Re-interpretación geoquímica de la Faja Metalogenética de Pórfido Cu-Mo-Au del Mioceno (Ecuador)

Geochemical re-interpretation of the Miocene Porphyry Cu-Mo-Au Metallogenic Belt (Ecuador)

Washington Lomas Zumba¹, Fernanda Andrade Mantilla¹, Pablo Cobacango Flores¹ Santiago David Santamaría Freire²

- Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito Ecuador. E-mail: washington.lomas@geoenergia.gob.ec, fernanda.andrade@geoenergia.gob.ec, pablo.cobacango@geoenergia.gob.ec
- Escuela de Ciencias de la Tierra, Energía y Ambiente, Universidad Yachay Tech. Quito-Ecuador. E-mail: ssantamaria@yachaytech.edu.ec

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 20-06-2023 Fecha de aceptación: 28-03-2024

Resumen

El Proyecto Investigación Geológica y Disponibilidad de Ocurrencias de Recursos Minerales en el Territorio Ecuatoriano tiene el objetivo de identificar ocurrencias minerales, mediante el procesamiento de información geoquímica de sedimentos fluviales activos. La presente investigación muestra los resultados de reinterpretación de geoquímica de sedimentos fluviales activos en la faja metalogenética de "Pórfido Cu-Mo-Au del Mioceno" del Ecuador. Estos datos permitieron identificar áreas anómalas mediante el análisis espacial de concentraciones de metales preciosos, oro y plata, metales base cobre y zinc; mediante un Análisis Exploratorio de Datos Espaciales, donde se identificaron zonas anómalas de cobre y zinc que pudieran estar relacionadas con posibles pórfidos en la Cordillera Occidental que podrían utilizarse como objetivos para campañas de exploración más detallada.

Palabras clave: Ecuador, Geoquímica, Geoestadística, Pórfido, Epitermal.

Abstract

The Geological Investigation and Availability of Mineral Resource Occurrences in the Ecuadorian Territory Project has the objective of identifying mineral occurrences by processing geochemical information of active fluvial sediments. This research shows the results of geochemical reinterpretation of active fluvial sediments in the "Miocene Porphyry Cu-Mo-Au" metallogenic belt of Ecuador. These data allowed the identification of anomalous areas through the spatial analysis of concentrations of precious metals gold and silver, base metals copper and zinc; through an Exploratory Spatial Data Analysis, where anomalous copper and zinc zones were identified that could be related to possible porphyries in the Western Cordillera that could be used as targets for more detailed exploration campaigns.

Keywords: Ecuador, Geochemistry, Geostatistics, Porphyry, Epithermal.

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que el 90 % de las reservas de cobre de los Andes Centrales y del Sur se encuentran contenidas en tres cinturones cenozoicos: El primero ocurrido entre el Paleoceno al Eoceno (66-52 Ma), el segundo entre el Eoceno Superior al Oligoceno Inferior (42-31 Ma) y el tercero entre el Mioceno Medio al Plioceno Inferior (16-5 Ma). El tercer cinturón (Mioceno Medio-Plioceno Inferior), que se extiende desde Perú hasta Chile tiene su equivalente en nuestro país en la faja de pórfidos Cu-Mo-Au del Mioceno definida por el IIGE en el Mapa Metalogenético del 2019 [1].

En Ecuador, esta faja se presenta como seis zonas, la mayoría de estas se localizan sobre el terreno Piñón-Pallatanga en la Cordillera Occidental, en tanto que, el cuerpo más pequeño y austral se encuentra sobre el terreno litotectónico Loja, limitado al este por la falla Sabanilla (Figura 1); en este cinturón se han identificado depósitos tipo pórfidos y epitermales [2].

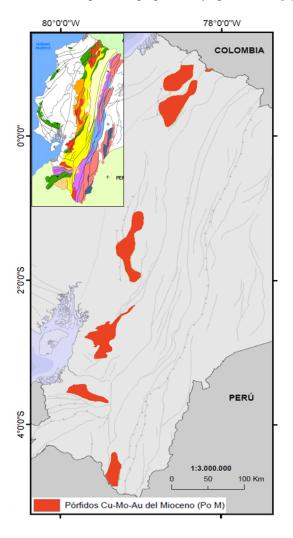


Figura 1: Faja metalogenética de Pórfido Cu – Mo – Au del Mioceno (Po-M). Modificado del Mapa Metalogenético del Ecuador 1M [2].

En el año 1964, se inició el levantamiento de datos geoquímicos en Ecuador, como parte del Programa de Desarrollo de la Naciones Unidas - Operación 8, realizándose la primera campaña de exploración geoquímica con la recolección de sedimentos fluviales en la parte sur occidental del país, dentro de las provincias de Loja, El Oro y Azuay. Posterior a Operación 8, la Dirección General de Geología y Minas con la Asistencia Técnica del Gobierno de Bélgica ejecutó el Proyecto Noroccidente, orientado a las provincias de Carchi, Imbabura y parte de Esmeraldas. En el periodo entre 1998 a 2000, se desarrollaron trabajos de geoquímica de sedimentos fluviales realizados por la Corporación de Desarrollo e Investigación Geológico Minero Metalúrgica (Codigemm) con la Misión Británica, estos estudios cubrieron un área de 41.903 km² de la Cordillera Occidental [3].

El Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), desde el año 2014 a través del Proyecto de "Investigación Geológica y Disponibilidad de Ocurrencias de Recursos Minerales en el Territorio Ecuatoriano", busca promover el desarrollo sostenible y sustentable de los recursos minerales. Dentro de esta fase el IIGE desarrolla el muestreo sistemático de sedimentos fluviales activos y rocas; determinación de ambientes geológicos y distribución espacial de las principales ocurrencias minerales; mapas de fajas metalogenéticas; definición de zonas anómalas para cada uno de los elementos químicos; y, Mapa de rocas y minerales industriales.

Tomando en cuenta la existencia de nuevos datos geoquímicos y, habiendo la necesidad de realizar nuevas exploraciones geológicas en Ecuador, se propuso realizar la reinterpretación de todos los datos geoquímicos del país; en este sentido, la presente investigación pretende identificar nuevas anomalías de elementos químicos en la Faja Metalogenética de Pórfido Cu – Mo – Au del Mioceno (Po-M), que sirva como guía para futuras exploraciones de posibles nuevos depósitos minerales.

2. DESARROLLO

La información recopilada en orden sistemático por el IIGE hasta el año 2019, se obtuvo a partir de la unificación de los resultados de los análisis geoquímicos de los proyecto de cooperación realizados por las entidades antecesoras del IIGE (Proyecto De Desarrollo Minero Y Control Ambiental - **PRODEMINCA**, Rio Tinto Zinc - **RTZ**, Naciones Unidas – **NN.UU.** y Proyecto Modelo Piloto para la determinación del potencial geológico- mineralógico de las zonas Zaruma Y Cariamanga - **SENESCYT**), que en conjunto cubren las áreas de la Cordillera

Occidental, Complejo Metamórfico El Oro, Cuenca Puyango - Tumbes, Cuenca Alamor y parte sur de la Cordillera Real entre las latitudes 1°N y 5°S. Figura 2 [4].

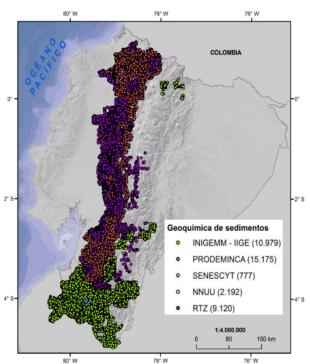


Figura 2: Ubicación de los puntos de control de las muestras de sedimentos fluviales recopiladas hasta el año 2019 [4].

En la Tabla 1, se muestra un resumen general del número de muestras recopiladas por Institución o Proyecto hasta el año 2019.

Tabla 1: Muestras de sedimentos fluviales disponibles hasta el año 2019.

INSTITUCION o PROYECTO	Número de muestras	
INIGEMM (Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico) – IIGE.	10 979	
NN.UU. (Naciones Unidas) Proyecto Operación 8.	2 192	
PRODEMINCA (Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental).	15 175	
RTZ (Consorcio Río Tinto Zinc).	9 120	
SENESCYT (Proyecto del INIGEMM, financiado por SENESCYT).	777	

Para esta reinterpretación se utilizó la base de datos con los resultados de los análisis geoquímicos de 4 979 muestras de sedimentos fluviales localizadas en la faja Po-M, para identificar áreas anómalas mediante el análisis de la distribución espacial de los elementos oro (Au), plata (Ag), cobre (Cu) y Zinc (Zn) [4] [5] [6] [7] [8].

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO

Previo a su análisis, a los resultados se les realizó un proceso de control de calidad a fin de validar y analizar eficazmente los estándares, replicados, duplicados y blancos de la data, para asegurar que se encuentren dentro de los límites aceptables, antes de ser parte de un análisis geoestadístico.

El control de calidad se realizó mediante diagramas de dispersión cuyo análisis estadístico permitió estudiar las relaciones entre los resultados de laboratorio de las muestras originales y réplicas; confirmando relaciones anticipadas entre dos conjuntos asociados de datos [9].

El control de calidad realizado a los elementos Au, Cu, y Zn indica que la mayoría presenta un coeficiente de correlación (R) mayor a 0.5 indicando que las correlaciones son aceptables [4].

La primera etapa del análisis estadístico corresponde al Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE), el cual permite identificar valores extremos, distribución, variabilidad, localización y correlación de los datos para establecer la validez de aplicación de la teoría geoestadística y el procedimiento de predicción más conveniente [4].

En la segunda etapa se interpolaron los valores geoquímicos por medio de la técnica kriging, para lo cual, se utilizó algunos métodos de interpolación como el Kriging Ordinario, Simple y Universal; para esto, se requiere que los datos se ajusten a una distribución normal, para lo que se realizaron transformaciones como: logaritmo neperiano, raíz cuadrada (box-cox) y arcoseno. Su elección depende del grado de asimetría y ubicación de los valores extremos de la curva [4].

La estadística descriptiva utilizada permitió visualizar y entender la variabilidad, distribución y correlación espacial de los datos químicos, lo cual se identificó utilizando histogramas de frecuencia y gráficos de tendencia de datos [4].

Para comprobar si la variable en estudio posee una distribución normal, se aplicó pruebas de normalidad con respecto a varios factores como media, mediana, moda, coeficiente de variación y coeficiente de sesgo, para asegurar un análisis geoestadístico óptimo. Las variables en este tipo de análisis suele mostrar una distribución normal (Campana de Gauss) [4].

En relación a los datos atípicos (outliers) que tienden a distorsionar los resultados del análisis, se los identificó usando gráficos sencillos como histogramas o diagramas boxplot [4].

Para predecir valores en lugares no muestreados, se usó los métodos de validación y la validación cruzada. Para verificar la calidad de un mapa interpolado debe utilizarse un conjunto de validación formado por una serie de puntos de muestreo en los que se va a hacer una estimación de dicho valor real. La diferencia entre el valor medido y el estimado es el error de estimación en ese punto. De este modo a cada punto de validación se asigna un error. El procedimiento de validación cruzada consiste en la estimación del valor de la variable, con el procedimiento de interpolación que quiere validarse, en cada uno de los puntos de muestreo, aunque sin incluir dicho punto de muestro. De esta manera se conoce para cada punto de muestreo tanto el valor real como el valor estimado de forma que puede llevarse a cabo el análisis estadístico de errores.

3. RESULTADOS

Para la faja Po-M, los parámetros estadísticos obtenidos (Tabla 2), demuestran que los valores de la media, mediana y moda en los elementos Ag, Au, Cu y Zn no son similares.

Tabla 2: Medidas estadísticas de los elementos Ag, Au, Cu y

Zn.				
Parámetros Estadísticos	Ag Au		Cu	Zn
	ppm	ppm	ppm	ppm
Datos Analizados	3750,000	4979,000	4964,000	4969,000
Mínimo	0,660	0,004	1,00	1,000
Máximo	83,150	9,446	965,00	984,610
Media	1,290	0,356	51,949	66,589
Moda	0,660	0,333	25,000	7,000
Mediana	0,660	0,333	35,00	59,000
Varianza	12,604	0,129	4348,377	3923,001
Desviación Estándar.	3,550	0,359	65,942	62,634
25 percentil	0,660	0,130	19,000	34,000
75 percentil	0,660	0,400	62,000	83,000
Coeficiente de Sesgo	13,238	8,570	5,599	5,163
Curtosis	10749,54	-14270,87	3371,381	-3168,99
Geom. mean	0,822	0,271	32,145	46,269
Coeficiente. de Variación %	275,164	100,841	126,937	94,060

Así también, el coeficiente de sesgo es mayor a 0 en los elementos mencionados, esto se ilustra en los histogramas de frecuencia que presentan asimetría positiva como se observa en la Figura 3.

El coeficiente de variación para todos los elementos es mayor a 90 %, indicando que los valores extremos tienen fuerte influencia en la estadística; para evitar esta, es necesario realizar una transformación de tipo logaritmo de base 10 para todos los elementos, con el objetivo de que la distribución de los mismos sea normal.

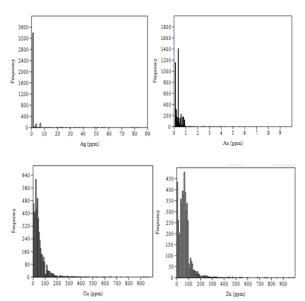


Figura 3: Histogramas de frecuencias de Ag, Au, Cu y Zn.

3.1 MEDIDAS ESTADÍSTICAS DE DATOS TRANSFORMADOS

Con las medidas estadísticas de los datos transformados (Tabla 3), se evidencia que la media, mediana y moda de todos los elementos tienen valores similares con pequeñas variaciones en los valores.

Tabla 3: Medidas estadísticas de los elementos transformados a logaritmo.

Parámetros	Ag	Au	Cu	Zn
Estadísticos	log	log	log	log
Datos Analizados	3750,00	4979,00	4964,00	4969,00
Mínimo	-0,18	-2,40	0	0
Máximo	1,92	0,98	2,98	2,99
Media	-0,09	-0,57	1,51	1,67
Moda	-0,18	-0,48	1,40	0,85
Mediana	-0,18	-0,48	1,54	1,77
Varianza	0,08	0,10	0,21	0,18
Desviación Estándar.	0,27	0,31	0,45	0,42
25 percentil	-0,18	-0,89	1,28	1,53
75 percentil	-0,18	-0,40	17,92	1,92
Coeficiente de Sesgo	3,35	0,14	-0,59	-1,13
Curtosis	700,25	-292,36	250,88	-292,15
Geom. mean	0	0	0	0
Coeficiente. de Variación %	321,59	55,32	30,06	25,50

El coeficiente de variación (CV) mejora ampliamente respecto a los datos originales, con excepción del Ag, cuyos valores son superiores a 240 % debido al gran número de muestras con concentraciones bajas de este elemento. El CV oscila para el resto de los elementos

entre 25 % y 92 %, lo que indica que los datos extremos no presentan una fuerte influencia.

Los histogramas de frecuencia de los datos transformados mostrados (Fig. 4) se aproximan a una distribución normal.

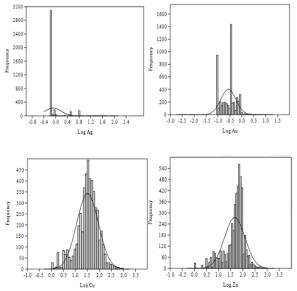


Figura 4: Histogramas de frecuencias de Ag, Au, Cu y Zn transformados a logaritmo.

Para todos los elementos, las curvas son leptocúrticas, es decir, presentan un elevado grado de concentración alrededor de los valores centrales de las variables, con asimetría positiva. El histograma para Au presenta dos familias de datos en su distribución, esto se debe a la gran cantidad de datos con baja concentración.

3.2 TENDENCIA DE LOS DATOS

El análisis de tendencia proporciona gráficos en tres dimensiones que ayudan a identificar tendencias globales de los datos en función de la longitud y latitud, para plantear un modelo de comportamiento de las variables. Este análisis ayuda a establecer la mejor dirección de correlación.

En la Figura 5 se puede observar la tendencia de los valores para Ag y Au, los cuales indican un aumento en dirección suroeste, mientras que el Cu y Zn presentan valores crecientes hacia la parte noreste, el comportamiento de estas curvas de valores se las considera anisotrópico, por no presentar una tendencia regular.

3.3 MODELO GEOESTADÍSTICO

En la Tabla 4, se indican los modelos utilizados para la faja **Po-M**, en donde el modelo Gaussiano se ajusta para los elementos Ag y Au. El modelo exponencial fue utilizado para los elementos Cu y Zn, (Figura 6). Los variogramas presentan un rango promedio de 42 074 m, distancia en la que se estabiliza la curva. En relación

al efecto pepita (Nugget) se observa que para todos los elementos no superan el 50 % de la meseta (Sill) lo que indica que no existe mayores errores en la toma de datos.

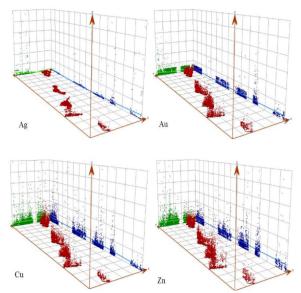


Figura 5: Gráficos de tendencia de datos para los elementos Ag, Au, Cu, y Zn.

Tabla 4: Parámetros de los modelos de Semivariogramas.

Elemento	Ag	Au	Cu	Zn
Modelo	Gaussiano	Gaussiano	Exponencial	Exponencial
Partial Sill	1,000	1,090	0,650	0,710
Nugget	0,005	0,160	0,180	0,150
Sill	1,005	1,250	0,830	0,860
Lag Zise	2,898	2,757	2947	1967
Anisotropía (°)	49	88	52	20
Rango (m)	8	55	6000	5500

3.4 VALIDACIÓN DE LA INTERPOLACIÓN

Para este análisis se realizó una validación cruzada, donde se identificó que las dos curvas (Semivariogramas experimentales y Semivariograma teórico) presentan variación en su pendiente debido a que existen errores en su predicción. Se evidenció que el error medio estandarizado para todos los elementos se acerca a cero, mientras que el desvío del error cuadrático medio para los elementos Cu y Zn presentan valores altos (61 881, 59 673, respectivamente), al igual que su desviación cuadrática media estandarizada (2 523, 2 182, respectivamente).

Los valores altos pueden ser originados por diferentes factores como la gran cantidad de datos que existe en esta faja metalogenética o a la falta de restricción de datos con valores altos, sin embargo, estos valores son aceptables con ciertas incertidumbres, que a continuación se muestra en la Figura 6.

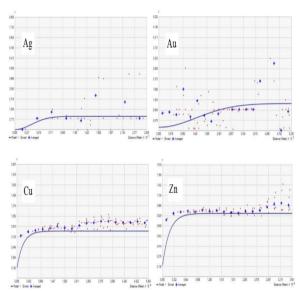


Figura 6: Semivariogramas experimentales (cruces azules) ajustados al semivariograma teórico (línea azul) de los elementos Ag, Au, Cu y Zn.

3.5 ANÁLISIS POR ELEMENTOS

La correlación de Pearson para los elementos que se presenta en la tabla 5, refleja que existe dos asociaciones minerales que tienen más presencia en esta faja metalogenética. La primera es la de oro- cobre (Au-Cu) que tiene la correlación más fuerte y se aproxima a 1; la segunda es cobre-zinc-plata (Cu-Zn-Ag) cuya relación promedio esta en 0,6. Estas correlaciones también se pueden ver en el análisis de correspondencias entre cobre y oro, y una cercana entre Zn y Au (Figura 7); los elementos con menor relación se ubican en la parte externa y conciernen a cobre y plata.

Las asociaciones identificadas podrían estar relacionadas a depósitos minerales tipo pórfido, epitermales y depósitos polimetálicos.

Tabla 5: Correlación de Pearson de los elementos Ag, Au, Cu y Zn.

	Ag (ppm)	Au (ppm)	Cu(ppm)
Ag (ppm)			
Au (ppm)	0,4458		
Cu (ppm)	0,57694	0,99921	
Zn (ppm)	0,64229	0,42993	0,73061

El análisis de los valores para los elementos obtenidos del (AEDE) fueron procesados en el software ArcGIS por el método geoestadístico Kriging, de lo cual se obtuvo como resultado mapas a nivel regional donde se identificaron gráficamente las concentraciones más altas en color rojo hasta las de menor concentración en color verde, en este documento se muestran los resultados del análisis para los elementos cobre (Cu) y zinc (Zn) que dieron resultados óptimos, utilizando este método de reinterpretación.

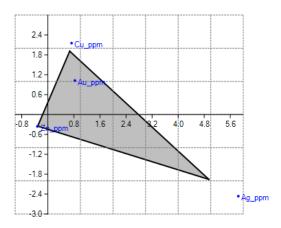


Figura 7: Análisis de correspondencia de los elementos Ag, Au, Cu y Zn.

La presencia de zonas anómalas de cobre (Cu) en la faja Po -M, coincide en los sectores ya conocidos como García Moreno (Llurimahua), Luis Vargas Torres, 6 de Julio, Cuellaje, Lita (Ibarra). Las concentraciones más altas de anomalías de Cu son los sectores de Simiatug y Salinas (cantón Guaranda), Balsapamba (cantón San Miguel), Caluma y Chillanes (provincia de Bolívar) como se muestra en la Figura 8.

Las anomalías de zinc (Zn) en la **faja Po-M**, se pueden observar en las parroquias de Lita, García Moreno (Llurimahua), Alto Tambo (San Lorenzo), Pacha, Chilla, Bella María (Santa Rosa) y Mulluncay Grande (Zaruma), como se muestra en la Figura 9.

4. DISCUSIÓN

Los resultados de la reinterpretación permitieron identificar zonas de concentraciones anómalas de Cu y Zn, las que en su mayoría son zonas con trabajos de exploración avanzados y que son correlacionales con la geología y mineralización de la faja metalogenética de Pórfido Cu-Mo-Au del Mioceno (Po M).

Las asociaciones mineralógicas identificadas coinciden con algunos depósitos que se encuentran sobre esta faja metalogenética, lo que indicaría la existencia de otros tipos de depósitos como epitermales o polimetálicos, pero es necesario realizar el análisis con más elementos para definir con mejor precisión esas asociaciones y sectorizar posibles zonas de exploración.

De la interpolación realizada se evidencia que algunos de los sectores anómalos coinciden con zonas ya concesionadas y en los cuales se encuentran algunos proyectos importantes del país; sin embargo, existen otros tipos de depósitos como por ejemplo, epitermales que no se han podido identificar en esta reinterpretación ya que el mapa de Au y Ag no dio mayores zonas con valores altos interesantes.

Por la escala de trabajo, regional, es muy probable que algunos depósitos no puedan ser tan apreciables; en este sentido, la reinterpretación debería sectorizarse para tener mejores resultados y adicional, aumentar el número de elementos para este análisis.

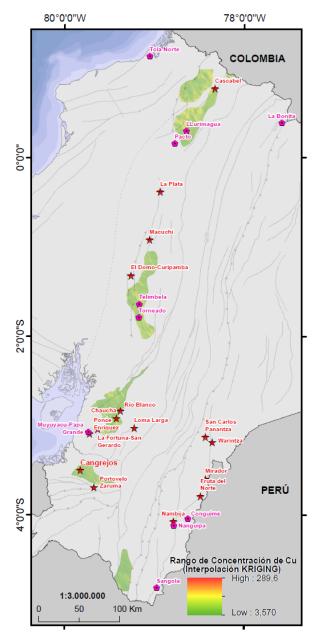


Figura 8: Mapa de anomalías de Cu, en la faja metalogenética de Pórfido Cu – Mo – Au del Mioceno (Po M) [4]

Sin embargo, a pesar de las dificultades encontradas, se han identificado posibles sectores anómalos que podrían tener trabajos de exploración para confirmar o no, la eficacia de este método de reinterpretación.

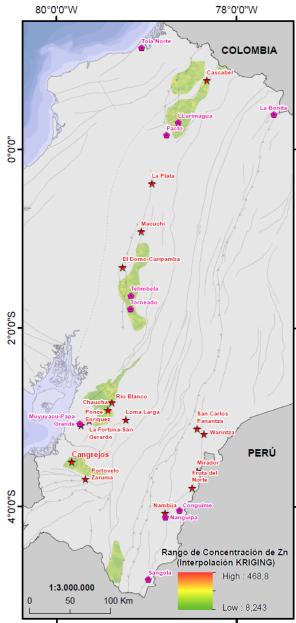


Figura 9: Mapa de anomalías de Zn, en la faja metalogenética de Pórfidos Cu – Mo – Au del Mioceno (Po M) [4]

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron definir anomalías geoquímicas de Cu y Zn, correlaciónales con la geología y mineralización de la Faja de Pórfidos Cu-Mo-Au del Mioceno (Po M). Además de correlaciones geoquímicas de oro-cobre (Au-Cu), que es la más fuerte y se aproxima a 1; la segunda, es cobre-zinc-plata (Cu-Zn-Ag), cuya relación promedio es de 0,6. Así, las asociaciones identificadas podrían estar relacionadas a depósitos minerales tipo pórfido, epitermales y depósitos polimetálicos.

Es necesario realizar un análisis completo con la mayoría de elementos químicos para definir con mejor certeza las asociaciones mineralógicas y con esto identificar los diferentes depósitos asociados a esta faja metalogenética.

Al ser un análisis regional con 4 elementos se lo debe tomar como guía para la exploración, considerando que puede tener algunas mejoras metodológicas si se incluye un mayor número de elementos.

De los resultados obtenidos se evidencia que algunos de los sectores anómalos coinciden con zonas concesionadas, donde se desarrollan algunos proyectos importantes del país. Sin embargo, existen zonas libres de concesión y en las cuales a futuro se pueden definir nuevas áreas de exploración.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Schutte, «"Geochronology, Geochemistry and Isotopic Composition (Sr, Nd, Pb) of Tertiary Porphyry Systems in Ecuador", Tesis, Universidad de Ginebra,,» 2010.
- [2] IIGE, «"Mapa Metalogenético del Ecuador 1M",» 2019.
- [3] MERNNR, «"Plan Nacional de Desarrollo del Sector Minero 2020-2030",,» 2020.
- [4] IIGE, «"Informe Técnico Hito 193",» 2019.
- [5] DINAGE-BGS, «"Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador. Depósitos porfídicos y epi-mesotermales relacionados con intrusiones de las Cordilleras Occidental y Real"," 2000.
- [6] Maller-Kahle, «Exploración geoquímica sistemática – Operación 8: Noroccidente de la Provincia del Azuay y los sectores de Fierro Urco y Chaucha.,,» 1971.
- [7] CODIGEM-RTZ, «Geoquímica de 9120 puntos de muestreo con análisis para 28 elementos.,» 1986.
- [8] INIGEMM-SENESCYT, «Proyecto Modelo Piloto para la determinación de Potencial Geológico- Mineralógico de las zonas Zaruma y Cariamanga escala 1: 100 000,» 2013.
- [9] Vásquez, «"Cartografía Geoquímica multielemental de sedimentos fluviales. Aplicación al análisis del potencial metalogénico de la zona de Macará (escala 1:100 000)", Tesis, UCE,,» 2017.