u ocasionalmente gruesos, algo impuros y a veces con chispas ferruginosas, con restos de plantas, interestratificadas con cantidades menores de lutitas negras, carbonáceas, duras que llevan concreciones esféricas y achatadas (Vicente, 1981).

3.1.1.2.2 Formación Cachios (Jm-ca). Lutitas pizarrosas de color gris oscuro a negro, carbonosas, con algunos bancos de arenisca cuarcítica de grano fino e interestratificaciones de lutitas pizarrosas con areniscas arcillosas; algunas lutitas pizarrosas son calcáreas.

Cerca de la base presenta lentes de carbón de 1 a 4 cm de espesor; varios estratos de yeso paralelas a la estratificación o rellenando las fracturas que cruzan los estratos; abundan también concreciones silíceas y calcáreas (Vicente, 1981).

3.1.1.2.3 Formación Socosani (Jm-so). El parte inferior conformado por caliza gris con ocasionales capas delgadas de lutitas y areniscas, y hacia el tope lutitas oscuras con concreciones (Vicente, 1981).

3.1.1.2.4 Formación Labra (Js-l). Constituida por areniscas interestratificadas con menores proporciones de lutitas y escasa participación de margas y calizas.

Las areniscas son de color blanco a gris y rosado, generalmente de grano fino a medio, con chispas ferruginosas, en estratos delgados a medianos, ocasionalmente gruesos, usualmente lenticulares y con estratificación cruzada (Benavides, 1962).

3.1.1.2.5 Formación Gramadal (Js-g). Caliza gris a marrón silicificada, masiva, fosilífera, interestratificada con lutitas calcáreas grises a marrón, blandas; con areniscas grisáceas a marrón claro, arenisca arcillosa de grano fino.

3.1.1.2.6 Formación Hualhuani (Ki-hu). Consiste en cuarcitas compactas, duras y cementada de tal modo que se fractura siguiendo los contornos de los granos de cuarzo en lugar de atravesarlos, de grano fino de color gris a marrón gris, en capas la estratificación cruzada (Jenks, 1948).

3.1.1.2.7 Formación Murco (Ki-mu). Consiste en una secuencia de pizarras rojas, gris claro a oscuro y verdes, y areniscas blancas, moreno amarillento claro y pardo rojizas con algunas capas delgadas de conglomerados y yeso (Jenks, 1948).

3.1.1.2.8 Formación Arcurquina (Kis-a). Está compuesta casi exclusivamente por calizas con escasas intercalaciones de lutitas negras.

Las calizas son del tipo mudstone y wackstone y escasamente packstone y grainstone.

Estas se presentan bien estratificadas en bancos de 0,20 a 4 m de espesor, formando secuencias grano estrato crecientes.

Al contacto con intrusivos, como es el caso de Accha se aprecian cuerpos de Skarn de magnetita (Marocco, 1975).

3.1.1.2.9 Formación Auzangate (KsP-a). La Formación Auzangate consiste en sucesiones alternantes de pelitas (limoarcillas, limolitas, areniscas arcósicas y lodolitas) de color rojo.

Es común encontrar capas delgadas de areniscas cuarzosas de grano fino entre las pelitas.

Las areniscas son más recurrentes en la parte superior de esta unidad litoestratigráfica (Sánchez et al., 2003).

Figura 4

Formación Puente, areniscas alteradas plegadas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5

Formación Auzangate, pelitas intercaladas con areniscas arcólicas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6

Formación Labra, areniscas rosadas en estratos delgados.



Fuente: Elaboración propia

Figura 7

Formación Cachíos, lutitas oscuras con lentes de carbón.



Fuente: Elaboración propia

3.1.1.3 Cenozoico. En el Cenozoico resaltan las intercalaciones de areniscas tobáceas verdosas de la Formación Aniso, secuencias de tobas dacíticas-riodacíticas de la Formación Alpabamba, lavas dacíticas-andesíticas a basálticas de la Formación Ichocollo, una secuencia volcánica con brechas y areniscas del Grupo Maure, derrames andesíticos grises y rocas piroclásticas en brechas del Grupo Barroso, areniscas arcósicas rojizas de la Formación Muñani y areniscas-conglomerados del Grupo Puno.

3.1.1.3.1 Formación Aniso (Nm-a). Constituida por intercalaciones de areniscas tobáceas grises a verdosas, con areniscas conglomerádicas cuyos fragmentos subredondeados a subangulares son de tobas o lavas andesíticas; también se observa estratos de tobas redepositadas blanco-amarillentas. La estratificación es delgada y definida, observándose estratificación gradada y sesgada (Guevara y Dávila, 1983).

3.1.1.3.2 Formación Alpabamba (Nm-al). Está constituida por una gruesa y monótona secuencia de tobas brechosas, dacíticas a riodácíticas, blanquecinas a amarillentas y por algunos niveles de areniscas tobáceas (Guevara y Dávila, 1983). Un conglomerado basal polimictico se observa en la quebrada Ermo, constituido por cantos de lavas, areniscas y calizas en una matriz tobácea.

3.1.1.3.3 Formación Ichocollo (Nm-ich). Constituida por lavas y domos dacíticos, en la base, así como por lavas andesíticas a andesítico-basálticas, en la parte superior; las lavas son gris a gris oscuras, afíricas y porfiríticas (Dávila, 1991), a través de toda la secuencia se observa niveles de areniscas y brechas andesíticas. Corresponde el tope del Grupo Tacaza.

3.1.1.3.4 Grupo Maure (Nm-ma). Consiste en una secuencia volcánica-sedimentaria, la base está constituida de brechas, conglomerados y areniscas tobáceas, la parte central está conformada por ignimbritas riolíticas y riodacítica y en la parte superior una serie volcano-sedimentaria.

3.1.1.3.5 Grupo Barroso (NQ-b). Consiste en una alternancia de derrames andesíticos y/o traquiandesíticos de color gris claro a negro, grano fino a grueso y rocas piroclásticas representadas por estratos de brechas y aglomerados cuyos fragmentos

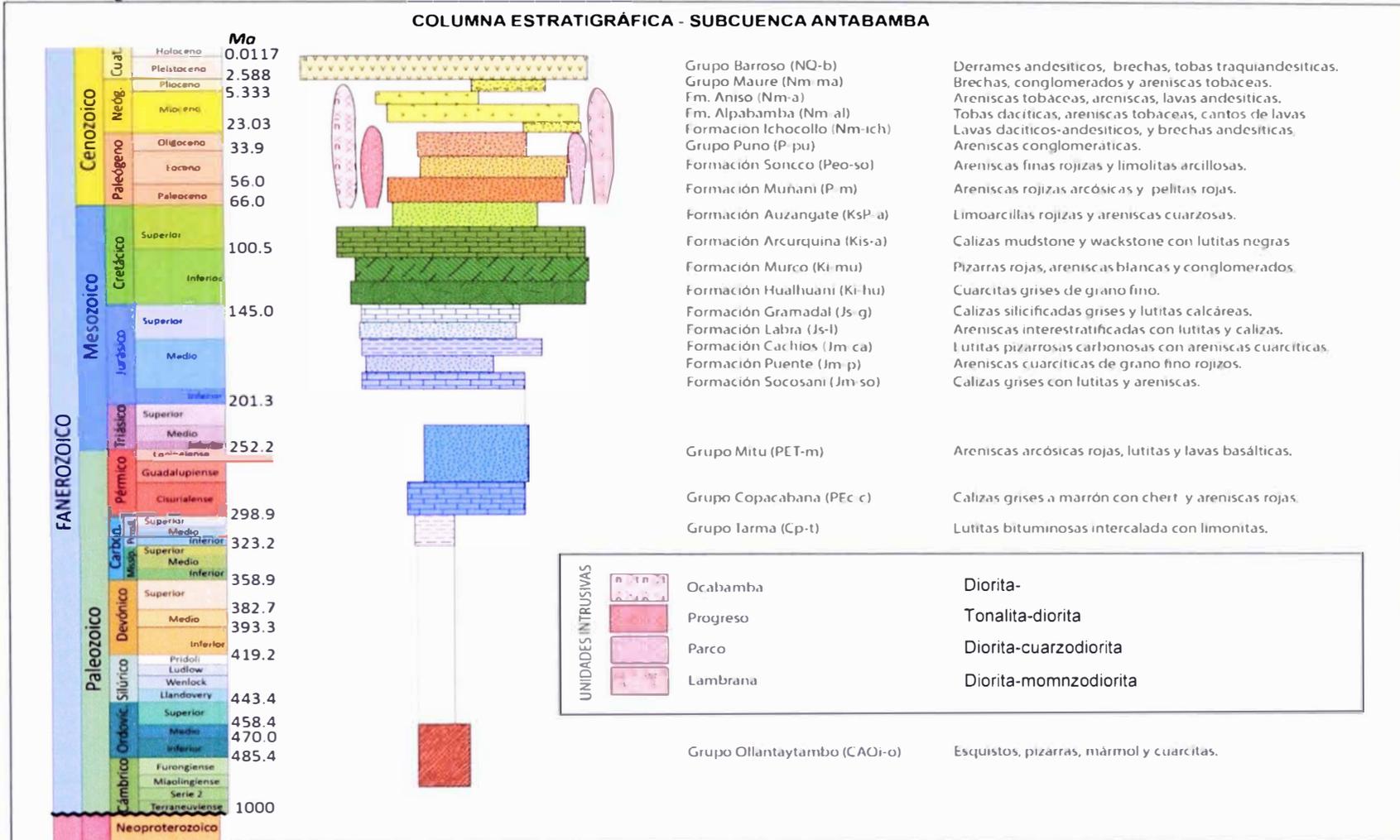
varian de tamaño, matriz y compactación (Wilson, 1963). Además, presenta tobas de composición traquiandesítica de grano grueso, compuestas de cristales de sanidina, feldespatos, biotita y hornblenda.

3.1.1.3.6 Formación Muñani (P-m). La Formación Muñani consiste en areniscas arcósicas (arcosas) de color rojo ladrillo y rosado grisáceo, sin evidencias de material volcánico (Newell, 1945). Últimos trabajos mencionan que consiste en una sucesión potente estra-creciente y grano-creciente, cuyo color marrón rojizo a rojo contrasta con los colores verdosos a púrpura de la subyacente Formación Vilquechico (Sempere, 2004). Según estos autores, la parte inferior de la Formación Muñani consiste en pelitas rojas, con calizas que ocurren localmente. La parte superior contiene mayor cantidad de areniscas en los apilamientos de pelitas rojas.

3.1.1.3.7 Grupo Puno (P-pu). Se trata de una gran parte de las areniscas conglomeráticas, parece haberse formado de material in situ, pues en los afloramientos de ellas, entre Ayavacas y Choque, los rodados son a veces muy grandes y los inclusos afectan a menudo formas subangulares, convirtiéndose los horizontes conglomeráticos más bien en brechas locales (Cabrera, 1936). Entre los inclusos hemos distinguido: Calizas y calcáreas grises en grandes trozos, de la formación Ayavacas, areniscas rojas del tipo de la formación Tiquina, cuarzo blanco de procedencia devónico, andesitas antiguas, granitos y pórfidos, basaltos modernos, probablemente de edad terciaria. Su evolución vertical grano y estrato creciente es bastante pronunciada: de facies finas (limolitas arcillas y areniscas finas marrón-rojiza gruesas (Córdova, 1986).

Figura 8

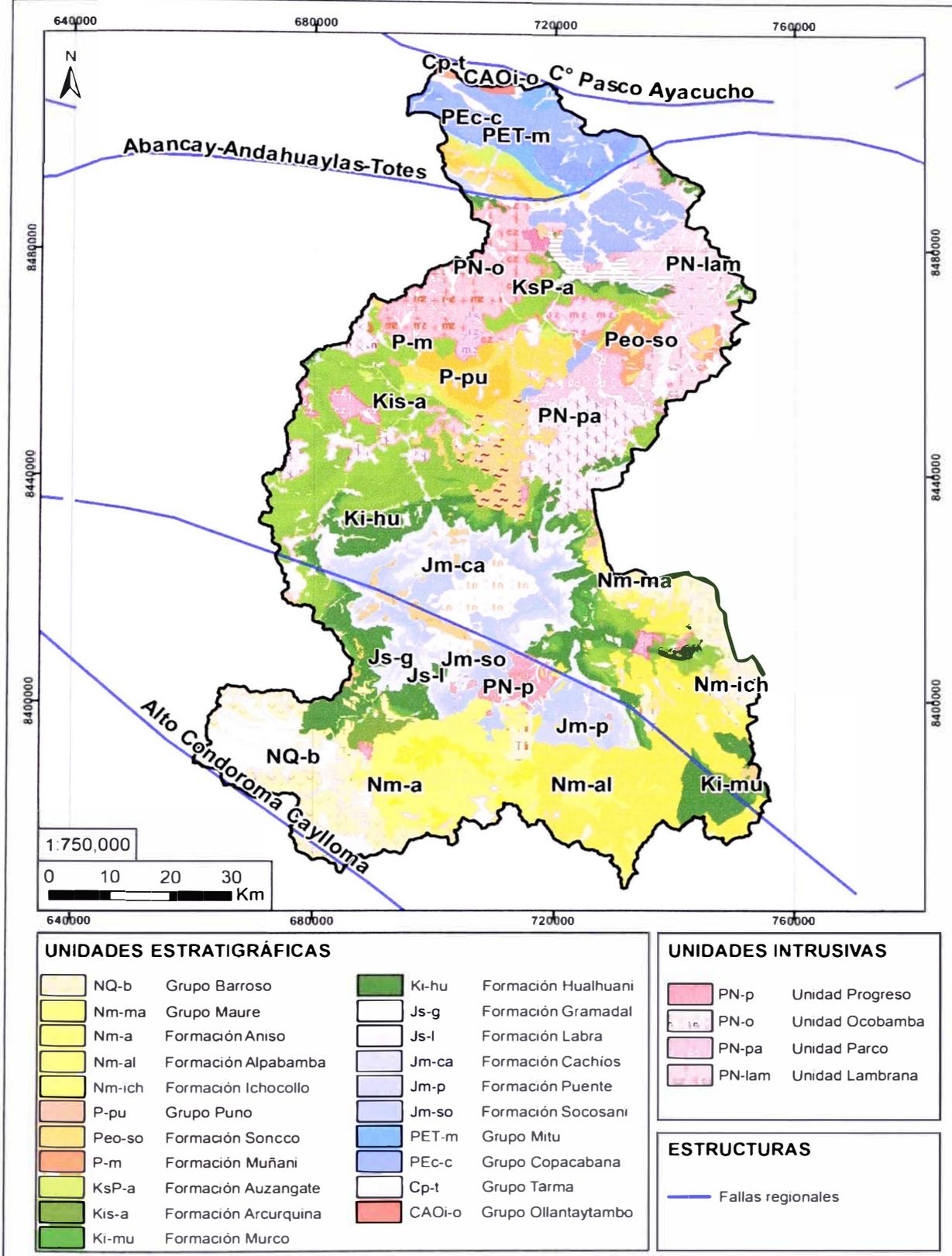
Columna estratigráfica de la subcuenca Antabamba.



Nota: fuente <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main> (Sistema de información geográfica que recopila la información geológica y catastral minera generada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico)

Figura 9

Mapa geológico de la subcuenca Antabamba.



Nota: fuente <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main> (Sistema de información geográfica que recopila la información geológica y catastral minera generada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico)

3.1.2 Unidades intrusivas

La subcuenca Antabamba regionalmente presenta intrusivos del paleógeno-neógeno en el entorno del Batolito Andahuaylas-Yauri con las unidades Progreso, Ocobamba, Parco y Lambrana de composiciones tonalítica, diorítica-monzonítica, diorítica-cuarzodiorítica, y diorítica -monzodiorítica respectivamente.

3.1.3 Geología estructural

La subcuenca Antabamba regionalmente se encuentra entre las fallas regionales de Cerro de Pasco-Ayacucho y Alto Condoroma-Caylloma de dirección NO-SE, al suroeste de la deflexión de Abancay, definida como una estructura heredada del sistema rift Permo-Triásico (Carlotto et al., 2004), e interiormente se tiene la falla regional de Abancay-Andahuaylas-Totos de dirección ONO-ESE a O-E lo que indica una zona de gran deformidad, engrosamiento de la corteza y plegamientos, a su vez ausencia de actividad volcánica, por la distribución y petrografía ácida granodiorítica-monzogranitos se tienen principalmente yacimientos tipo Skarn de Cu.

3.1.4 Minas en el área de estudio

Regionalmente en el entorno del Batolito Andahuaylas-Yauri, se tiene yacimientos tipo Skarn como Las Bambas (Apurímac) según MMG (2021) posee 1105.9 millones de toneladas de recursos (0.64 % Cu), yacimientos tipo Pórfido Cu-Au como Antapaccay, según Nevada (2022) posee 1275 millones de toneladas de recursos (0.08 g/t Au, 1.72 g/t Ag), y yacimientos tipo Pórfido Cu-Mo como Haqira según First-Quantum (2021) posee 703.7 millones de toneladas de recursos (0.51 % Cu), Corocchohuayco según Glencore (2022) posee 643 millones de toneladas de recursos (0.60 % Cu).

En la subcuenca Antabamba (Figura) se tienen yacimientos tipo Pórfido Cu-Mo como Los Chancas según Southern Copper Corporation (2021) posee 149.5 millones de toneladas de recursos (0.50 % Cu), y Trapiche (Apurímac) según Buenaventura (2021) posee 283.2 millones de toneladas de recursos (0.51 %Cu).

3.2 Recolección de información existente

3.2.1 Metodología

La metodología se realizó en 4 fases que representan los trabajos de precampo, recopilación de información, trabajos de campo, análisis de información.

- **Fase 1, precampo:**

Se delimitó la zona de estudio tomando como referencia la importancia económica de la región Apurímac, el tipo de yacimiento en la zona, y los proyectos mineros cercanos.

- **Fase 2, recopilación:**

Se sintetizó la información geológica, estructural, metalogenética y económica de la zona, así como la geoquímica proveniente del análisis de rocas y sedimentos quebrada, obtenidos en las campañas realizadas por INGEMMET "Estudio de los Recursos Minerales del Perú Franja N°2 (2001)", "Estudio de los Recursos Minerales del Perú Franja N°3 (2002)", "Prospección Geoquímica de Segunda Fase en la Cuenca Tambo subcuencas medio Tambo, Coralaque, medio Alto Tambo, Ichuña y Alto Tambo (2013, proyecto GE36)", "Prospección Geoquímica de Segunda Fase en la Cuenca Superior de la Margen Izquierda del Río Apurímac (2015, proyecto GE36-2)".

- **Fase 3, campo:**

Se delimitó la zona de mayor potencial en base al procesamiento de la geoquímica, y factores geológico-estructurales. El autor de la presente tesis en la zona de mayor potencial tomó 20 muestras de roca codificadas según CNFG-01 a CNFG-20 para análisis geoquímico.

- **Fase 4, análisis:**

Se procesó la información geoquímica obteniendo mapas de alta probabilidad de contener yacimientos tipo Pórfido Cu-Mo en base a las asociaciones geoquímicas en los sedimentos de quebrada, así como su comprobación en base a la

información geoquímica de las muestras tomadas en campo, comprobando los clusters potenciales.

3.2.2 Sedimentos de quebrada de muestreo y muestras de roca

La Intercuenca Alto Apurímac (pertenece a la región hidrográfica del Atlántico) tiene un área total de 34 734 km², se divide en 06 subcuencas; la cuenca materia de la presente investigación es la subcuenca Antabamba (Tabla 2) que tiene un área de 8034 km² representando un 23 % de la Intercuenca Alto Apurímac. La subcuenca Antabamba está formada principalmente por el río Antabamba y afluentes menores como los ríos Colcacchaca, Caraibamba, Cotoaruse, Pachachaca, Lambrama, y Collpa (Figura). Se seleccionó la subcuenca Antabamba por su gran tamaño, es representativa de la región Apurímac y tiene yacimientos importantes tales como Antabamba, Trapiche y Anitlla.

Figura 10

Divisiones de la Intercuenca Alto Apurímac.



Nota: fuente <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main> (Sistema de información geográfica que recopila la información geológica y catastral minera generada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico)

Tabla 2*Subcuencas y áreas de la Intercuenca Alto Apurímac.*

N°	Subcuenca	Área	% área total
1	Cuenca Antabamba	8034.61	23.13 %
2	Cuenca Apurímac	5050.53	14.54 %
3	Cuenca Huancane	9488.87	27.32 %
4	Cuenca Santo Tomas	4769.02	13.73 %
5	Cuenca Veille	3720.27	10.71 %
6	Cuenca Vilcabamba	3670.78	10.57 %

En todo el Perú, entre los años 2000 a 2015 se obtuvieron un total de 22 928 muestras de sedimentos de quebrada en 16 años de campañas de campo. Las muestras de sedimentos de quebrada fueron tomadas por INGEMMET mediante la Dirección de Recursos Minerales (DRME) y el área de Geoquímica a cargo del Ing. Luis Enrique Vargas Rodríguez. Las muestras de sedimento se tomaron con el fin de realizar prospecciones geoquímicas regionales en todo el Perú.

Se tomó una muestra por cada 10 km² a 25 km², cubriendo un área aproximada de 650000 km², siguiendo el criterio de que la información obtenida, referente al contenido químico, indicando la composición de cada microcuenca para posteriormente integrarse con la información geológica, estructural y metalogenética.

La metodología de muestreo consideró tomar muestras en 03 ubicaciones en un tramo de 100 metros, preferentemente en el tramo central del cauce, tamizados mediante una malla N°30 (0.59 mm), y almacenadas en bolsas microporosas para sedimentos húmedos y en bolsas de polietileno para sedimentos secos. El procedimiento de toma de muestras indica el uso de guantes de goma y materiales de polietileno, retirar como mínimo 3 cm de la capa superior de sedimento por el riesgo de contener óxidos que generen un error en los valores químicos, y que los sedimentos extraídos en el cauce deben pasar por una malla N°30 hasta tener una muestra de 5 kg si es húmeda y 3 kg si es seca (Figura

11). Para el análisis químico las muestras utilizadas fueron las que pasaron la malla N°200 (0.074 mm).

Figura 11

Muestreo de sedimentos en el río Caraibamba

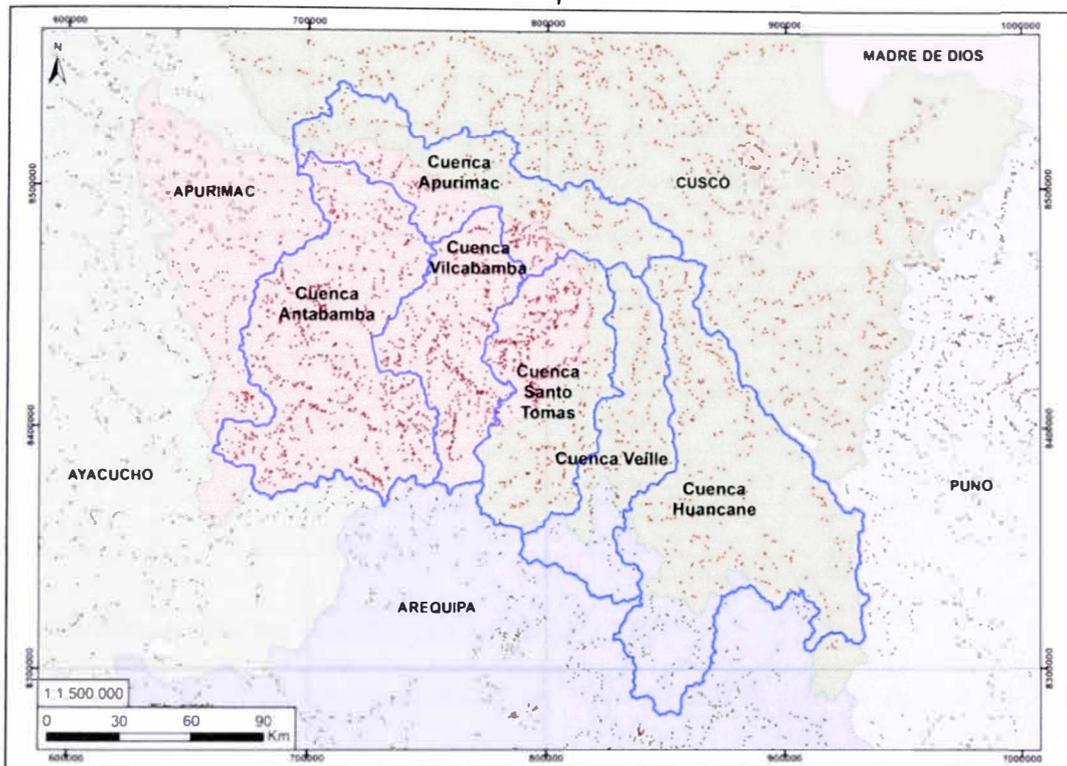


Fuente: Elaboración propia

Para el presente trabajo de un total de 1923 muestras de sedimentos de quebrada en la Intercuenca Alto Apurímac, 962 muestras pertenecen a la subcuenca Antabamba. También se han considerado las muestras de roca tomadas por INGEMMET mediante la Dirección de Geología Regional (357 muestras de roca tomadas en la Intercuenca Alto Apurímac), 127 muestras de rocas pertenecen a la subcuenca Antabamba, véase la Tabla 3; la distribución espacial de los sedimentos de quebrada y roca se observan en la Figura 12 y en la Figura 13 respectivamente.

Figura 12

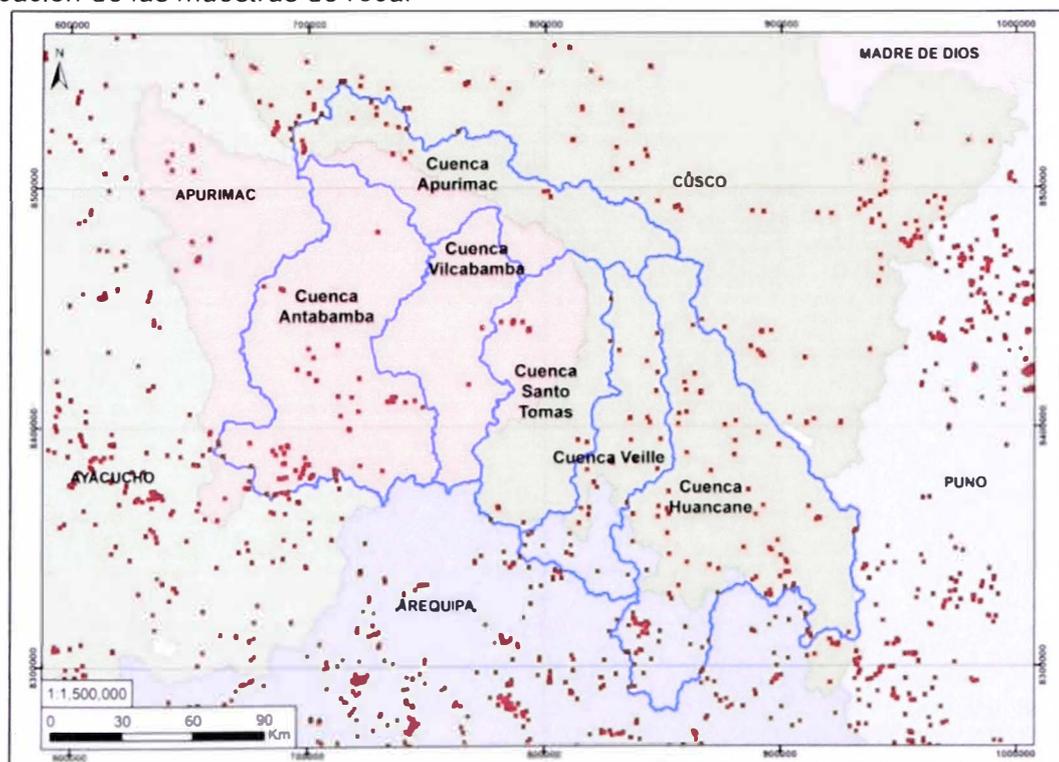
Ubicación de las muestras de sedimentos de quebrada.



Nota: fuente <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main> (Sistema de información geográfica que recopila la información geológica y catastral minera generada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico)

Figura 13

Ubicación de las muestras de roca.



Nota: fuente <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main> (Sistema de información geográfica que recopila la información geológica y catastral minera generada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico)

Las muestras de sedimentos y rocas consideradas para el presente estudio fueron analizadas por el área de Laboratorio de Química Analítica de INGEMMET.

Tabla 3

Muestras de sedimentos y rocas, Intercuenca Alto Apurímac.

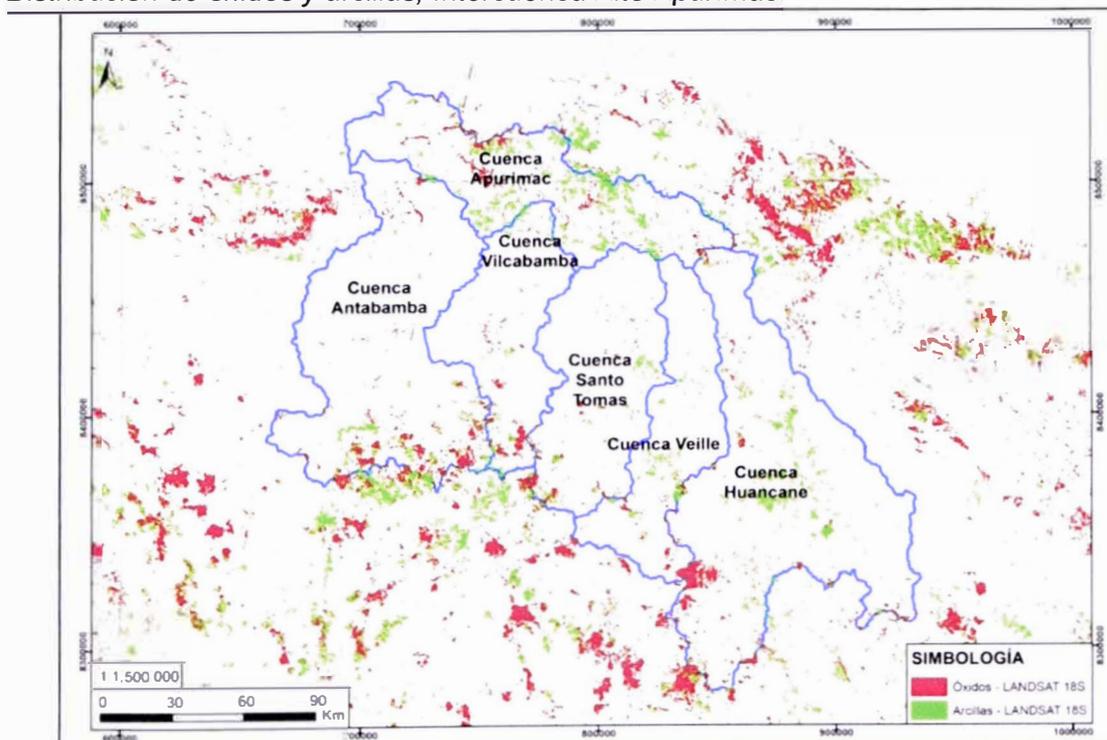
Subcuenca	Sedimentos de quebrada	Rocas
Cuenca Antabamba	962	127
Cuenca Apurímac	352	19
Cuenca Huancane	385	149
Cuenca Santo Tomás	519	25
Cuenca Veille	143	34
Cuenca Vilcabamba	524	3

3.2.3 Óxidos y arcillas – Imágenes LANDSAT 18S

El área de Imágenes Satelitales de INGEMMET realizó el procesamiento de imágenes LANDSAT de la zona 18S en las regiones del sur como Apurímac, Cusco y Arequipa delimitando zonas con óxidos y arcillas (Figura 14).

Figura 14

Distribución de óxidos y arcillas, Intercuenca Alto Apurímac.



Nota: fuente <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main> (Sistema de información geográfica que recopila la información geológica y catastral minera generada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico)

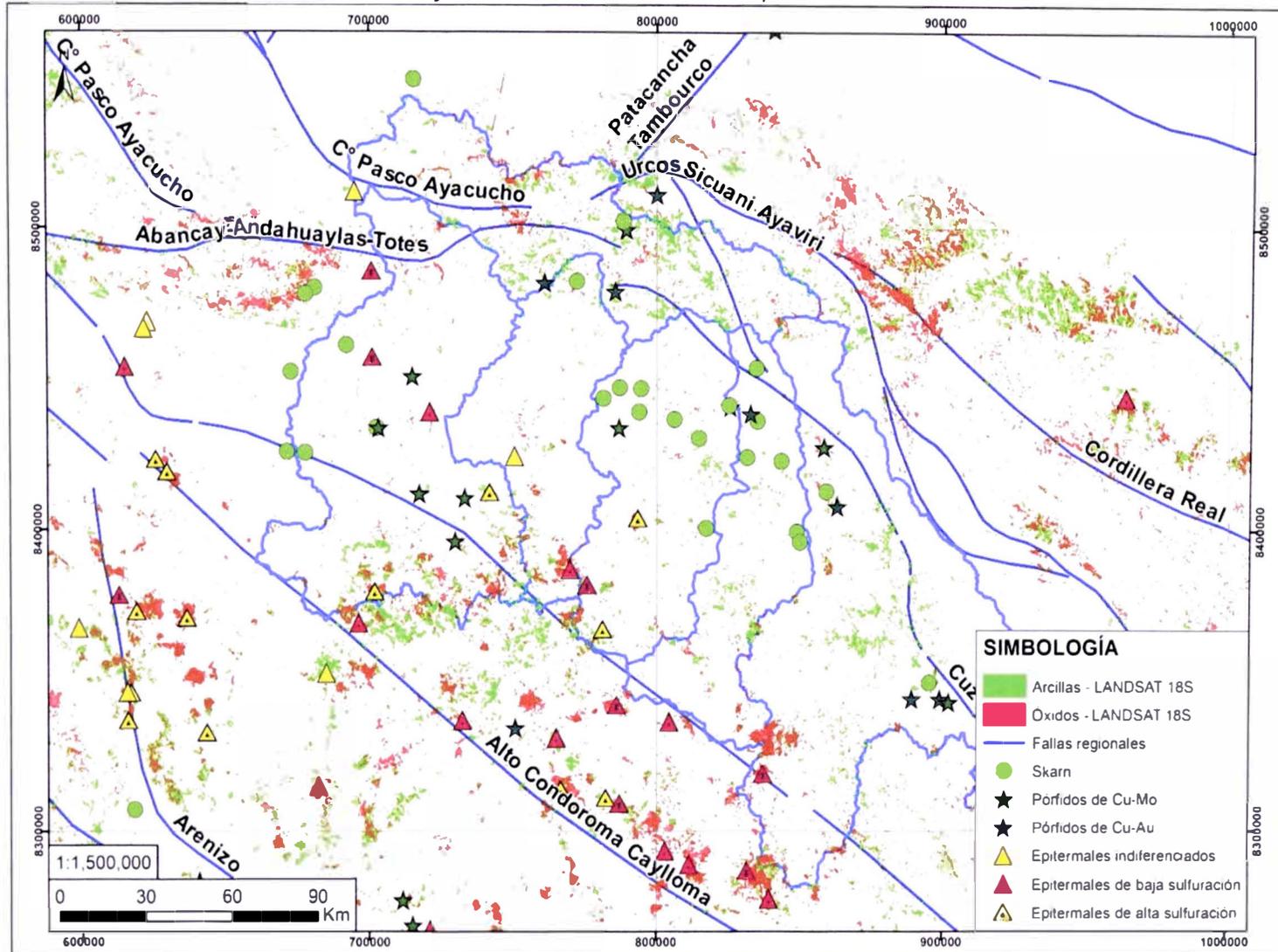
Las áreas con presencia de óxidos en el entorno de la Intercuenca Alto Apurímac están relacionadas a los yacimientos tipo epitermal de alta sulfuración como Chipmo, Breapampa, Selene, y Arasi, y epitermales de baja sulfuración como Coripampa, Arcata, Ares, Shila-Paula, Tambomayo y Orcopampa.

Las áreas con presencia de arcillas están relacionadas a la erosión de minerales como illita, esmectita, plagioclasas y caolinitas en zonas argílicas o propilíticas, lo que indicaría una distancia intermedia a los focos de mineralización y estaría relacionado a los yacimientos tipo epitermal de alta sulfuración, epitermal de baja sulfuración, pórfidos de Cu-Mo y Skarn de Cu.

En la Figura 15 se visualiza una mayor presencia de óxidos al este de la subcuenca Apurímac, posiblemente por la deflexión de Abancay y en los alrededores del yacimiento de Corani clasificado como Alta Sulfuración; de igual forma al sur del área posiblemente por la presencia de focos de mineralización en la zona epitermal siguiendo el lineamiento del Alto Condoroma Caylloma.

Figura 15

Distribución de unidades mineras, zonas de óxidos y arcillas, Intercuenca Alto Apurímac.



Nota: fuente <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main> (Sistema de información geográfica que recopila la información geológica y catastral minera generada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico)

3.3 Análisis estadístico univariante y distribución estadística

El análisis estadístico en la subcuenca Antabamba se realizó tomando de manera preliminar los elementos Cu+Pb+Zn+Mo+As+Sb+Bi+Au+Ag+Re+Te propuestos por Wang y Zuo (2020), sin embargo, existen valores químicos no registrados por laboratorio dado el límite de detección presente en su procedimiento, por lo que se debe proceder con una corrección de estos datos mediante métodos robustos (ROS) debido a su menor error y divergencia sin modificar su dispersión (Fauß et al., 2021), considerando el requisito del método que para ser efectivo se debe tener un mínimo de 60% de datos detectados sobre el total.

En la Tabla 4 se indican los elementos, la cantidad de elementos con valores no detectados (bajo el límite de detección), detectados (con mediciones), no analizados, y la proporción de los detectados sobre el total. Para el análisis se tomaron los elementos resaltados de amarillo porque poseen una proporción mayor al 60% y son mencionados por Gozalvez et al. (2016) para interpolaciones por medio de índices de mineralización y poseen mayor proporción de detectados.

Tabla 4

Proporción de datos detectados en la subcuenca Antabamba.

Elemento	No detectados	Detectados	No analizados	Proporción
Cu	0	962	0	100 %
Pb	4	958	0	99.58 %
Zn	0	962	0	100 %
Mo	51	911	0	94.69 %
As	85	877	0	91.16 %
Sb	203	759	0	78.89 %
Bi	317	645	0	67.05 %
Au	509	453	0	47.09 %
Ag	227	735	0	76.40 %
Re	0	0	962	0 %
Te	296	335	331	34.82 %

Nota: En la subcuenca Antabamba se han analizado en total 962 muestras de sedimentos.

En la Tabla 5 se presenta el resumen de los parámetros estadísticos para cada elemento como el valor mínimo, cuartiles 1 y 3, mediana, valor máximo, promedio, desviación estándar y coeficiente de variación, mientras que en la Tabla 6 se muestran los valores promedio o background (BG), desviaciones estándar (SD) y el cálculo de los umbrales como BG+SD (threshold) y los umbrales más altos como BG+2SD y BG+3SD para determinar las áreas de mayor potencial. Todos los cálculos se realizaron mediante el Software libre R.

Tabla 5

Parámetros estadísticos del Cu, Pb, Zn, Mo, As, Sb, Bi, Ag.

Elemento	Min.	Q1	median	Q3	máx.	mean	SD	CV
Cu	5.10	17.20	27.35	46.20	6408.00	61.34	240.98	392.84
Pb	0.003	10.63	16.00	27.53	2614.00	33.71	120.39	357.12
Zn	11.30	44.00	66.10	107.75	2420.00	117.70	183.38	155.80
Mo	0.001	1.00	1.59	3.00	318.24	4.52	15.49	342.40
As	0.0001	5.00	12.00	40.00	2175.00	45.07	110.25	244.62
Sb	0.001	0.17	0.74	4.65	250.00	2.89	9.00	311.56
Bi	0.001	0.02	0.11	0.22	25.00	0.34	1.22	355.72
Ag	0.01	0.06	0.20	0.23	7.50	0.25	0.51	202.83

Tabla 6

Background y thresholds del Cu, Pb, Zn, Mo, As, Sb, Bi, Ag.

Elemento	Promedio (BG)	Desviación estándar (SD)	BG+1SD	BG+2SD	BG+3SD	Max
Cu	61.34	240.98	302.32	543.30	784.28	6408
Pb	33.71	120.39	154.10	274.50	394.89	2614
Zn	117.70	183.38	301.09	484.47	667.85	2420
Mo	4.524	15.49	20.01	35.50	50.99	318.24
As	45.07	110.25	155.33	265.58	375.83	2175
Sb	2.89	9.00	11.89	20.89	29.90	250
Bi	0.344	1.224	1.568	2.792	4.016	25
Ag	0.253	0.514	0.767	1.281	1.795	7.5

A continuación, se detalla el análisis estadístico de los elementos obtenidos mediante el análisis de los parámetros estadísticos, dispersión y umbrales geoquímicos calculados.

3.3.1 *Análisis estadístico por elemento*

En el área de estudio se analizaron estadísticamente los elementos cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), molibdeno (Mo), arsénico (As), antimonio (Sb), bismuto (Bi), plata (Ag) obteniendo los parámetros los valores de ajuste para las distribuciones, el cálculo de los valores umbral y las muestras que se encuentran sobre estos límites (ver Anexo I).

En el Atlas Geoquímico del Perú las Formaciones Socosani (Jm-so), Puente (Jm-p), Cachios (Jm-ca), Labra (Js-l), Gramadal (Js-g), Hualhuani (Ki-hu), Murco (Ki-mu), Arcurquina (Kis-a), Auzangate (KsP-a) se clasifican como Sedimentarios Continentales del Mesozoico, las Formaciones Aniso (Nm-a), Alpabamba (Nm-al), Ichocollo (Nm-ich), y Grupos Maure y Barroso se clasifican como Volcánicos del Paleógeno-Neógeno, y las unidades intrusivas Ocabamba, Progreso, Parco y Lambrana se clasifican como Intrusivos del Paleógeno-Neógeno. Tomando como referencia estas tres clasificaciones se detallan los valores umbrales y promedio referenciales descritos en la Tabla 7.

Tabla 7

Valores de fondo y umbrales de dominios geológicos regionales.

	Ag		As		Mo		Pb		Zn		Cu	
	BG	TH	BG	TH	BG	TH	BG	TH	BG	TH	BG	TH
Sedimentarios continentales del Mesozoico	0.12	0.82	15.6	131.1	1.54	7.12	21.1	83.3	93.8	397.2	25.1	82.7
Volcánicos del Paleógeno-Neógeno	0.31	0.93	17.6	97.8	2.31	6.33	20.9	80.4	79.9	206.8	26.1	73.9
Intrusivos del Paleógeno-Neógeno	0.26	0.77	13.7	79.4	3.11	9.97	20.8	78.1	72.5	172.8	42.2	134

Nota: tomado del Atlas Geoquímico del Perú, INGEMMET, 2017

El cobre (Cu), con una distribución Lognormal sustentado por el valor Bayesiano es 9127 y Shapiro-Francia de 0.929, contiene 22 valores sobre el valor umbral de 302 ppm

con valores máximos de 1205 ppm, 1235 ppm, 1509 ppm, 2072 ppm, 6408 ppm, encontrándose por encima de los umbrales de los 03 dominios geológicos regionales presentes en el área. El cobre se encuentra como mena de la forma de calcopirita (CuFeS_2), así como en otros minerales como Calcocita (Cu_2S), Covelita (CuS), Bornita (Cu_5FeS_4), Tetraedrita ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), Enargita (Cu_3AsS_4) entre otros.

El plomo (Pb), con una distribución Lognormal sustentado por el valor Bayesiano es 8303 y Shapiro-Francia de 0.867, contiene 16 valores sobre el valor umbral de 154 ppm con valores máximos de 755 ppm, 2360 ppm, encontrándose por encima de los umbrales de los 03 dominios geológicos regionales presentes en el área. La mena de plomo se encuentra como galena, y en otros minerales como la cerusita.

El zinc (Zn), con una distribución Lognormal sustentado por el valor Bayesiano es 10663 y Shapiro-Francia de 0.937, contiene 76 valores sobre el valor umbral de 301 ppm con valores máximos de 1586 ppm, 1959 ppm, 2420 ppm, encontrándose por encima de los umbrales de los dominios geológicos regionales relacionado a volcánicos (260.8 ppm) e intrusivos (172.8 ppm), pero por debajo del umbral relacionado a unidades sedimentarias (397.2 ppm). La mena de zinc se encuentra como esfalerita (Zn, FeS), y en otros minerales como wurtzita (ZnS), smithsonita (ZnCO_3) y Gahnita ($\text{ZnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$).

El molibdeno (Mo), con una distribución Lognormal sustentado por el valor Bayesiano es 4399 y Shapiro-Francia de 0.882, contiene 37 valores sobre el valor umbral de 20 ppm con valores máximos de 192.73 ppm, 218.67 ppm, 318.24 ppm, encontrándose por encima de los umbrales de los 03 dominios geológicos regionales presentes en el área. La mena de molibdeno se encuentra como molibdenita (MoS_2).

El arsénico (As), con una distribución Gamma sustentado por el valor Bayesiano es 8282 y Shapiro-Francia de 0.933, contiene 69 valores sobre el valor umbral de 155 ppm con valores máximos de 818 ppm, 1030 ppm, 2175 ppm, encontrándose por encima de los umbrales de los 03 dominios geológicos regionales presentes en el área.

El arsénico se encuentra como arsenopirita, oropimente, rejalgar, tennantita, y en otros minerales en diferentes cantidades.

El antimonio (Sb), con una distribución Gamma sustentado por el valor Bayesiano es 3047 y Shapiro-Francia de 0.943, contiene 28 valores sobre el valor umbral de 12 ppm con valores máximos de 37.5 ppm, 41.3 ppm, 250 ppm, y se encuentra en minerales como la estibina (Sb_2S_3) y sulfosales.

El bismuto (Bi), con una distribución Lognormal sustentado por el valor Bayesiano es 1188 y Shapiro-Francia de 0.970, contiene 39 valores sobre el valor umbral de 1.5 ppm con valores máximos de 8 ppm, 9 ppm, 25 ppm, y se encuentra en minerales como la bismutinita (Bi_2S_3).

La plata (Ag), con una distribución Lognormal sustentado por el valor Bayesiano es 888 y Shapiro-Francia de 0.953, contiene 43 valores sobre el valor umbral de 0.70 ppm con valores máximos de 5.60 ppm, 5.96 ppm, 7.50 ppm, encontrándose por debajo de los umbrales de los 03 dominios geológicos regionales presentes en el área. La plata se encuentra en minerales como la argentita (Ag_2S), tetraedrita ($AgSb_4S_3$) y dentro de minerales como la galena argentífera.

3.4 Análisis multivariado

3.4.1 Análisis bivariado (AB)

Para el análisis bivariado, se utilizaron los valores obtenidos de la correlación de Pearson y el análisis de componentes principales (PCA) para ver su comportamiento y asociación multivariable.

En la tabla 8 se observa la correlación de Pearson calculada en base a 616 muestras con valores numéricos dentro de la base de datos quitando los no detectados, observándose que los valores de correlación por encima del 40 % se dan entre la plata (Ag) con el arsénico (As), bismuto (Bi), plomo (Pb) y Antimonio (Sb), y del cobre (Cu) con la plata (Ag), arsénico (As), bismuto (Bi), molibdeno (Mo) y zinc (Zn).

Tabla 8

Valores de correlación de Pearson entre los elementos en ppm.

	Ag	As	Bi	Mo	Pb	Sb	Zn	Cu
Ag	100 %							
As	43 %	100 %						
Bi	56 %	30 %	100 %					
Mo	16 %	19 %	17 %	100 %				
Pb	61 %	21 %	9 %	6 %	100 %			
Sb	56 %	27 %	77 %	11 %	11 %	100 %		
Zn	0 %	-1 %	7 %	-5 %	1 %	-3 %	100 %	
Cu	46 %	50 %	46 %	56 %	3 %	11 %	33 %	100 %

Nota: los colores naranjas hacen referencia a los valores de correlación más altos.

Para complementar el análisis se realizó un análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés) dónde se obtuvo un ploteo multidimensional, dónde cada elemento (Ag, As, Bi, Mo, Pb, Sb, Zn, Cu) es una dimensión y se representa como una flecha (Figura 11). Para esta correlación se realiza el análisis de componentes principales, formulado por Pearson (1901), mediante los cálculos detallados a su vez por Wold et al. (1987) según:

- Calcular el promedio de cada variable según la Ecuación 1 y normalizar los datos según la Ecuación 2:

$$\text{Promedio: } \bar{x}_i = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Normalización: } x_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_i \quad (2)$$

- Calcular la matriz de covarianza según la Ecuación 3 dónde se analiza conjuntamente cada par de variables entre todas las combinaciones posibles en una matriz de covarianza cuadrada.

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \quad (3)$$

- Calcular los valores y vectores propios según la Ecuación 4, donde los parámetros de la matriz de covarianza determinan las direcciones y magnitud de cada componente, donde C es la matriz de covarianza y λ los valores propios.

$$\text{determinante}(C - \lambda * I) = 0 \quad (4)$$

- Ordenar los valores y vectores propios de forma decreciente y proyectar los datos originales sobre los nuevos ejes formados por los vectores propios, donde Y es la matriz de datos transformados, P es la matriz de vectores propios, y X la matriz de datos normalizados según la Ecuación 5, obteniendo como ejemplo la Ecuación 6.

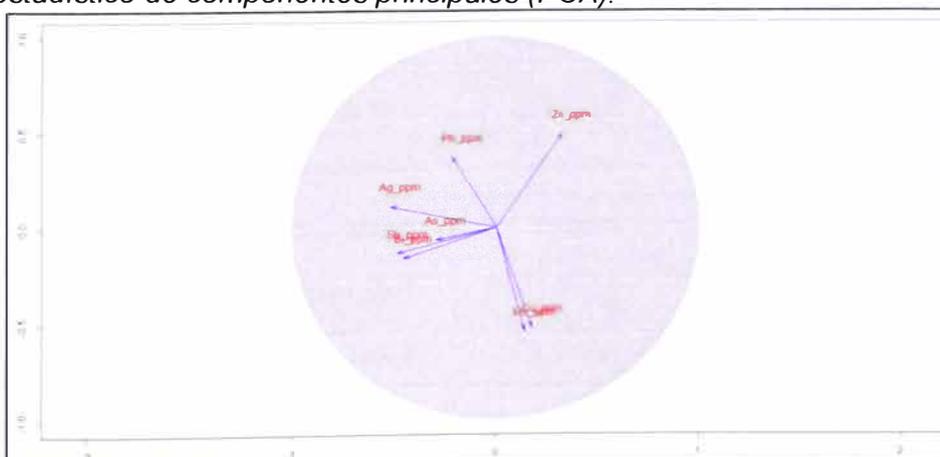
$$Y = X * P \quad (5)$$

$$\text{Ejemplo, Componente: } \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} * (Cu \quad As \quad Pb) = \alpha_1 * Cu + \alpha_2 * As + \alpha_3 * Pb \quad (6)$$

Con esta metodología se logran calcular los coeficientes de cada componente y el factor de correlación entre estos, con el fin de determinar las variables a analizar y brindando un sustento estadístico como se observa en la Figura 16, donde se tiene el comportamiento de las direccionales, ángulo y dirección de cada elemento, existiendo una correlación positiva si ambos elementos tienen flechas en la misma dirección y negativa si tienen una dirección contraria, como es el caso de la correlación positiva entre las varianzas del cobre (Cu) y molibdeno (Mo) así como entre las varianzas del antimonio (Sb), arsénico (As), bismuto (Bi) y plata (Ag).

Figura 16

Análisis estadístico de componentes principales (PCA).

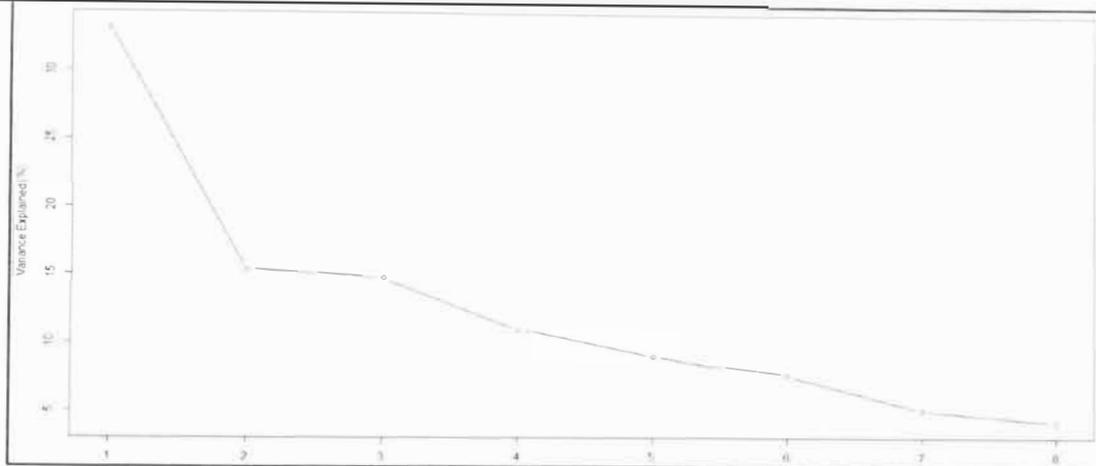


Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R

A su vez se realizó el cálculo de los componentes y el porcentaje (%) de varianza que explica cada uno de los componentes con respecto a la totalidad de los datos, obteniéndose la Figura 17, dónde se observa que el componente más importante y con mayor importancia es el 01 seguido del 02 y 03 con valores cercanos entre sí.

Figura 17

Varianza explicada por cada componente en el análisis PCA.



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R

En el Tabla 9 se tienen los valores exactos del total de la varianza explicada por cada componente, por lo que los que conllevan una mayor importancia al reducir la dimensionalidad de los datos serían los primeros 03 componentes.

Tabla 9

Porcentaje de varianza explicada por componente.

Componente	Varianza explicada (%)
Componente 1	33.21621
Componente 2	15.38379
Componente 3	14.72468
Componente 4	10.97132
Componente 5	8.90012
Componente 6	7.58501
Componente 7	5.04515
Componente 8	4.17373

Continuando con el análisis en el Tabla 10 se tienen la interpretación de cada componente en base a la combinación lineal de los elementos cumpliendo la Ecuación 7.

$$Comp.X = \alpha_1 Ag + \alpha_2 As + \alpha_3 Bi + \alpha_4 Mo + \alpha_5 Pb + \alpha_6 Sb + \alpha_7 Zn + \alpha_8 Cu \quad (7)$$

Tabla 10

Valores por encima de los threshold, plata (Ag).

	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6	Comp.7	Comp.8
Ag	0.188		0.306	0.278		0.107	0.718	0.278
As	0.373	-0.132		-0.234	-0.883			
Bi	0.402	0.527	-0.152		0.109		-0.425	0.578
Mo	0.458	0.384	0.519	-0.173	0.219	0.656		
Pb	0.309	-0.323	0.525	0.387	0.152	0.165	-0.54	-0.179
Sb	0.240	0.153		-0.142	0.171	-0.139		-0.723
Zn	0.304	-0.471		-0.484	0.293	-0.582		0.161
Cu	0.465	0.456	0.576	0.654	-0.119	-0.407		

Nota: los colores naranjas hacen referencia a los coeficientes más altos por elemento en cada componente.

Reemplazando los valores de la Tabla 10 en la Ecuación 7 se obtuvieron:

$$Comp1 = 0.188Ag + 0.373As + 0.402Bi + 0.458Mo + 0.309Pb + 0.240Sb + 0.304Zn + 0.465Cu \quad (8)$$

$$Comp2 = 0.306Ag + 0.527As + 0.527Bi - 0.384Mo - 0.323Pb + 0.153Sb - 0.471Zn + 0.456Cu \quad (9)$$

$$Comp3 = 0.278Ag - 0.234As - 0.152Bi + 0.519Mo + 0.525Pb - 0.142Sb - 0.484Zn + 0.576Cu \quad (10)$$

$$Comp4 = 0.107Ag - 0.883As + 0.109Bi - 0.173Mo + 0.387Pb + 0.171Sb + 0.293Zn + 0.654Cu \quad (11)$$

$$Comp5 = 0.718Ag + 0.425Bi + 0.219Mo + 0.152Pb - 0.139Sb - 0.582Zn - 0.119Cu \quad (12)$$

$$Comp6 = 0.278Ag + 0.578Bi + 0.656Mo + 0.165Pb - 0.723Sb + 0.161Zn - 0.407Cu \quad (13)$$

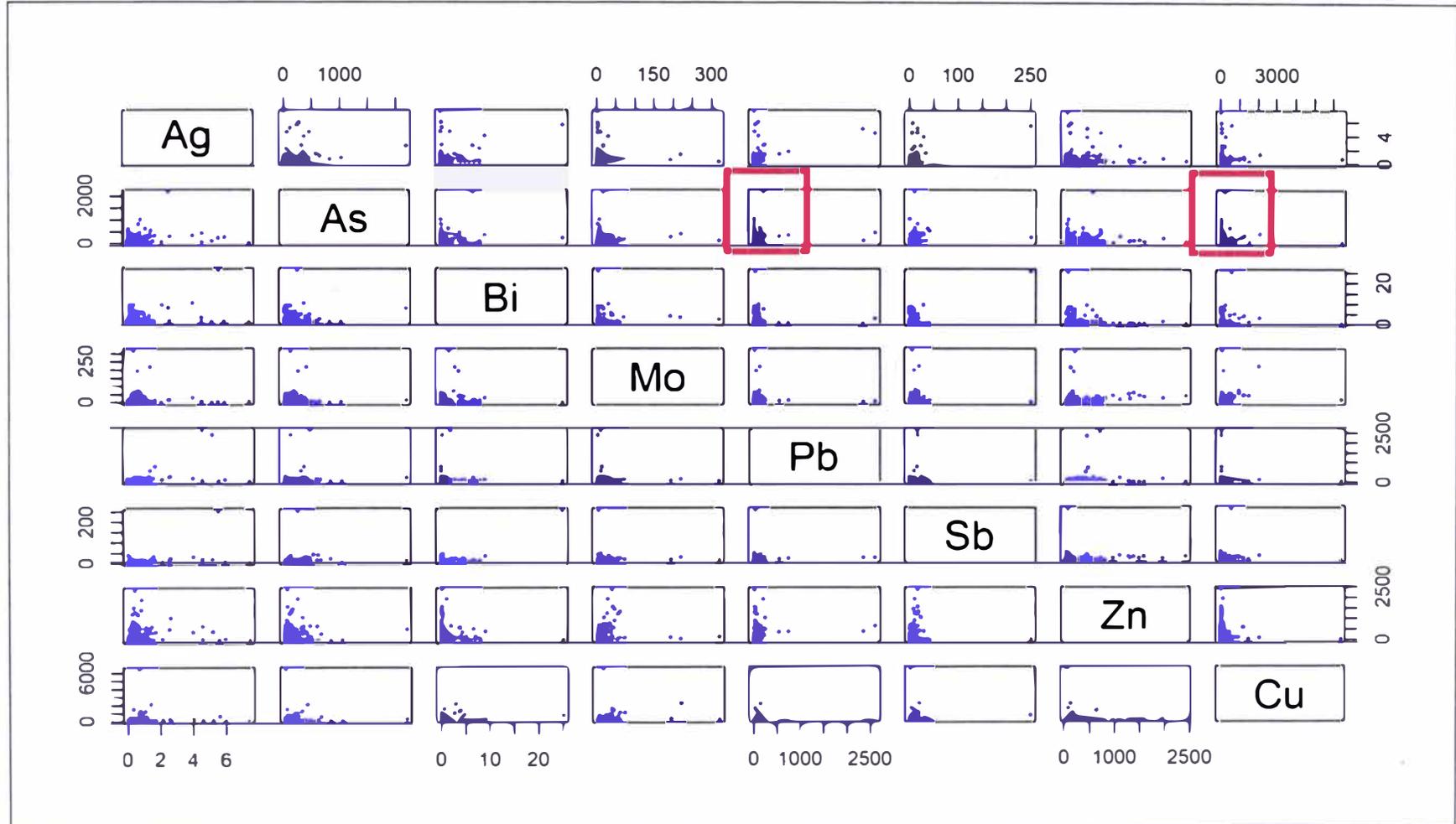
$$Comp7 = 0.278Ag - 0.425Bi - 0.540Pb - 0.723Sb + 0.161Zn \quad (14)$$

$$Comp8 = 0.278Ag + 0.578Bi - 0.173Pb - 0.407Cu \quad (15)$$

De las ecuaciones 08 a 15 se deduce que los valores de mayor importancia en el análisis de los componentes sumado al análisis comparativo bivariado (Figura 18), serían los elementos cobre (Cu), Arsénico (As), Plomo (Pb), Zinc (Zn), bismuto (Bi) y molibdeno (Mo) por lo que en la subcuenca Antabamba tendría que los elementos correspondientes a la asociación mineralógica de un pórfido Cu-Mo se encuentran estadísticamente corroborado y presentan una correlación estadística entre sí.

Figura 18

Correlación bivariable entre las concentraciones elementales.



Nota: aquí se observa la correlación entre As-Mo y As-Cu son las más importantes según la Tabla 8, resaltado en cuadrado rojo

3.4.2 Índices mineralógicos

Según lo descrito por Turel (2012) y por Correa (2020) en el estudio de sedimentos de quebrada se pueden aplicar algoritmos para analizar estadísticamente las asociaciones químicas relacionadas a diferentes tipos de yacimientos por lo que en este apartado se calcularán 05 índices asociados a los yacimientos tipo Pórfido de Cobre-Molibdeno según la Tabla 11 los 05 índices se han utilizado en el apartado 3.4.4 para la preparación de los mapas probabilísticos.

Tabla 11

Asociaciones químicas según cada índice mineralógico.

Índice	Cu	Mo	Au	Ag	Re	As	Pb	Zn	Te	Sb	Bi
Índice 1	X	X				X	X	X			
Índice 2	X	X	X	X	X	X	X	X			
Índice 3	X	X	X						X		
Índice 4	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Índice 5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Nota: Tomado de Turel (2012).

Teniendo en cuenta que los elementos oro (Au), **renio** (Re) y telurio (Te) no poseen valores cuantitativos numéricos detectados no serán considerados en el cálculo global, que se realiza mediante la Ecuación 16:

$$X = \frac{(a - x)}{sd} \quad (16)$$

Dónde:

a = valor normalizado con logaritmo de base 10

x = media aritmética de los valores normalizados

sd = desviación estándar de los valores normalizados

Estos índices son indicadores de ubicación de probabilidad, al sumar los nuevos valores calculados darían zonas con valores altos y con mayor la probabilidad de encontrar yacimientos tipo Pórfido Cu-Mo.

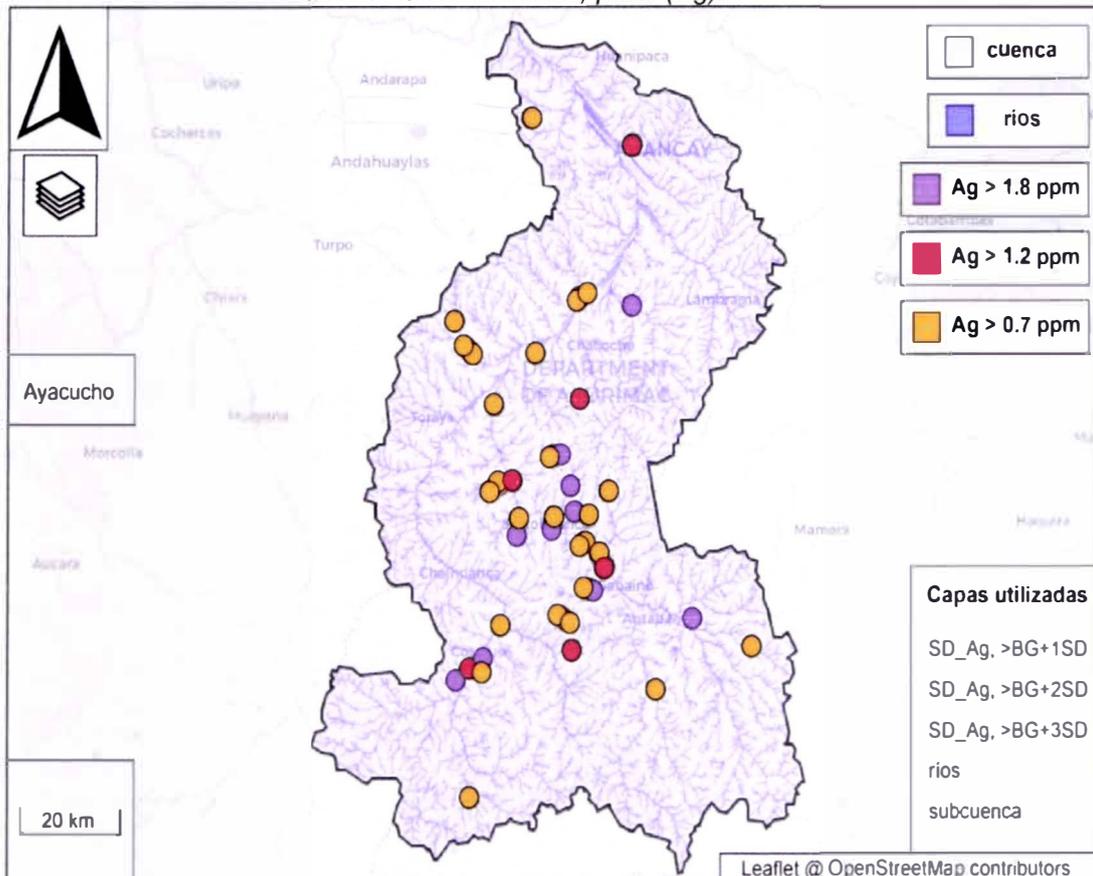
3.4.3 Mapa de valores atípicos

El mapa de valores atípicos es el resultado de calcular los valores por encima del background + desviación estándar ($BG+1SD$), como también por encima de otros valores umbrales calculados mediante el valor de $BG+2SD$ y $BG+3SD$.

El mapa de valores atípicos resaltan las muestras por encima de los valores umbral, Figura 19 para la plata (Ag), Figura 20 para el arsénico (As), Figura 21 para el bismuto (Bi), Figura 22 para el molibdeno (Mo), Figura 23 para el plomo (Pb), Figura 24 para el antimonio (Sb), Figura 25 para el zinc (Zn), y Figura 26 para el cobre (Cu).

Figura 19

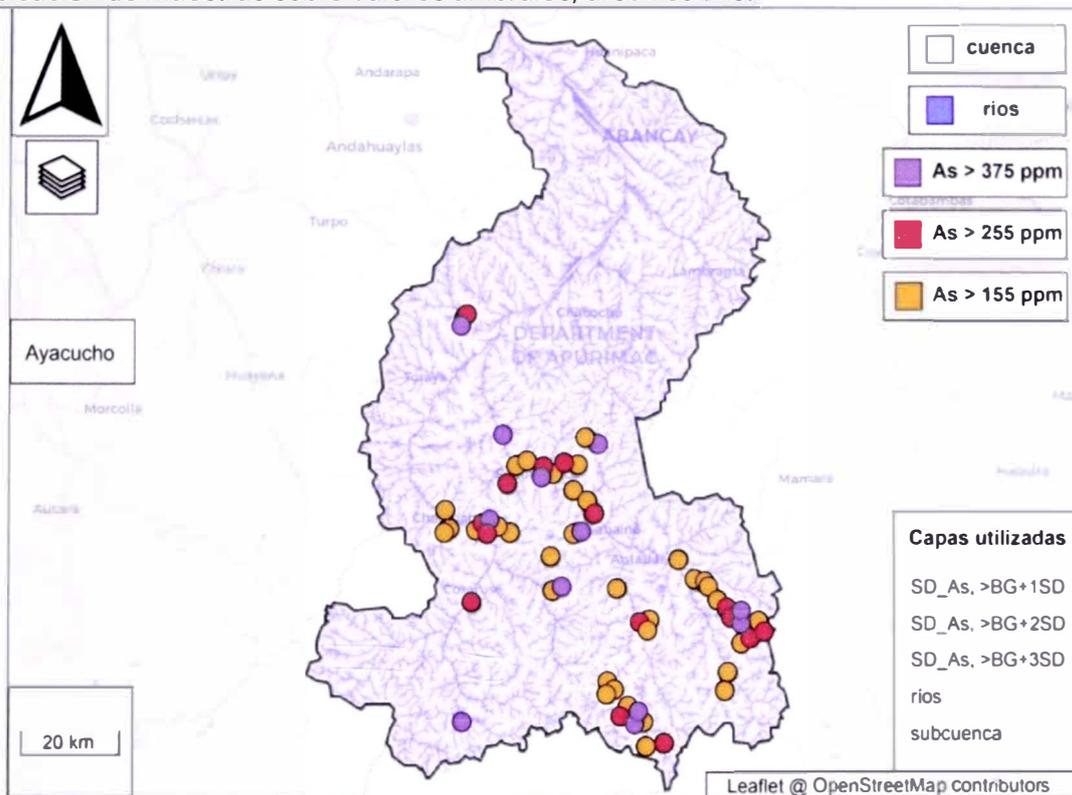
Ubicación de muestras sobre valores umbrales, plata (Ag).



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 20

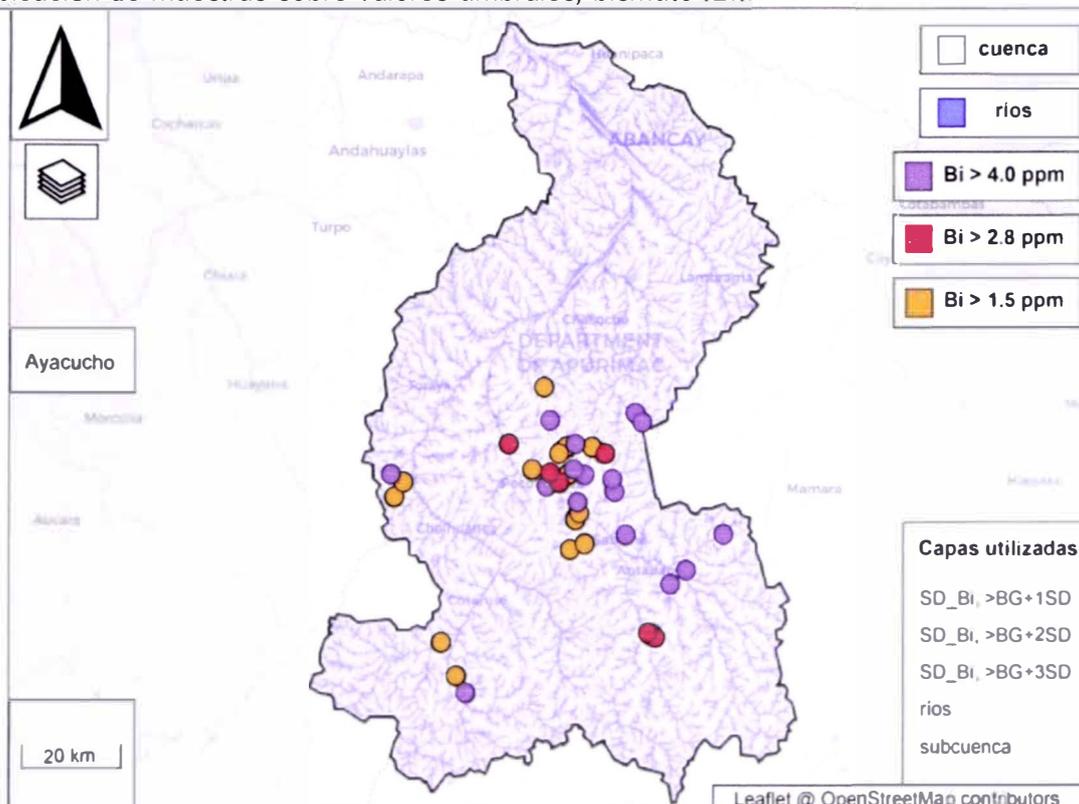
Ubicación de muestras sobre valores umbrales, arsénico (As).



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 21

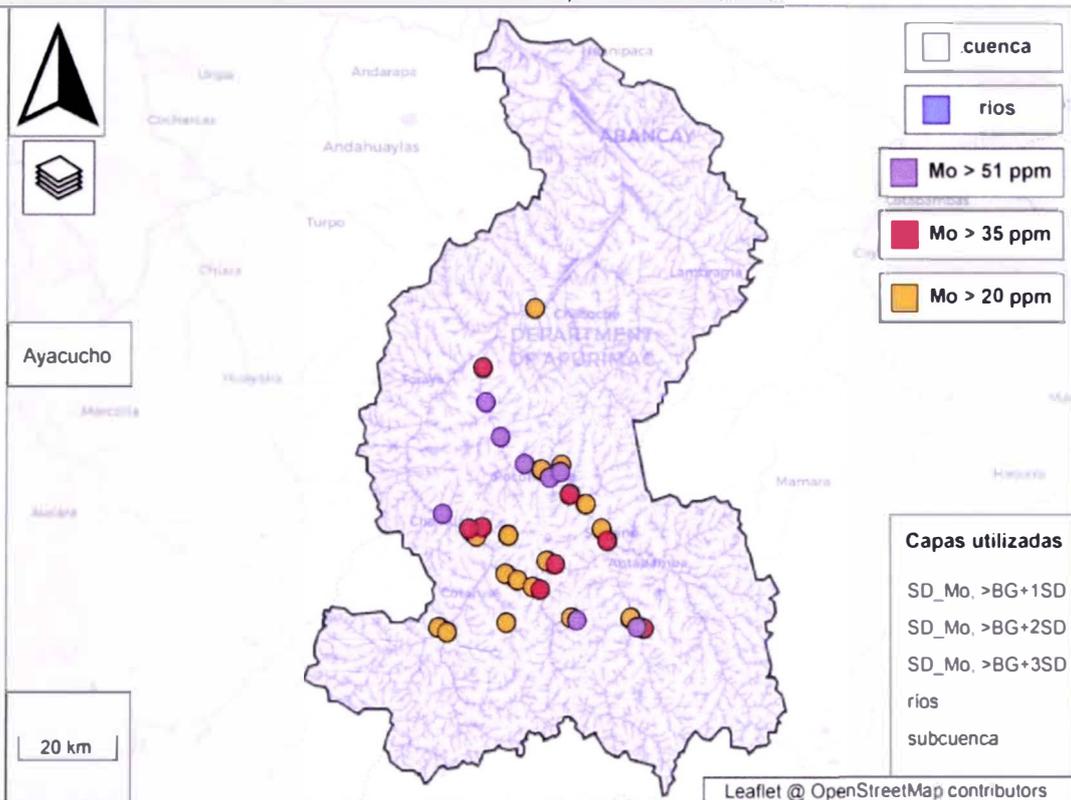
Ubicación de muestras sobre valores umbrales, bismuto (Bi).



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 22

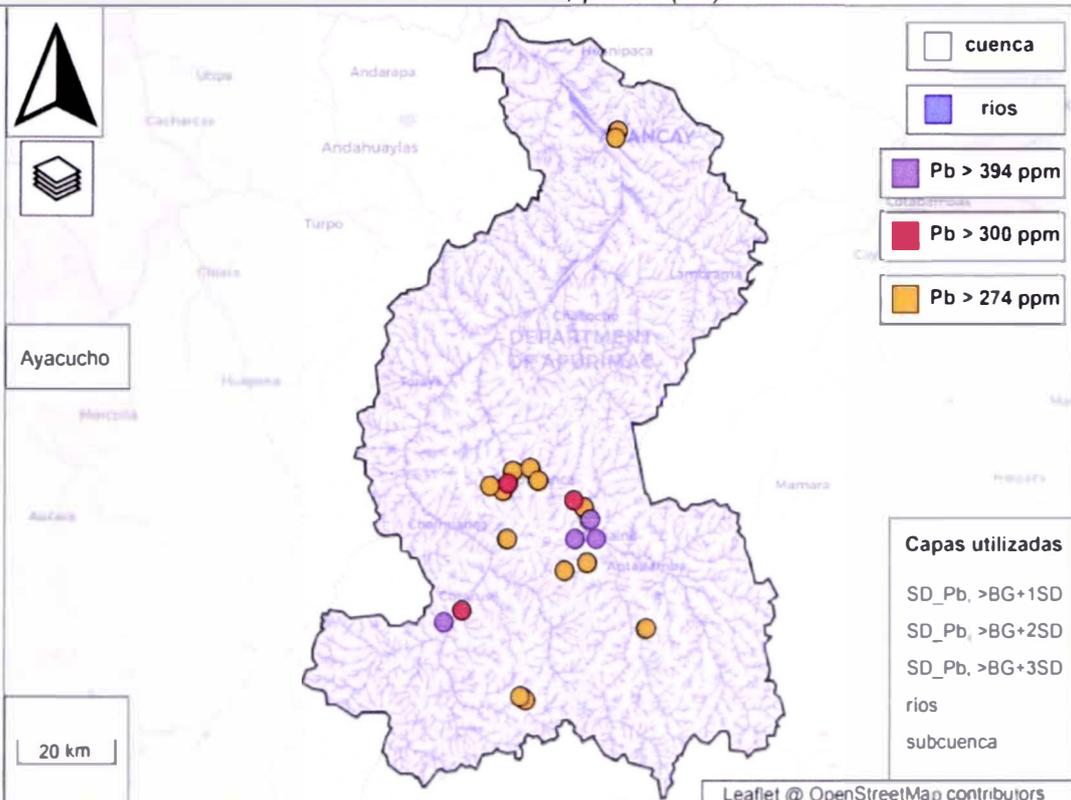
Ubicación de muestras sobre valores umbrales, molibdeno (Mo).



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 23

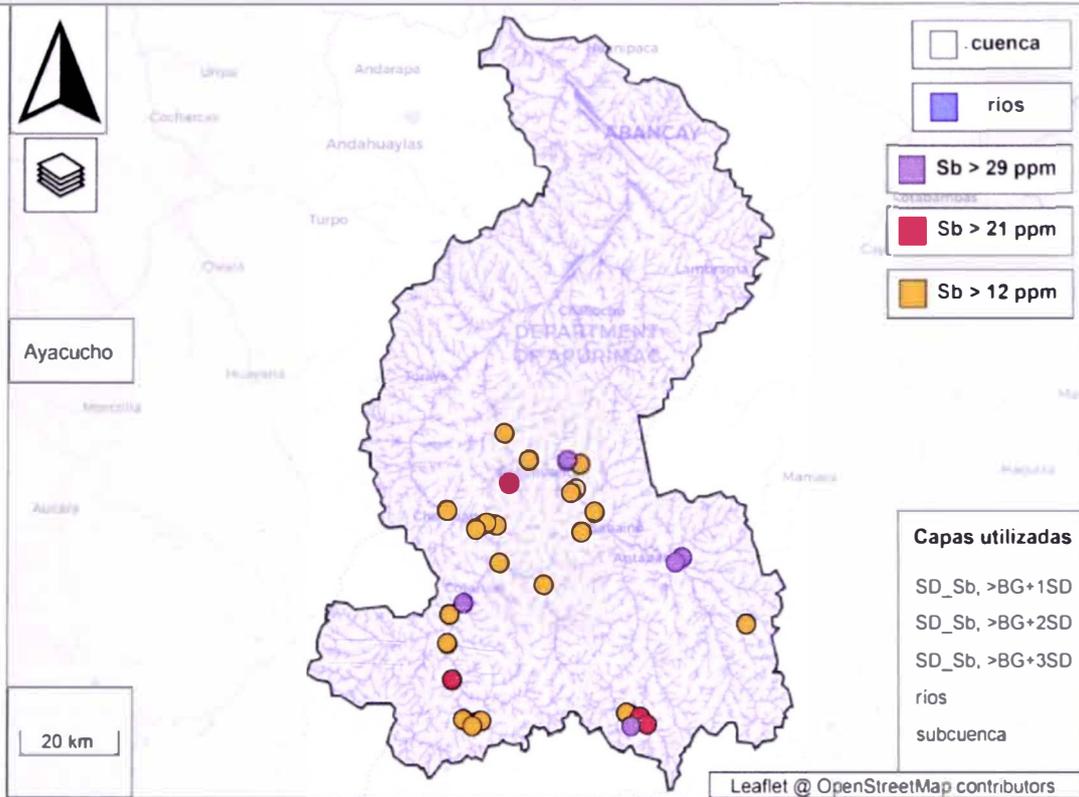
Ubicación de muestras sobre valores umbrales, plomo (Pb).



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 24

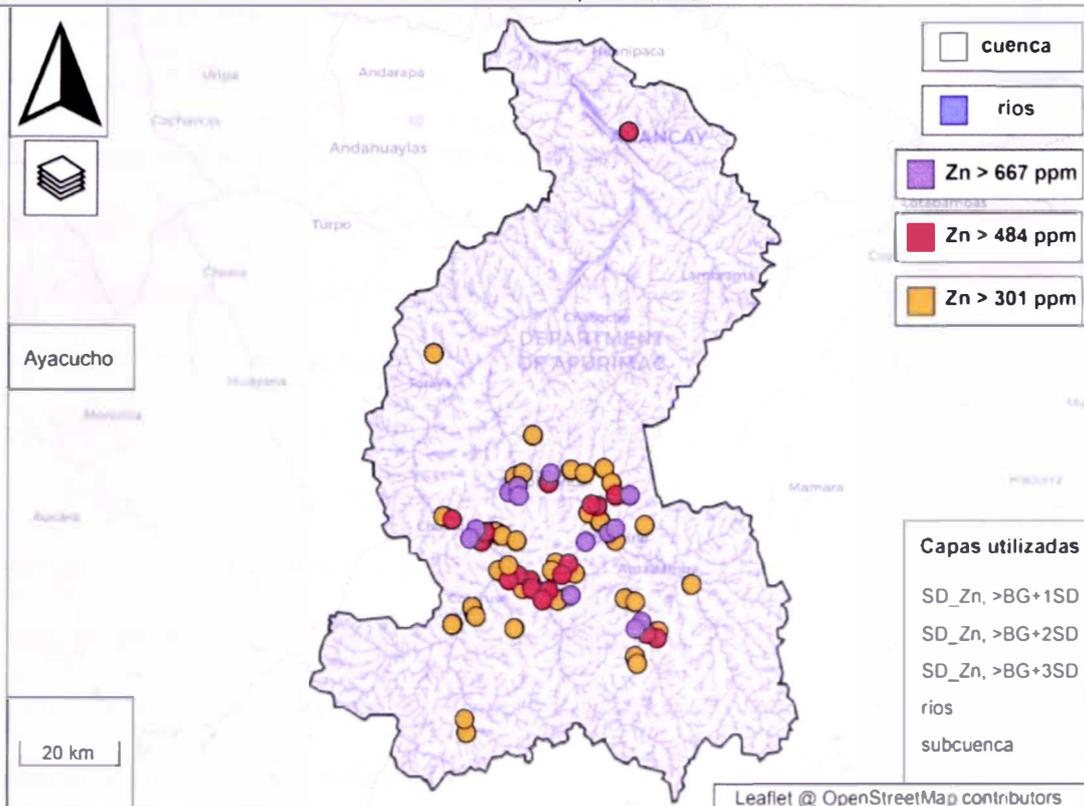
Ubicación de muestras sobre valores umbrales, antimonio (Sb).



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 25

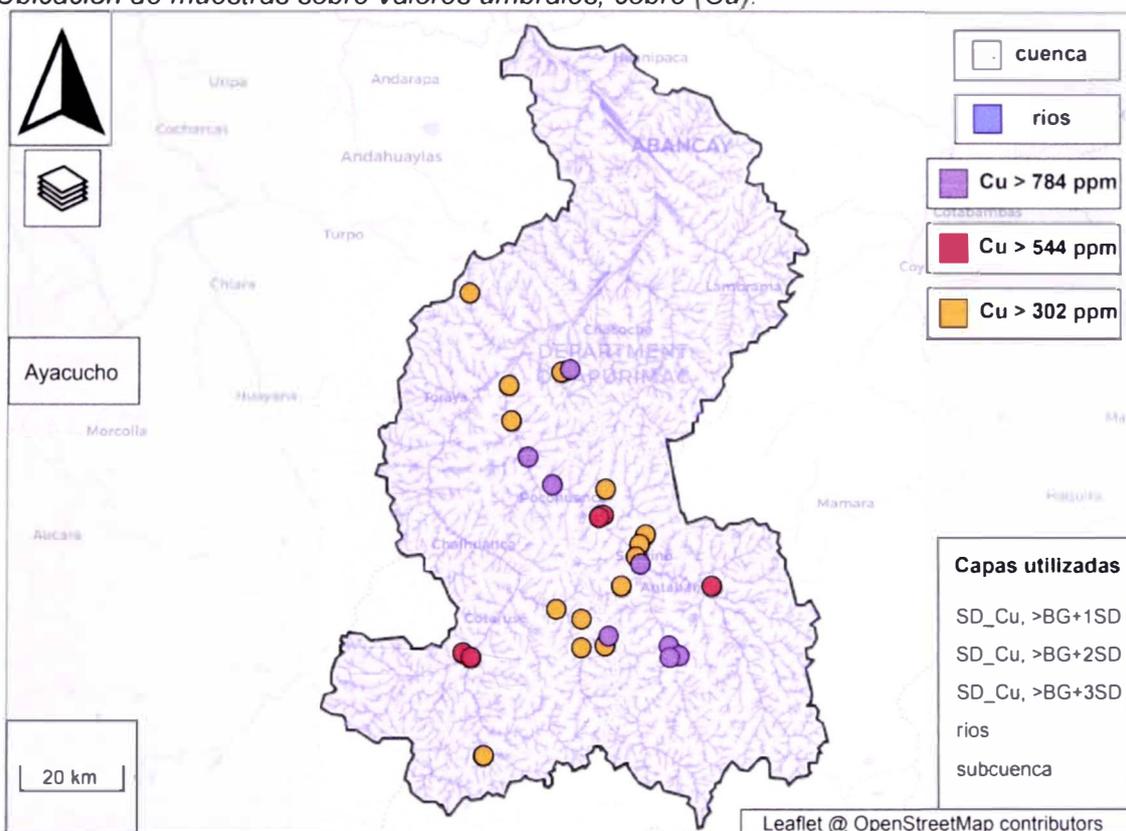
Ubicación de muestras sobre valores umbrales, zinc (Zn).



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 26

Ubicación de muestras sobre valores umbrales, cobre (Cu).



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

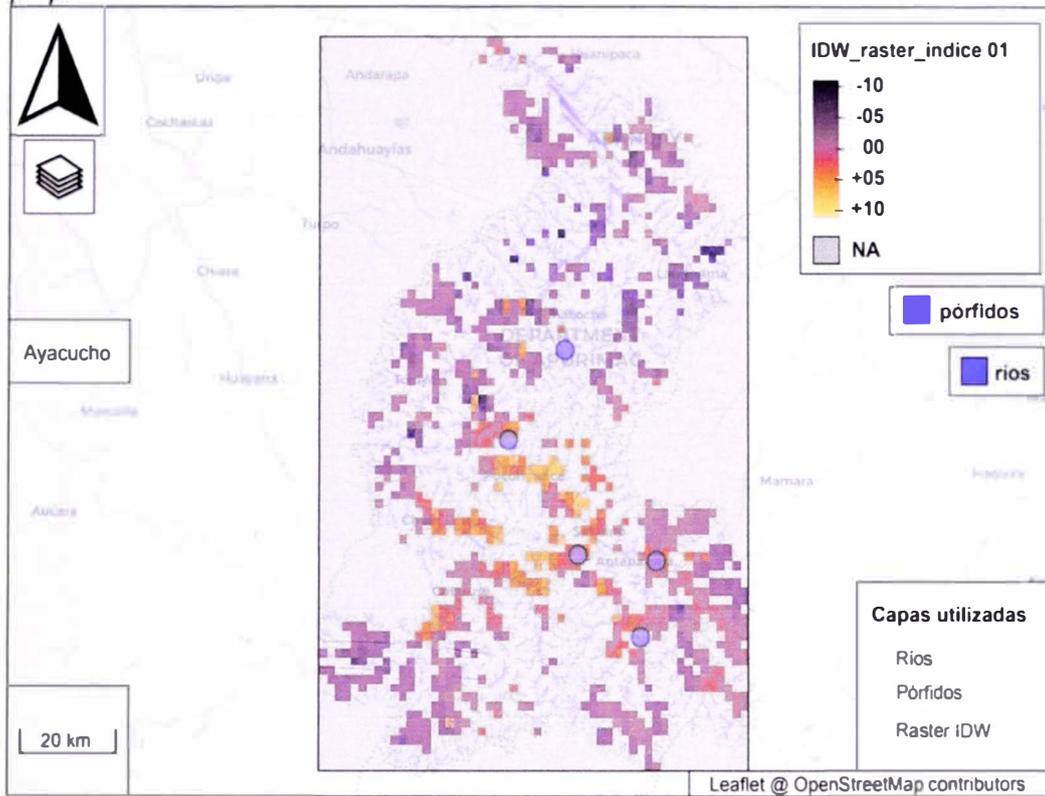
3.4.4 Mapas probabilísticos – Índices 01 al 05

Este apartado se realizó con el software libre de programación R mediante la creación de un ráster de resolución 0.015 (valor seleccionado para una mejor observación) con los valores obtenidos de los índices mineralógicos 01 al 05, calculados con la metodología explicada en el apartado 3.4.2, obteniendo así las áreas de mayor probabilidad (en tonalidades amarillas) de encontrar las asociaciones químicas explicadas en la Tabla 11. Con el apartado 3.4.3 se confirma la correlación entre las zonas de alta probabilidad con respecto a las zonas de valores anómalos (Figura).

Para la creación de los mapas de la Figura 27 hasta la Figura 31, se agregó la ubicación de los yacimientos tipo Pórfido Cu-Mo de nombre La Yegua, Los Chancas, Antilla, Utupara, y Trapiche en orden de norte a sur con el fin de determinar la asociación química de mayor ajuste con respecto a estos yacimientos siendo la de mayor precisión y cercanía por elementos el índice 01.

Figura 27

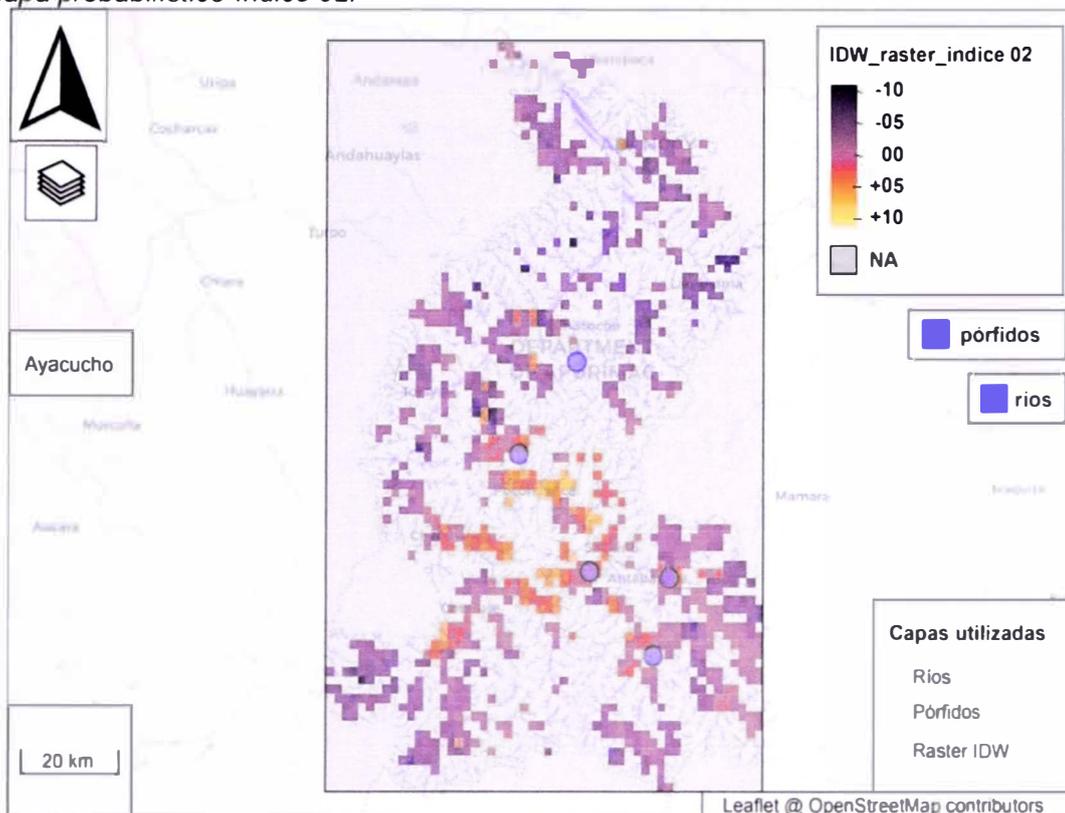
Mapa probabilístico-índice 01.



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 28

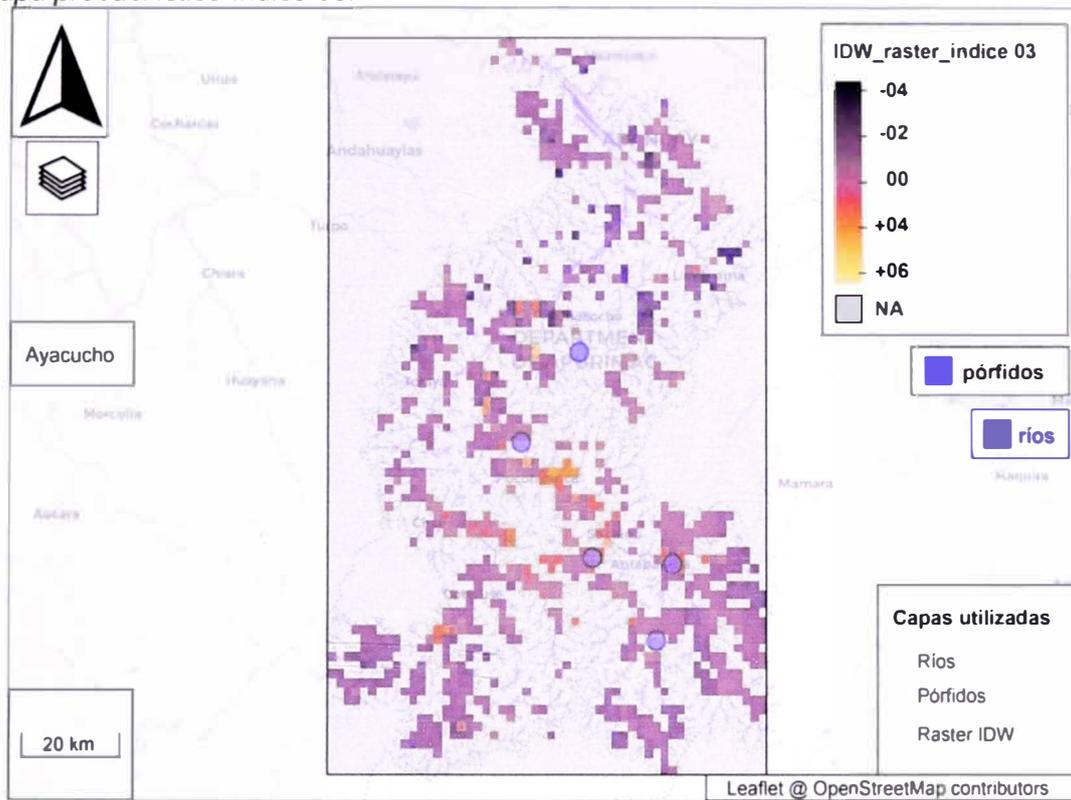
Mapa probabilístico-índice 02.



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 29

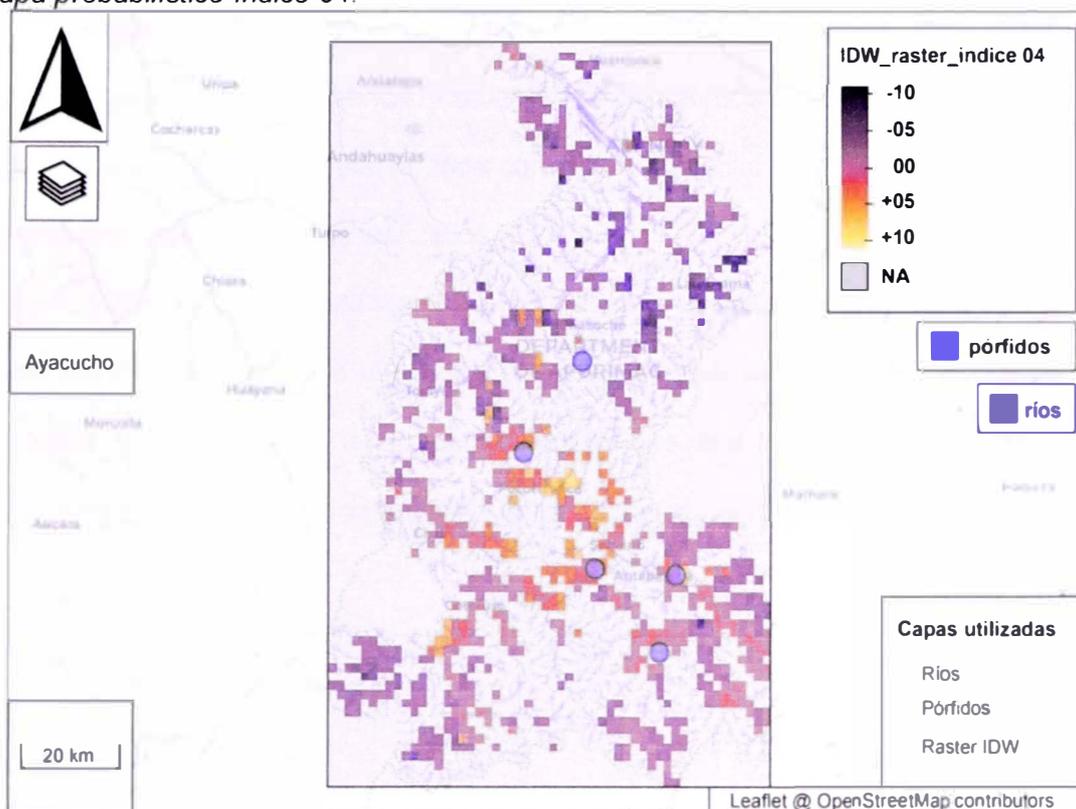
Mapa probabilístico-índice 03.



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 30

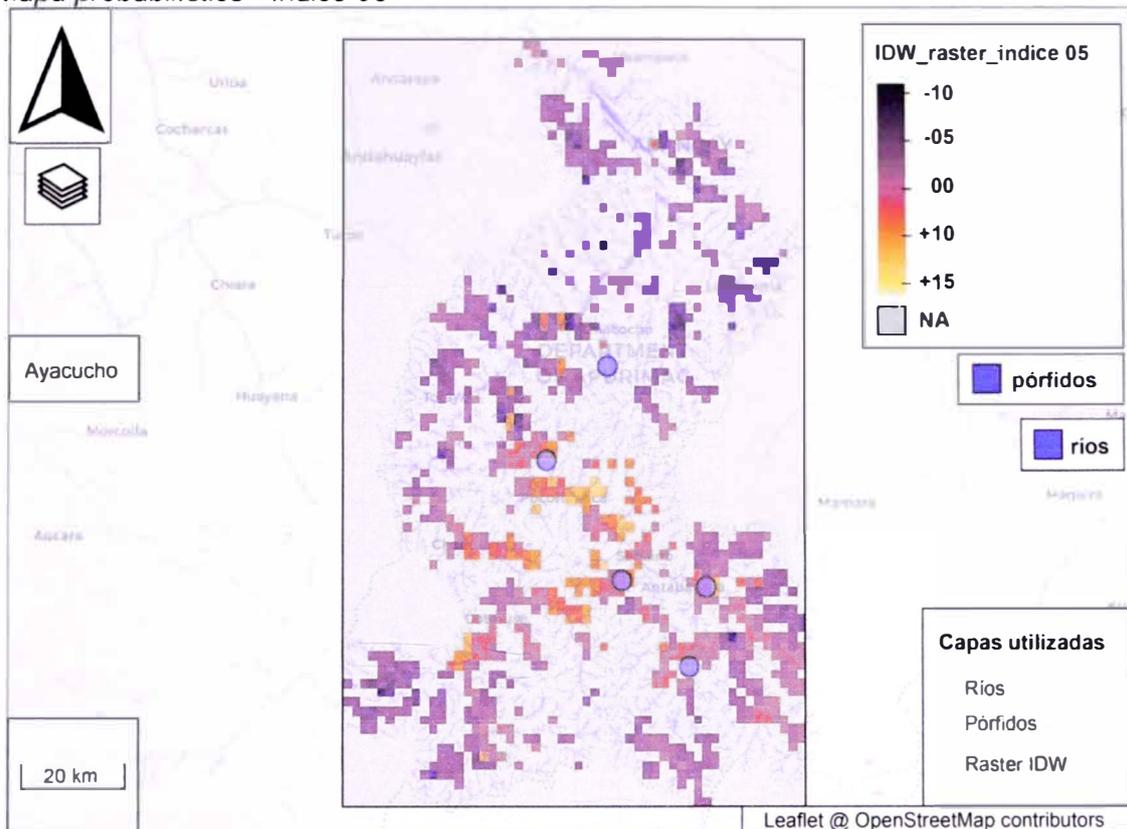
Mapa probabilístico-índice 04.



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 31

Mapa probabilístico - índice 05



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

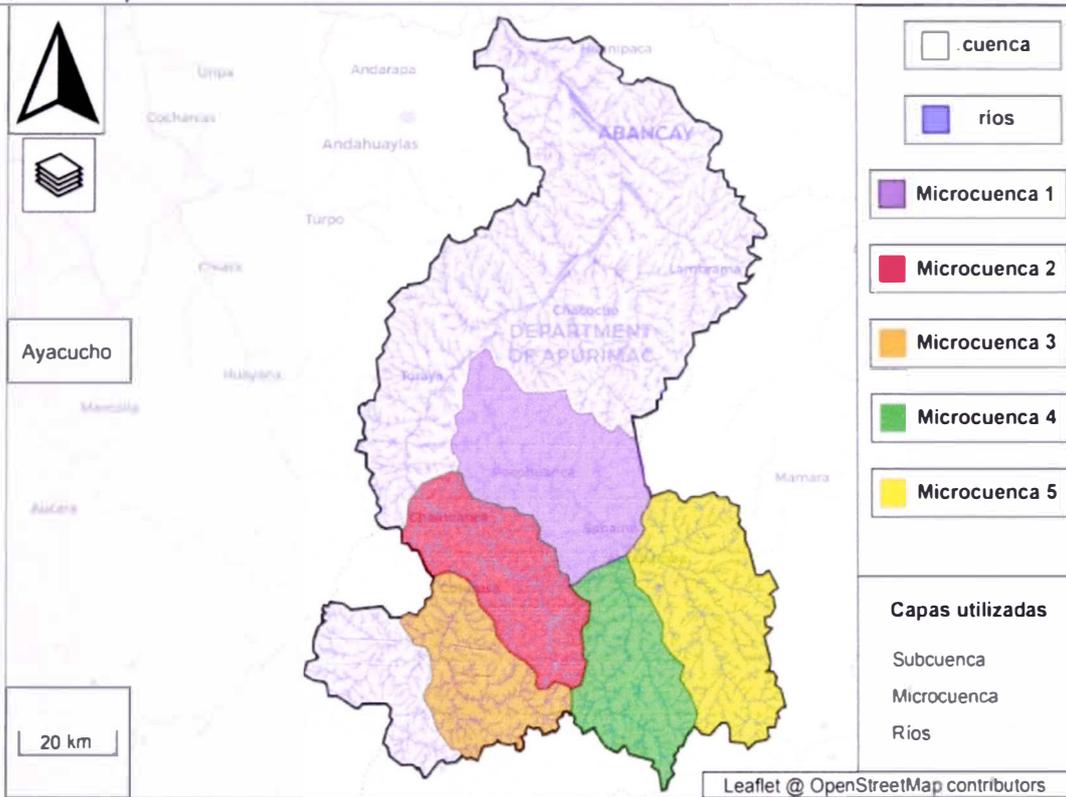
3.5 Delimitación de microcuencas de mayor potencial

Mediante la metodología propuesta por el ANA (Metodología PFAFSTETTER, 2012) se subdividió la Subcuenca Antabamba en 04 microcuencas como se detalla en la Figura 32 con el fin de delimitar la zona con mayor potencial e integrar los resultados de los cálculos, análisis y mapas realizados.

La Figura 33 se realizó tomando como base la delimitación por microcuencas y el mapa probabilístico obtenido del índice 01, y como resultado del ploteo de los valores anómalos de cada elemento analizado, se observa que para ambos casos la microcuenca con el mayor potencial exploratorio sería la Microcuenca 01 y Microcuenca 02.

Figura 32

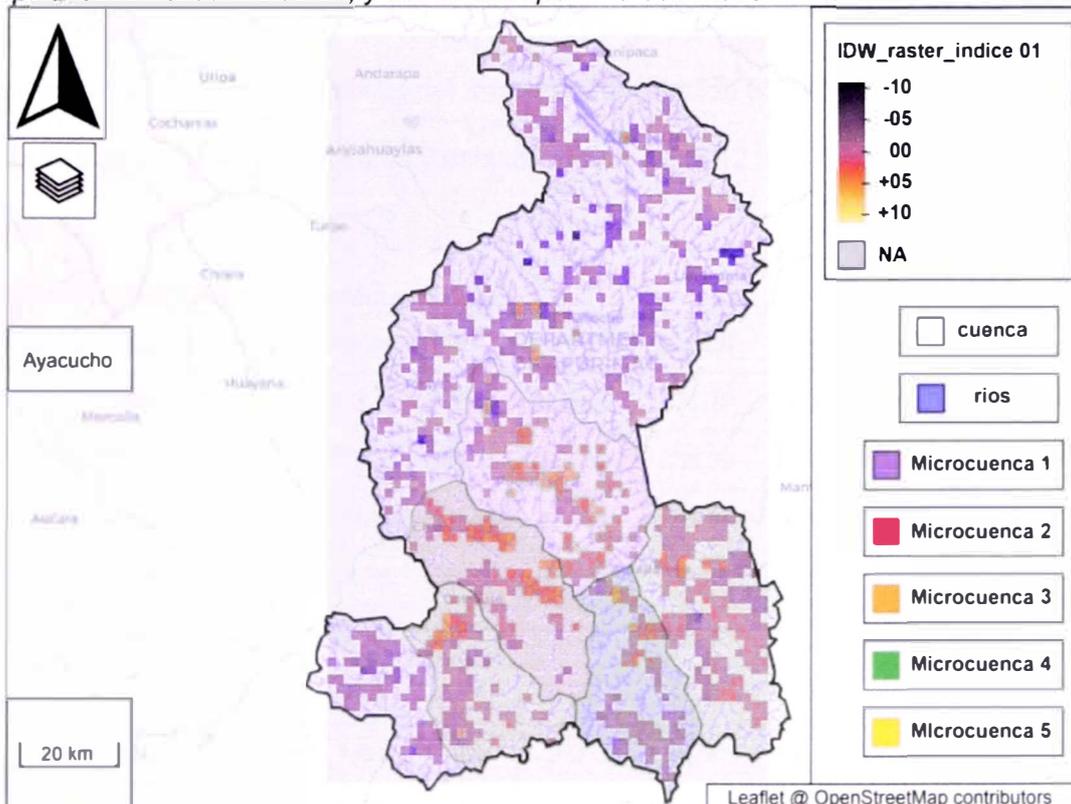
Subdivisión por microcuencas de la Subcuenca Antabamba.



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 33

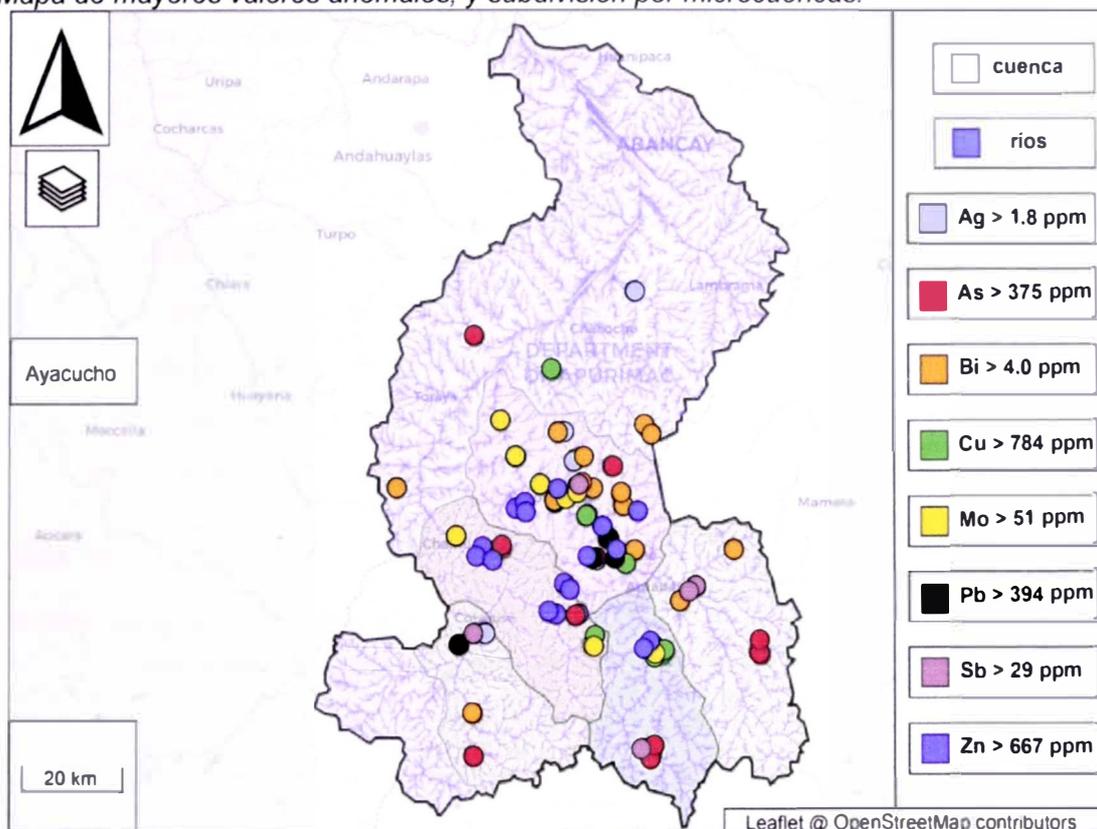
Mapa probabilístico-índice 01, y subdivisión por microcuencas.



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

Figura 34

Mapa de mayores valores anómalos, y subdivisión por microcuencas.



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R.

3.5.1 Análisis estadístico por microcuencas

Con el fin de determinar los parámetros estadísticos exactos para cada microcuena se realizó el análisis del promedio, desviación estándar, valor máximo y los umbrales geoquímicos propuestos y detallado en la Tabla 12 a la Tabla 16.

Tabla 12

Parámetros estadísticos, microcuena 01.

Microcuena 01	Mean	SD	BG+1SD	BG+2SD	BG+3SD	Max
Cobre (Cu)	132.70	270.20	402.90	673.10	943.29	2072.0
Plomo (Pb)	93.29	246.75	340.04	586.79	833.54	2614.0
Zinc (Zn)	204.43	259.31	463.73	723.04	982.35	1959.0
Molibdeno (Mo)	12.75	39.20	51.95	91.15	130.36	318.2
Arsénico (As)	92.29	212.05	304.35	516.40	728.45	2175.0
Antimonio (Sb)	5.17	4.82	9.99	14.82	19.64	30.0
Bismuto (Bi)	1.06	1.85	2.90	4.75	6.60	9.0
Plata (Ag)	0.55	0.75	1.30	2.05	2.80	4.6

Tabla 13*Parámetros estadísticos, microcuenca 02.*

Microcuenca 02	Mean	SD	BG+1SD	BG+2SD	BG+3SD	Max
Cobre (Cu)	323.83	387.26	711.09	1098.35	1485.61	2420.0
Plomo (Pb)	41.23	32.89	74.13	107.02	139.91	177.0
Zinc (Zn)	55.40	61.59	116.99	178.58	240.17	440.3
Molibdeno (Mo)	11.59	13.12	24.71	37.83	50.94	60.0
Arsénico (As)	68.25	92.63	160.88	253.51	346.15	574.0
Antimonio (Sb)	5.39	4.15	9.54	13.69	17.84	20.5
Bismuto (Bi)	0.18	0.21	0.40	0.61	0.83	1.2
Plata (Ag)	0.27	0.23	0.50	0.73	0.96	1.5

Tabla 14*Parámetros estadísticos, microcuenca 03.*

Microcuenca 03	Mean	SD	BG+1SD	BG+2SD	BG+3SD	Max
Cobre (Cu)	54.78	125.15	179.94	305.09	430.24	749.7
Plomo (Pb)	68.18	267.75	335.94	603.69	871.44	2360.0
Zinc (Zn)	109.22	94.00	203.21	297.21	391.21	444.0
Molibdeno (Mo)	2.82	4.73	7.56	12.29	17.02	29.7
Arsénico (As)	40.22	79.68	119.90	199.57	279.25	648.0
Antimonio (Sb)	4.59	6.00	10.59	16.58	22.58	33.8
Bismuto (Bi)	0.33	0.76	1.09	1.85	2.61	6.0
Plata (Ag)	0.39	0.90	1.29	2.19	3.08	6.0

Tabla 15*Parámetros estadísticos, microcuenca 04.*

Microcuenca 04	Mean	SD	BG+1SD	BG+2SD	BG+3SD	Max
Cobre (Cu)	52.04	174.32	226.36	400.68	574.99	1235.0
Plomo (Pb)	28.91	31.25	60.16	91.40	122.65	203.7
Zinc (Zn)	119.33	148.46	267.79	416.25	564.71	806.0
Molibdeno (Mo)	5.02	7.33	12.35	19.68	27.01	40.9
Arsénico (As)	100.20	112.23	212.43	324.67	436.90	603.0
Antimonio (Sb)	4.60	6.65	11.25	17.90	24.55	41.3
Bismuto (Bi)	0.30	0.73	1.04	1.77	2.50	5.0
Plata (Ag)	0.17	0.17	0.34	0.51	0.68	1.0

Tabla 16

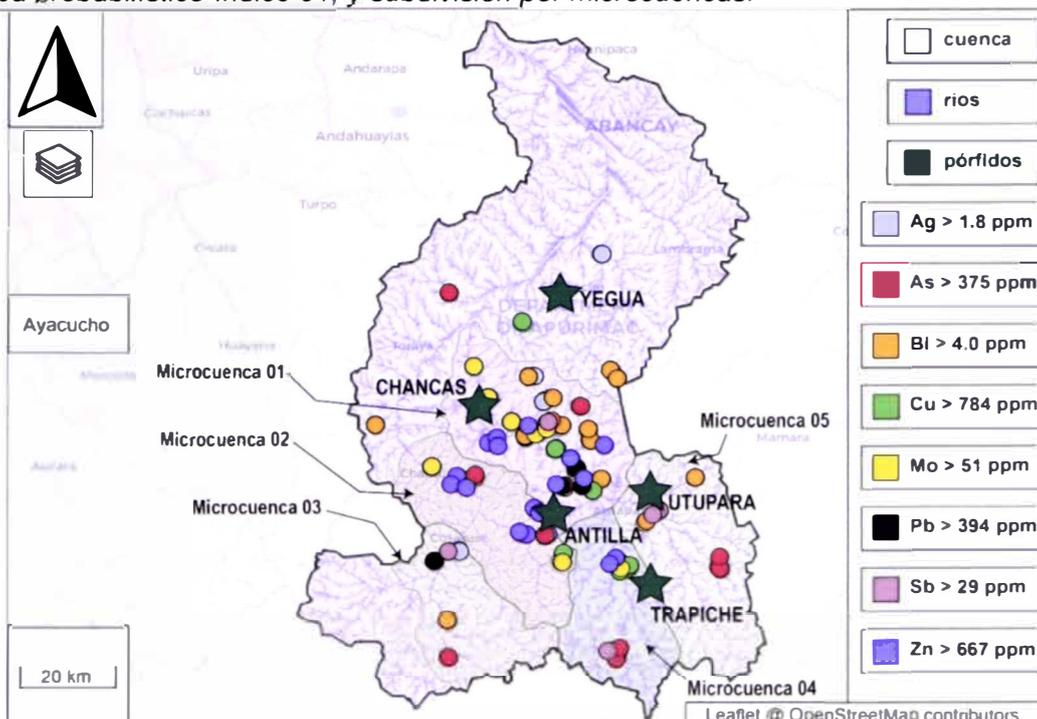
Parámetros estadísticos, microcuenca 05.

Microcuenca 05	Mean	SD	BG+1SD	BG+2SD	BG+3SD	Max
Cobre (Cu)	36.22	55.52	91.74	147.26	202.78	588.0
Plomo (Pb)	20.32	16.42	36.75	53.17	69.60	131.9
Zinc (Zn)	85.69	53.57	139.27	192.84	246.42	422.0
Molibdeno (Mo)	1.89	1.37	3.26	4.63	6.01	8.8
Arsénico (As)	53.97	96.97	150.94	247.91	344.88	818.0
Antimonio (Sb)	3.62	20.46	24.08	44.54	64.99	250.0
Bismuto (Bi)	0.43	2.16	2.59	4.75	6.91	25.0
Plata (Ag)	0.22	0.47	0.69	1.15	1.62	5.6

De las tablas descritas sumado a lo detallado en el apartado 3.4.3, se realizó la Figura 35, dónde se observan los valores anómalos más altos, el rango del promedio hasta el valor promedio sumado a 03 veces la desviación estándar, la división por microcuencas, la ubicación de los pórfidos de Cu-Mo, de esto se confirma lo descrito en el apartado 3.4.4 relacionado al mapa de probabilidades por índices mineralógicos, que las zonas de mayor probabilidad de encontrar un pórfido Cu-Mo según su asociación química y mayor frecuencia de valores anómalos de elementos analizados son las Microcuencas 01 y 02.

Figura 35

Mapa probabilístico-índice 01, y subdivisión por microcuencas.



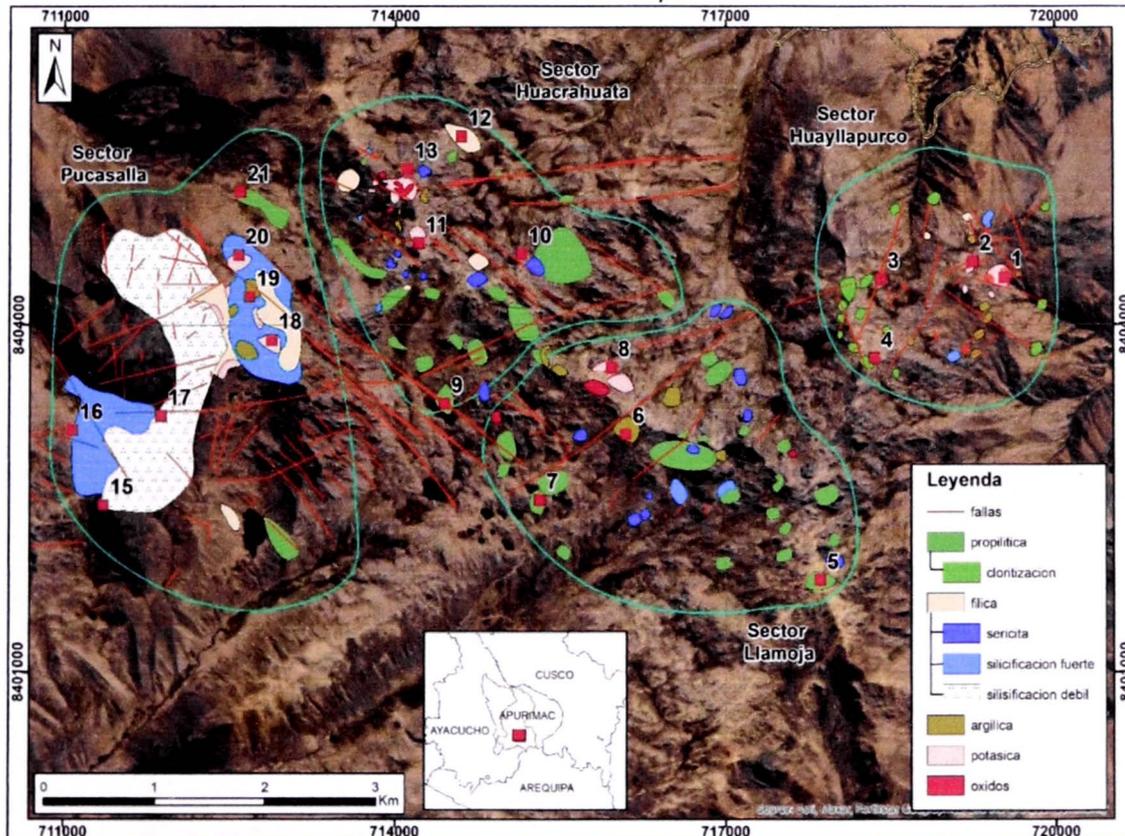
Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R y modificado mediante Illustrator.

3.5.2 Validación petrográfica de campo

Validando lo señalado en el apartado 3.4.1, se tomaron 20 muestras de roca en la Microcuenca 02, en las inmediaciones de las granodioritas de la Unidad Progreso (Figura 36). Se ha realizado la descripción petrográfica de las muestras tomadas y sus resultados químicos en los 04 sectores Pucasalla, Huacrahuata, Huayllapurco y Llamuja.

Figura 36

Ubicación de las muestras de roca tomadas en campo.



Nota: mapa base tomado de <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main> (Sistema de información geográfica que recopila la información geológica y catastral minera generada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico).

3.5.1.1 Sector Huayllapurco. Se encuentra ubicado en el extremo oriental del área de estudio, hay alteración potásica por presencia de feldespatos potásicos alterados, se tomaron las muestras ant_01 y ant_02. La cloritización se evidencia por plagioclasas obliteradas y producto de alteración de hornblendas, se tomaron las muestras ant_03 y ant_04. Seguidamente se describen las 04 muestras.

3.5.1.1.1 Ant_01. Constituida por granodiorita con alteración potásica por alteración de feldespato potásico, biotita secundaria, presenta valores de Cu 935 ppm, As de 110 ppm, Pb de 150 ppm, y Zn de 175 ppm (Figura 3737).

Figura 37

Muestra Ant_01, granodiorita con feldespatos potásicos alterados



Fuente: Elaboración propia

3.5.1.1.2 Ant_02. Constituida por granodiorita con venillas de cuarzo y halos de biotita-magnetita, presenta valores de Cu de 2100 ppm, As de 140 ppm, Pb de 210 ppm, y Zn de 180 ppm (Figura 38).

Figura 38

Muestra Ant_02, granodioritas con alteración potásica y halos de magnetita

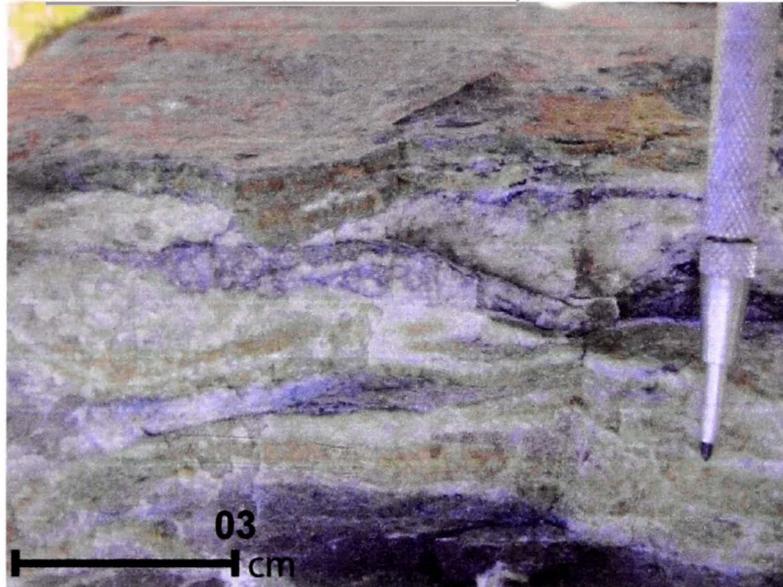


Fuente: Elaboración propia

3.5.1.1.3 Ant_03. Constituida por una granodiorita con vetilla de cuarzo bandeado con intercalaciones y halos de clorita-epidota, presenta valores de Cu de 226 ppm, As de 10 ppm, Pb de 50 ppm, y Zn de 23 ppm (Figura 39).

Figura 39

Muestra Ant_03, veta de cuarzo con halos de clorita-epidota



Fuente: Elaboración propia

3.5.1.1.4 Ant_04. Constituida por diorita verdosa con alto contenido en plagioclasas, y presencia de clorita-calcita, presenta valores de Cu de 178 ppm, As de 23 ppm, Pb de 147 ppm, y Zn de 110 ppm (Figura 40).

Figura 40

Muestra Ant_04, diorita con clorita-calcita



Fuente: Elaboración propia

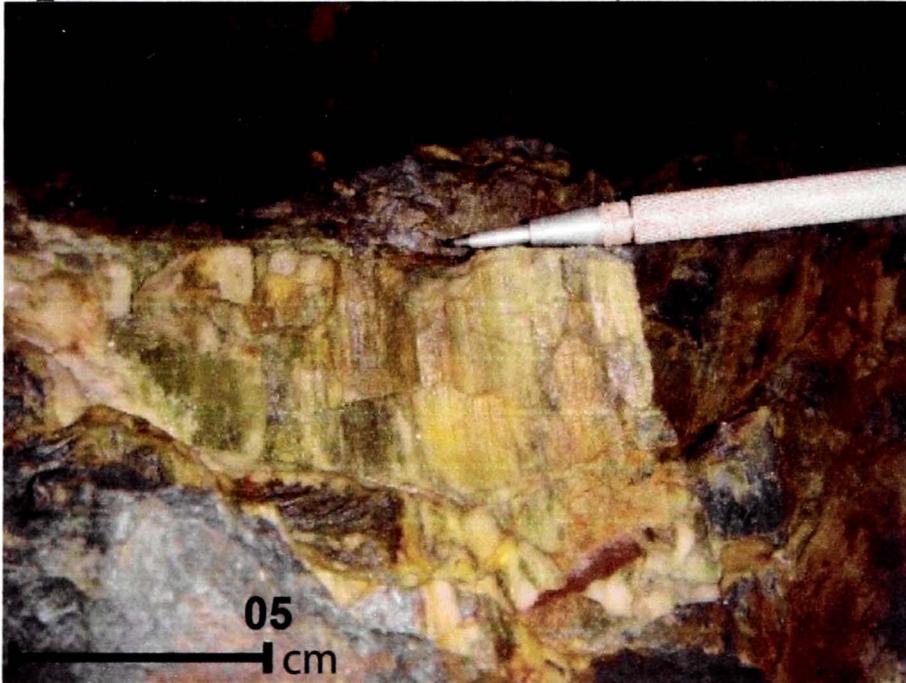
3.5.1.2 Sector Llamuja. Se encuentra ubicado en centro-sur del área de estudio, hay alteración propilitica por la presencia de una asociación mineralógica de clorita-epidota, se tomaron las muestras ant_05 y ant_07.

La alteración argílica se evidencia por presencia de caolinita, se tomó la muestra ant_06, y la alteración potásica por la presencia de feldespatos potásicos alterados, y se tomó la muestra ant_08.

3.5.1.2.1 Ant_05. Constituida por diorita con venillas de cuarzo con óxidos y halos de clorita y epidota, presenta valores de Cu de 284 ppm, As de 21 ppm, Pb de 149 ppm, y Zn de 138 ppm (Figura 41).

Figura 41

Muestra Ant_05, venillas de cuarzo con halos de clorita-epidota alterados



Fuente: Elaboración propia

3.5.1.2.2 Ant_07. Constituida por una granodiorita con veta de cuarzo cortado por venillas de sílice, y presencia de caolinita-molibdenita, presenta valores de Cu de 442 ppm, Mo de 210 ppm, As de 19 ppm, Pb de 149 ppm, y Zn de 128 ppm (Figura 42).

Figura 42

Muestra Ant_07, veta de cuarzo con presencia de caolinita



Fuente: Elaboración propia

3.5.1.2.3 Ant_06. Constituida por diorita gris inequigranular, los minerales ferromagnesianos están alterados, presenta débil propilitización, asociación mineralógica de epidota-clorita con presencia de diseminaciones de pirita y calcopirita, presenta valores de Cu de 593 ppm, As de 14 ppm, Pb de 278 ppm, y Zn de 143 ppm (Figura 43).

Figura 43

Muestra Ant_06, diorita con alteración propilitica y presencia de epidota-clorita

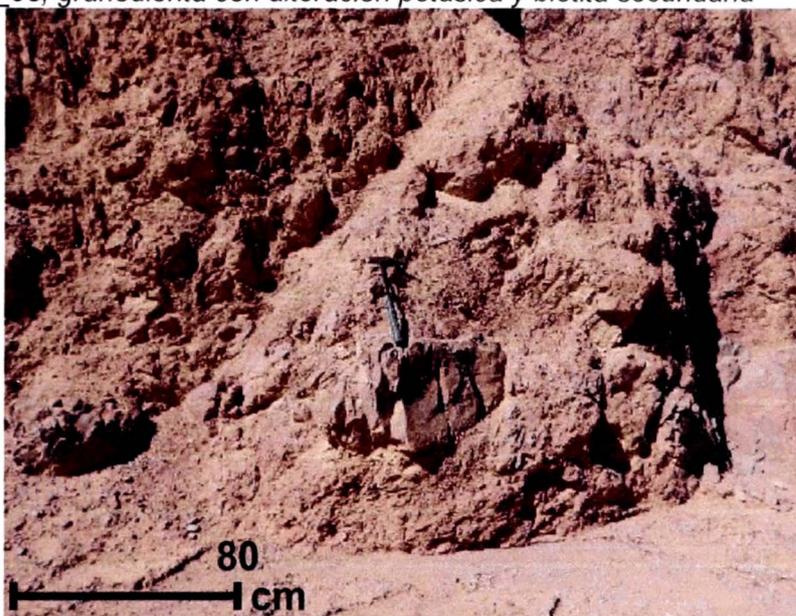


Fuente: Elaboración propia

3.5.1.2.4 Ant_08. Constituida por granodiorita con fenos de feldespatos potásicos con alteración incipiente moderada, con diseminaciones de magnetita y fracturas tapizadas con biotita secundaria, presenta valores de Cu de 793 ppm, As de 48 ppm, Pb de 198 ppm, y Zn de 172 ppm (Figura 44).

Figura 44

Muestra Ant_08, granodiorita con alteración potásica y biotita secundaria



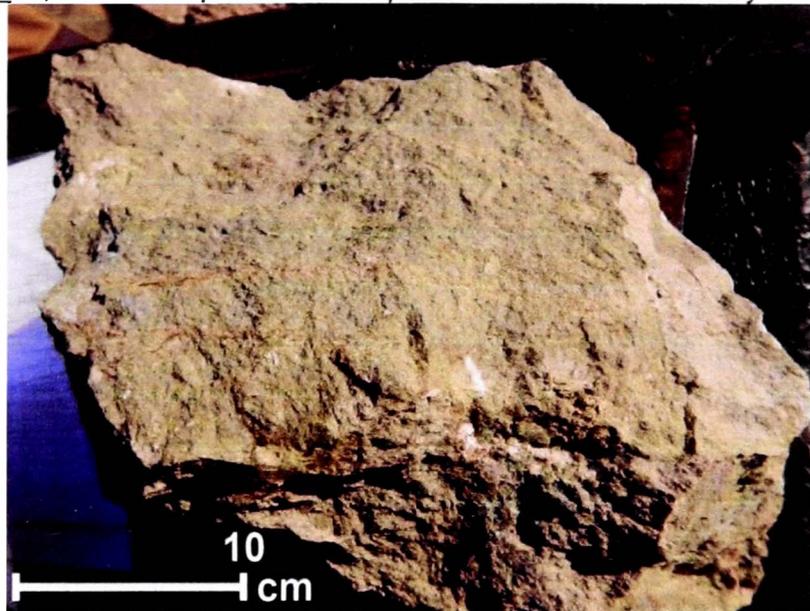
Fuente: Elaboración propia

3.5.1.3 Sector Huacrahuata. Se encuentra ubicado en centro-norte, hay alteración propilítica por la presencia de una asociación mineralógica de clorita-epidota, se tomaron las muestras ant_09 y ant_10. La alteración filica se evidencia por la presencia de cuarzo-sericita, se tomó la muestra ant_12, y la alteración potásica por la presencia de feldespatos potásicos alterados, y se tomaron las muestras ant_11 y ant_13.

3.5.1.3.1 Ant_09. Constituida por una probable diorita, con presencia de epidota y clorita con venillas de calcita, y diseminaciones de pirita fina, presenta valores de Cu de 231 ppm, As de 47 ppm, Pb de 173 ppm, y Zn de 132 ppm (Figura 45).

Figura 45

Muestra Ant_09, diorita con presencia de epidota con venilla de calcita y óxidos



Fuente: Elaboración propia

3.5.1.3.2 Ant_10. Constituida por andesita cortada por venillas de cuarzo con óxidos y clorita, presenta valores de Cu de 391 ppm, As de 32 ppm, Pb de 128 ppm, y Zn de 130 ppm (Figura 46).

Figura 46

Muestra Ant_10, andesita con venillas de cuarzo con óxidos y clorita

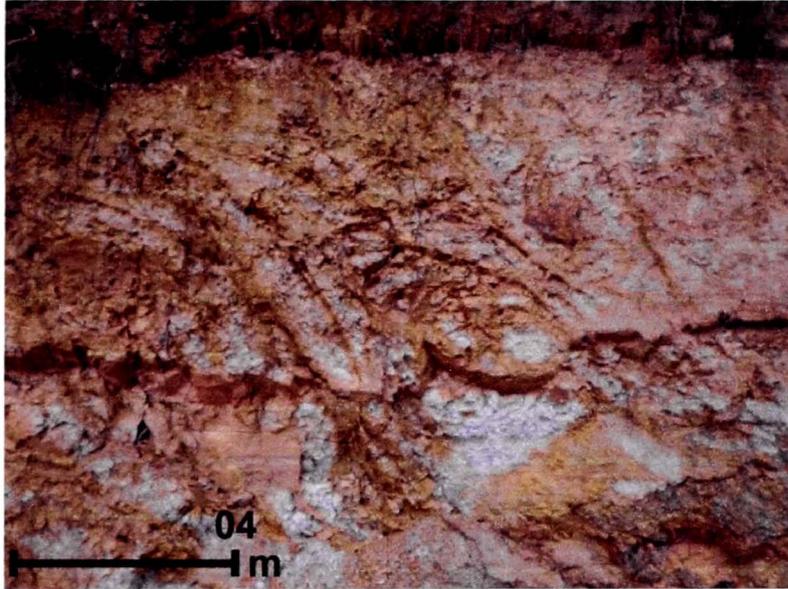


Fuente: Elaboración propia

3.5.1.3.3 Ant_12. Constituida por granodiorita con presencia de cuarzo-sericita y disseminaciones de óxidos, presenta valores de Cu de 493 ppm, As de 32 ppm, Pb de 187 ppm, y Zn de 103 ppm (Figura 47).

Figura 47

Muestra Ant_12, granodiorita con presencia de cuarzo-sericita

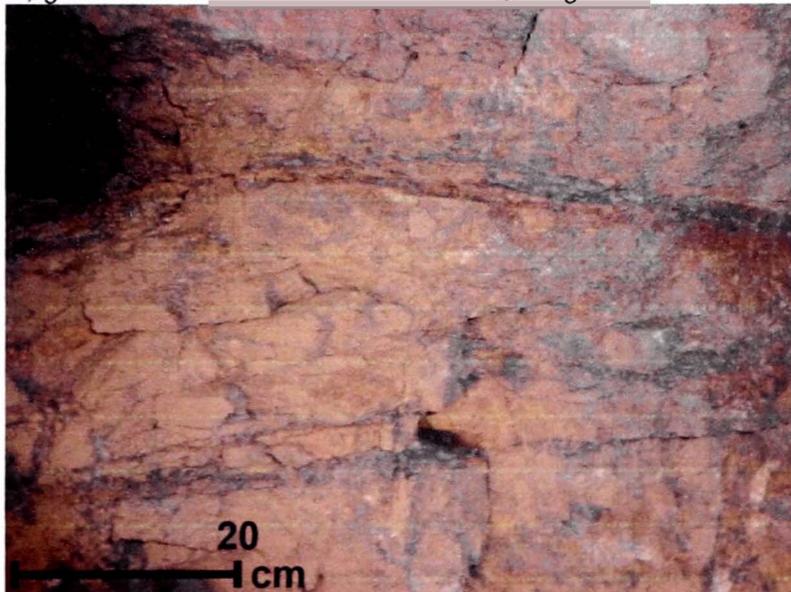


Fuente: Elaboración propia

3.5.1.3.4 Ant_11. Constituida por granodiorita, presentando una leve alteración potásica y venillas de magnetita con biotita secundaria, presenta valores de Cu de 783 ppm, As de 31 ppm, Pb de 189 ppm, y Zn de 143 ppm (Figura 48).

Figura 48

Muestra Ant_11, granodiorita con biotita secundaria y magnetita

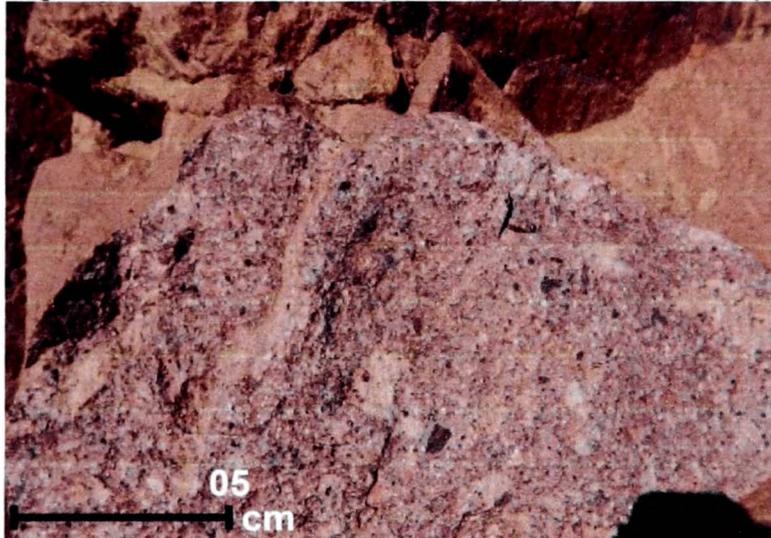


Fuente: Elaboración propia

3.5.1.3.5 Ant_13. Constituida por granodiorita con una moderada alteración potásicas con calcopirita-pirita diseminada, presenta valores de Cu de 841 ppm, As de 21 ppm, Pb de 143 ppm, y Zn de 121 ppm (Figura 49).

Figura 49

Muestra Ant_13, granodiorita con alteración potásica y presencia de calcopirita

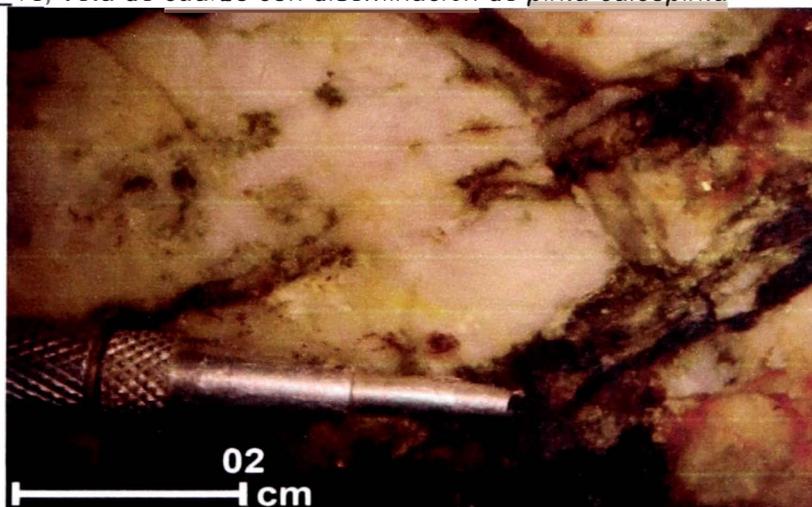


Fuente: Elaboración propia

3.5.1.4 Sector Pucasalla. Se encuentra ubicado al oeste, se evidencia silicificación moderada por presencia de rellenos secundarios y venillas de cuarzo, se tomaron las muestras ant_15, y ant_16. Constituida por veta de cuarzo con venillas de hematita y goethita con diseminaciones de pirita-calcopirita, presenta valores de Cu de 931 ppm, As de 32 ppm, Pb de 198 ppm, y Zn de 142 ppm (Figura 50).

Figura 50

Muestra Ant_15, veta de cuarzo con diseminación de pirita-calcopirita

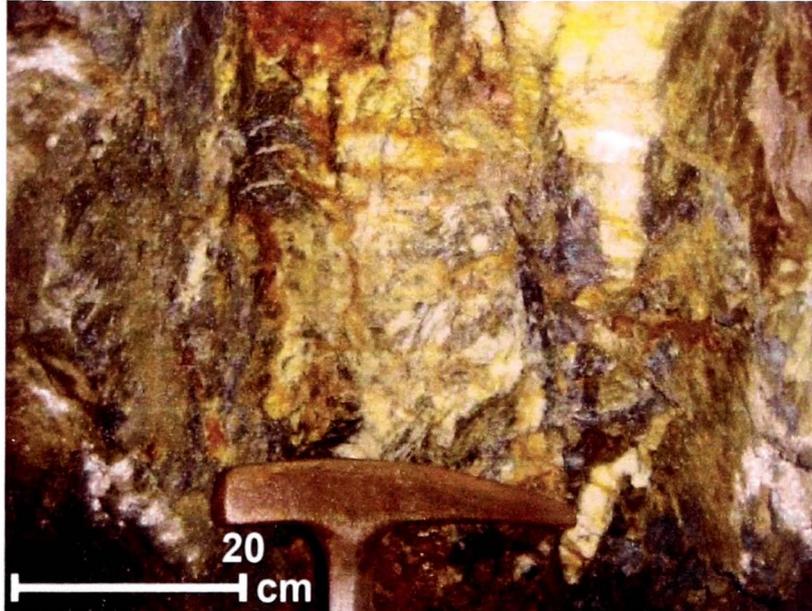


Fuente: Elaboración propia

3.5.1.4.1 Ant_16. Constituida por veta de cuarzo blanco cortado por venillas de silice gris con disseminaciones de calcopirita y pirita, presenta valores de Cu de 941 ppm, As de 73 ppm, Pb de 124 ppm, y Zn de 163 ppm (Figura 51).

Figura 51

Muestra Ant_16, veta de cuarzo con disseminación de pirita-calcopirita



Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico por asociaciones geoquímicas en R para la subcuenca Antabamba y las 05 microcuencas, así como la caracterización geológica.

4.1 Análisis de anomalías geoquímicas y alteraciones

Del análisis geoquímico y estadístico (apartado 3.3) se obtuvieron anomalías geoquímicas de cobre (Cu, 302-544 ppm), plomo (Pb, 154-274 ppm), zinc (Zn, 301-484 ppm), y arsénico (As, 155-265 ppm). El contenido de estos elementos y la presencia de alteraciones argílica, potásica, filica y propilítica corroboran la presencia de yacimientos tipo Pórfido de cobre en la microcuenca 02 dentro de la subcuenca Antabamba.

4.2 Identificación de asociaciones geoquímicas significativas

Del análisis estadístico multivariado (apartado 3.4.1) y de índices mineralógicos (apartado 3.4.2) se concluyó la correlación estadística principalmente se da entre el cobre, plomo, zinc, arsénico, y que el índice de asociación geoquímica con mayor exactitud es el conformado por Cu-Mo-As-Pb-Zn. El índice mineralógico de asociación químico indica que las microcuencas de mayor potencial son la microcuenca 01 y microcuenca 02.

4.3 Integración de análisis geoquímico y geológico

De la caracterización geológica (apartado 3.1.1), estructural (3.1.2), metalogenia (apartado 3.1.3), y presencia de óxidos y arcillas (3.2.3), se concluye la correlación entre la presencia de intrusivos de composición tonalítica-diorítica del Paleógeno dado que se tienen yacimientos tipo Pórfido de cobre como Los Chancas, Antilla, y Haquira. Estos factores geológicos, estructuras, minas, y óxidos en conjunto con la información geoquímica indicarían que la subcuenca Antabamba tiene un alto potencial prospectivo.

4.4 Discusión de resultados de minerales

Finalmente, basado en los resultados del análisis geoquímico, asociaciones geoquímicas, caracterización geológica e identificación de alteraciones en trabajos de campo realizado se concluye que la microcuenca 02 (Figura52) tiene un alto potencial

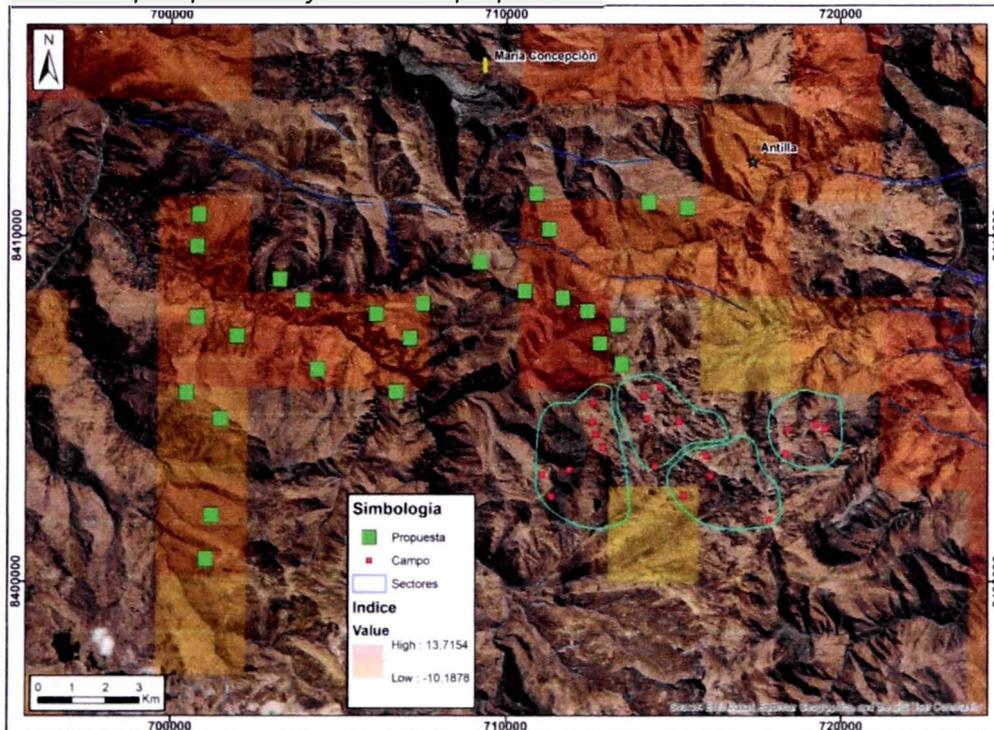
exploratorio dado la cantidad de muestras con valores anómalos, la mayor probabilidad por análisis de índices mineralógicos mediante una asociación geoquímica, la presencia de intrusivos de composición tonalítica, y alteraciones descritas en campo.

4.5 Propuesta ingenieril

Finalmente se proponen campañas exploratorias de mayor detalle dentro de las microcuencas 01 y 02, en las zonas más prospectivas de 10 km² detalladas en la Figura N° 52, en una campaña de campo de 14 días donde se tomarán un total de 26 muestras de roca intrusivas en las zonas altas de las microcuencas. A su vez en la Tabla 17 se detalla el presupuesto total y los servicios de estudios requeridos.

Figura 52

Mapa de zonas prospectivas y muestras propuestas.



Nota: elaboración propia mediante el software de programación estadística R y modificado con Adobe Illustrator

Tabla 17

Estudios a realizar y propuesta económica

Estudios	Presupuesto
Malla de muestreo y trabajos de Campo (14 días)	S/. 29 000
Análisis químicos 26 muestras	S/. 9 000
Procesamiento geoquímico	S/. 7 000
TOTAL	S/. 33 000

Conclusiones

El trabajo se ha desarrollado en la subcuenca Antabamba, realizando el análisis geoquímico de sedimentos de quebrada y trabajos de campo, determinando la relación entre el análisis por índices de asociación químico y la presencia de Pórfidos Cu-Mo.

Se determinó que la mineralización en la zona se encuentra asociada a cuerpos intrusivos de composición diorítica pertenecientes al Batolito de Andahuaylas-Yauri, a fallas de dirección NO-SE y E-O, y es del tipo Pórfido de cobre por las alteraciones argílica, potásica, filica y propilitica en la microcuenca 02.

Se ha determinado que la subcuenca Antabamba tiene un alto potencial prospectivo para encontrar un yacimiento tipo Pórfido de cobre dado que posee anomalías de cobre (Cu, promedio 133 ppm, valor máximo 2072 ppm), plomo (Pb, promedio 93 ppm, valor máximo 2614 ppm), zinc (Zn, promedio 204 ppm, valor máximo 1959 ppm), y arsénico (As, promedio 92 ppm, valor máximo 2175 ppm).

En la microcuenca 02 se identificaron anomalías geoquímicas de cobre (Cu, promedio 61 ppm, valor máximo 6408 ppm), plomo (Pb, promedio 34 ppm, valor máximo 2614 ppm), zinc (Zn, promedio 118 ppm, valor máximo 2420 ppm), y arsénico (As, promedio 45 ppm, valor máximo 2175 ppm), lo que indicaría que esta subdivisión tiene mayor probabilidad con respecto a toda la subcuenca Antabamba.

El índice de asociación química de As-Cu-Pb-Zn-Mo tiene el mayor ajuste dado que la mayor probabilidad coincide con los Pórfidos de cobre Los Chancas, Antilla, Trapiche, y La Yegua, e indica que la microcuenca 02 es la que tiene la mayor prospectividad.

Se ha confirmado la hipótesis general que señala que el uso de la geoquímica de sedimentos de quebrada mediante el cálculo de índices de asociación químico indicaría las zonas de mayor prospectividad para Pórfidos de cobre, y se podría replicar en zonas con características similares.

Recomendaciones

Se recomienda hacer una campaña exploratoria a mayor detalle en las microcuencas 01 y 02, dónde se han determinado mayor potencial prospectivo, por lo que se deben tomar muestras de rocas y estudios para determinar la fuente de mineralización dado que se encuentra en una zona de potencial económico, cuyo costo sería de S/.33 000 y 14 días.

Se recomienda aplicar los análisis estadísticos, geoquímicos y de índices mineralógicos en otras cuencas para tener una mayor precisión en la delimitación de clusters exploratorios mediante un lenguaje de programación para poder realizar los análisis de manera sistemática y optimizando el uso de los recursos existentes.

Se debe tomar en cuenta que las microcuencas planteadas de mayor potencial en la subcuenca Antabamba pueden coincidir con otras subcuencas en la Intercuenca Alto Apurímac dado que se encuentran en el entorno del Batolito Andahuaylas Yauri y por ende se podría tomar como una guía para la exploración de yacimientos minerales en esta zona

Referencias bibliográficas

- Amedjoe, C., Gawu, S., Arhin, E., & Adjei, P. (2016). *Integrating Geoscience Data for Delineating Potential Gold Targets-a Case Study from Sian Goldfields Limited, Ghana*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 12(9), 907-915.
- Ammar, H., Adve, R., Shahbazpanahi, S., & Boudreau, G. (2020). *Statistical analysis of downlink zero-forcing beamforming*. IEEE Wireless Communications Letters, 9(11), 1965-1969.
- Amor, S., Bloom, L., & Ward, P. (1998). *Practical Application of Exploration Geochemistry*, Prospectors and Developers Association of Canada.
- Ayuso, R., Barton, M., Blakely, R., Bodnar, R., Dilles, J., Gray, F., & Vikre, P. (2010). *Porphyry copper deposit model: chapter B in mineral deposit models for resource assessment* (No. 2010-5070-B). US Geological Survey.
- Bellido, E., y De Montreuil, L. (1972). *Aspectos generales de la metalogenia del Perú*- [Boletín B 1].
- Benavides, V. (1962). *Estratigrafía pre-terciaria de la región de Arequipa*. In: II Congreso Nacional de Geología, Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, v. 38, p. 5-63.
- Buenaventura S.A.A. (2021). *Memoria anual*.
- Cabrera, A., y Petersen, G. (1936). *Reconocimiento geológico de los yacimientos petrolíferos del departamento de Puno*. Boletín del Cuerpo de Ingenieros de Minas del Perú, v. 115, p.1-102.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., Carlier, G., Días-Martínez, E., Cerpa, L., Valderrama, P., y Robles, T. (2004). *Evolución tectónica y sedimentaria de la Cuenca Mitu (Pérmico – Triásico) de la región de Abancay – Cusco – Sicuani (Sur del Perú)*. XII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú 2004, Resúmenes Extendidos pp. 412-415.

- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., y Cueva, E. (2009). *Dominios geotectónicos y metalogénesis del Perú*. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, 103(1), 1-89.
- Carlotto, V., Acosta, H., Mamani, M., Cerpa, L., Rodríguez, R., Jaimes, F., y Chacaltana, C. (2010). *Los dominios geotectónicos del territorio peruano*.
- Chen, S. (2015). *Principal component analysis of geochemical data from the REE-rich maw zone, Athabasca Basin, Canada*. Ottawa, ON, Canada: Natural Resources Canada.
- Córdova, E. (1986). *Un bassin intramontagneux andin péruvien. Les Couches Rouges du bassin de Cuzco (Maastrichtien Paléocène)*. Thèse 3° Cycle, Université Pau, 272 p.
- Correa, J. (2020). *El rol de los backgrounds geoquímicos y mineralógicos locales, como información esencial para construir guías de calidad de sedimento eficientes, para cuencas de alta montaña alteradas hidrotermalmente (Río Mapocho, Chile Central)*.
- Dávila, D. (1988). Boletín N°40, *Geología del cuadrángulo de Cailloma (31-s)*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Dávila, D. (1991). Boletín N°41, *Geología del cuadrángulo de Pacapausa (30-p)*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Davis, J., & Sampson, R. (1986). *Statistics and data analysis in geology* (Vol. 646). New York: Wiley.
- Dentith, M., & Mudge, S. (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.
- Dunbar, C., & Newell, N. (1946). Marine Early Permian of the Central Andes and its Fusuline Faunas. *Amer. Jour. Sci.*, vol. 244, pp. 377-402, 457-491, pis. 1-12.
- Farahbakhsh, E., Chandra, R., Eslamkish, T., & Müller, R. (2019). *Modeling geochemical anomalies of stream sediment data through a weighted drainage catchment basin method for detecting porphyry Cu-Au mineralization*. *Journal of Geochemical Exploration*, 204, 12-32.
- Fauß, M., Zoubir, A., & Poor, H. (2021). *Minimax robust detection: Classic results and recent advances*. *IEEE Transactions on signal Processing*, 69, 2252-2283.

- First-Quantum Minerals. (2021). *Annual report*.
- Franco-Nevada Corp. Ltd. (2022). *Annual Information Form*.
- Gozalvez, M., Ramallo, E., Bercheñi, V., Godeas, M., Segal, S., Crosta, S., y Castro, S. (2016). *Carta Minero-Metalogenética 2366-III Susques*. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Guevara, C., y Dávila, D. (1983). *Estratigrafía y tectónica terciaria del área de Cora Cora–Pacapausa*.
- Gessner, K., Blenkinsop, T., & Sorjonen-Ward, P. (2018). *Characterization of ore-forming systems—advances and challenges*. Geological Society, London, *Special Publications*, 453(1), 1-6.
- Grunsky, E., & Caritat, P. (2020). *State-of-the-art analysis of geochemical data for mineral exploration*. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 20(2), 217-232.
- Haldar, S. (2018). *Mineral exploration: principles and applications*. Elsevier.
- Helba, H., El-Makky, A., & Khalil, K. (2021). *Application of the CN fractal model, factor analysis and geochemical mineralization probability index (GMPI) for delineating geochemical anomalies related to a Mn-Fe deposit and associated Cu mineralization in west-central Sinai, Egypt*. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 21(3), geochem2021-031.
- Huanacuni, D. (2009). *Recursos minerales de la provincia de Antabamba del departamento de Apurímac*. Resumen. INGEMMET.
- Jenks, W. (1948). *Geología de la hoja de Arequipa al 200,000*. *Geology of the Arequipa Quadrangle of the Carta Nacional del Peru*. Instituto Geológico del Perú, Boletín 9, 204 p.
- Jöreskog, K., & Sörbom, D. (1996). *LISREL 8: User's reference guide*. Scientific Software International.
- Jackson, J. (2003). *A user's guide to principal components*. John Wiley & Sons.

- Johnson, G., Ehrlich, R., Full, W., & Ramos, S. (2015). *Principal components analysis and receptor models in environmental forensics*. In Introduction to environmental forensics (pp. 609-653). Academic Press.
- Lepeltier, C. (1969). *A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation*.
- McCullagh, P. (2002). *What is a statistical model?* The Annals of Statistics, 30(5), 1225-1310.
- Marjoribanks, R. (2010). *Geological methods in mineral exploration and mining*. Springer Science & Business Media.
- MINEM. (2022). *Boletín estadístico minero*, Edición N°01, ESTAMIN, enero del 2022.
- Mohammadi, M., & Rezaei, J. (2020). *Bayesian best-worst method: A probabilistic group decision making model*. Omega, 96, 102075.
- Marocco, R. (1975). *Boletín N°27, Geología de los cuadrángulos de Andahuaylas (28-p), Abancay (28-q) y Cotabambas (28-r)*. Instituto de Geología y Minería.
- Newell, N. (1945). *"Investigaciones Geológicas de las zonas circunvecinas al Lago Titicaca"*. Bol Soc. Geol. del Perú. Tomo 18.
- Newell, D., Roberts, T., & Chronic J. (1949). *Upper Paleozoic of Peru*. New York: Geological Society of América, 1953. 276 p.
- Norbert, B. (2020). *Rejoinder on: Tests for multivariate normality—a critical review with emphasis on weighted L2-statistics*.
- Okada, K. (2021). *A historical overview of the past three decades of mineral exploration technology*. Natural Resources Research, 30, 2839-2860.
- Olade, M. (2021). *Mineral deposits and exploration potential of Nigeria*. Prescott books.
- Palacios, O. (1994). *Boletín N°51, Geología de los cuadrángulos de Chulca (30-q) y Cayarani (30-r)*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Parsa, M., Maghsoudi, A., Yousefi, M., & Carranza, E. (2017). *Multifractal interpolation and spectrum—area fractal modeling of stream sediment geochemical data: Implications for mapping exploration targets*. Journal of African Earth Sciences, 128, 5-15.

- Pearson, K. (1901). *LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space*. The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science, 2(11),559-572.
- Pecho, V. (1981). Boletín N°35, *Geología de los cuadrángulos de Chalhuanca (29-p), Antabamba (29-q) y Santo Tomas (29-r)*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Perelló, J., Carlotto, V., Zárate, A., Ramos, P., Posso, H., Neyra, C., & Muhr, R. (2003). *Porphyry-style alteration and mineralization of the middle Eocene to early Oligocene Andahuaylas-Yauri belt, Cuzco region, Peru*. Economic Geology, 98(8), 1575-1605.
- Pohl, W. (2022). *Metallogenic models as the key to successful exploration—a review and trends*. Mineral economics, 35(3-4), 373-408.
- Ramalle-Gómara, E., y De Llano, J. (2003). *Utilización de Métodos Robustos en la Estadística Inferencial*.
- Rivera, R. (2009). *Alcances metalogenéticos de los Pórfidos de Au-Cu-Mo y sus relaciones en la exploración minera (Región Cajamarca) (TT-160)*.
- Rivera, R., y Condori, N. (2010). *El uso de la geoquímica regional para localizar provincias metalogenéticas "una visión para la exploración minera"*.
- Rivera R., Acosta, J., Heo, C., Ryoo, C., Bustamante, A., Villarreal, E., y Santisteban, A. (2011). *Metalogenia del Batolito Andahuaylas–Yauri y sus implicancias en la exploración pórfidos Cu–Au*.
- Sánchez, A. (1995). *Geología de los cuadrángulos de Bagua Grande (12-g), Jumbilla (12-h), Lonya Grande (13-g), Chachapoyas (13-h), Rioja (13-i), Leimebamba (14-h) y Bolivar (15-h)*. INGEMMET, Boletines, Serie A: Carta Geológica Nacional, v. 56, 287 p.
- Sánchez, J., Lagos, A., y Surco, C. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Puquio (30-ñ), Santa Ana (29-ñ), Chaviña (30-o) y Querobamba (29-o)*. Serie A: carta Geológica, INGEMMET, 68 p. Lima-Perú.
- Sánchez, A., Mendoza, C., Mendoza, N., y Puig, C. (2015). *Nuevas tipologías de yacimientos con interés económico en el departamento de Apurímac asociados al*

batolito de Andahuaylas-Yauri: el caso de Tumipampa. Sociedad Geológica del Perú.

Sempere, T., Acosta, H., y Carlotto, V. (2004). *Estratigrafía del Mesozoico y Paleógeno al norte del Lago Titicaca. Nuevas contribuciones del IRD y sus contrapartes al conocimiento geológico del sur del Perú*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, Publicación Especial, 5, p. 81-103 p.

Shevlyakov, G., Andrea, K., Choudur, L., Smirnov, P., Ulanov, A., & Vassilieva, N. (2013). *Robust versions of the Tukey boxplot with their application to detection of outliers*. In 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (pp. 6506-6510). IEEE.

Sillitoe, R. (2010). *Porphyry copper systems*. *Economic geology*, 105(1), 3-41.

Sillitoe, R. (1995). *Exploration of porphyry copper lithocaps*. PACRIM'95, Bali, p. 527-532.

Tabelin, C., Park, I., Phengsaart, T., Jeon, S., Villacorte-Tabelin, M., Alonzo, D., & Hiroyoshi, N. (2021). *Copper and critical metals production from porphyry ores and E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental aspects, and sustainability issues*. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105610.

Tukey, J. (1993). *Exploratory data analysis: past, present and future*. Defense Technical Information Center.

Turel, A. (2012). *Interpretación Geoquímica de los Datos Multielemento de Sedimentos de Corriente de la Carta La Quiaca (1: 250.000)*.

Valencia, M., Santisteban, A., Marchena, A., y León, W. (2021). *Características geológicas y geoquímicas de los depósitos minerales de la faja magmática cretáceo-paleógena entre Huancavelica y Tacna-bloque norte-[Boletín B 72]*.

Vicente, J. (1981). *Elementos de la estratigrafía mesozoica Sur-peruana. Cuencas sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur*, Buenos Aires, t. 1, p. 319- 351.

- Wang, J., & Zuo, R. (2020). *Assessing geochemical anomalies using geographically weighted lasso*. *Applied Geochemistry*, 119, 104668.
- White, W. (2005). *Geochemistry*. John Wiley & Sons.
- Williamson, D., Parker, R., & Kendrick, J. (1989). *The box plot: a simple visual method to interpret data*. *Annals of internal medicine*, 110(11), 916-921.
- Wilson, J. (1963). *Cretaceous Stratigraphy of Central Andes of Peru*. Bol AAPG.
- Wold, S., Esbensen, K., & Geladi, P. (1987). *Principal component analysis*. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 2(1-3), 37-52.
- Yousefi, M. (2017). *Analysis of zoning pattern of geochemical indicators for targeting of porphyry-Cu mineralization: a pixel-based mapping approach*. *Natural Resources Research*, 26, 429-441.
- Zuo, R., & Xiong, Y. (2020). *Geodata science and geochemical mapping*. *Journal of Geochemical Exploration*, 209, 106431.