

Caracterización Geoquímica del Elemento Zinc en la Mina Toquepala y sus implicancias en el tratamiento metalúrgico

Geochemical Characterization of the Zinc Element in the Toquepala Mine and its implications in the metallurgical treatment

Diego Cossío Sánchez¹, Hugo Rivera Mantilla²

Recibido: 30/01/2017 - Aprobado: Diciembre 2015

RESUMEN

La investigación basada en las implicancias del zinc en el tratamiento metalúrgico del cobre en la Mina Toquepala, inherentes a este tipo de yacimiento, se basó en el conocimiento de las características y comportamiento geoquímico del zinc y los elementos Cu-Mo-Fe-As-Pb, partiendo de la definición de dominios geológicos basados a los dominios de litología, alteración, mineralización y presencia de yeso, llegando a determinar que las características geoquímicas son diferentes en cada dominio geológico resultando más favorables en la concentración y recuperación del cobre, los dominios geológicos de bajo contenido en los elementos zinc, hierro, arsénico y plomo, y además con presencia de contenidos de yeso/anhidrita. La correcta determinación de los parámetros de la estadística descriptiva de los elementos Zn-Cu-Mo-Fe-As-Pb es fundamental para poder caracterizar los dominios y realizar una óptima clasificación del material geológico para su envío a la planta metalúrgica. El conocimiento de la distribución espacial del zinc y los elementos Cu-Mo-Fe-As-Pb brinda una visión más amplia de la ubicación de las zonas de mayor concentración de cada elemento para así realizar una mejor estimación de recursos mineros.

Palabras clave: Caracterización geoquímica Cu-Mo. Dominios geológicos, dominios estadísticos geoquímicos, distribución espacial, Mina Toquepala

ABSTRACT

The investigation based on the implications of zinc in the metallurgical treatment of copper in the Toquepala Mine, present in this type of deposit, was based on the knowledge of the characteristics and geochemical behavior of zinc and Cu-Mo-Fe-As-Pb, starting from the definition of geological domains based on the domains of lithology, alteration, mineralization and presence of gypsum, arriving to determine that the geochemical characteristics are different in each geological domain, being more favorable in the concentration and recovery of copper, domains Geological characteristics of low zinc, iron, arsenic and lead elements, and also with the presence of gypsum / anhydrite contents. The correct determination of the parameters of the descriptive statistics of the elements Zn-Cu-Mo-Fe-As-Pb is fundamental to be able to characterize the domains and to make an optimal classification of the geological material for its shipment to the metallurgical plant.

¹ Egresado EAP Ingeniería Geológica UNMSM. Email: diegocossio92@gmail.com

² Docente UNMSM. Email: hriverram@unmsm.edu.pe

The knowledge of the spatial distribution of the zinc and the Cu-Mo-Fe-As-Pb elements gives a broader view of the location of the zones of greater concentration of each element in order to make a better estimation of mining resources.

Keyword: Cu-Mo geochemical characterization. Geological domains, geochemical statistical domains, spatial distribution, Toquepala Mine

I. INTRODUCCIÓN

El alcance de la presente investigación involucra el tratamiento estadístico y graficación de los valores de los elementos Zn-Cu-Mo-Fe-As-Pb y el análisis geológico del logeo de los testigos de la perforación para determinar los dominios geológicos que existen en la Mina Toquepala, del tipo pórfido de Cu-Mo diseminado, cuya mineralización está centrada a una chimenea de brecha y a un intrusivo dacítico calcoalcalino, relacionados a la actividad hidrotermal cuya edad es del Cretáceo superior-Terciario inferior.

El objetivo fue determinar la caracterización geoquímica del zinc y su implicancia en el tratamiento metalúrgico, para ello se determinó los distintos dominios geológicos para definir el comportamiento del zinc y los otros elementos Cu-Mo-Fe-As-Pb, determinar las leyes promedios, coeficiente de correlación y las relaciones proporcionales del zinc y los otros elementos y la distribución espacial de los elementos Zn-Cu-Mo-Fe-As-Pb en la Mina Toquepala.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo se utilizaron los datos del análisis a nivel de detección geoquímica proporcionada por Southern Peru Copper Corporation (SPCC). Se aplicó el método analítico deductivo y secuencial y que mediante el análisis de los datos geoquímicos de los elementos: Zn-Cu-Mo-Fe-As-Pb y el proceso cuantitativo a través de la estadística y la graficación de los datos de las abundancias de los elementos designados en la presente investigación se llega a la caracterización geoquímica del zinc y los otros elementos.

Serán observadas las correlaciones de las leyes de los elementos obtenidos mediante análisis químicos o variables cuantitativas y la determinación de las características geológicas mediante el análisis de los testigos de perforación: litología, alteración, zona mineral y presencia de yeso para caracterizar los distintos dominios geológicos existentes en la mina Toquepala. Combinando las variables cuantitativas y los diferentes dominios geológicos o variables cualitativas mediante las cuales se podrá responder las interrogantes de la investigación y para un mejoramiento en la determinación de los recursos mineros

Las muestras geológicas tanto de campo como provenientes de los testigos de perforación diamantina fueron analizadas en los Laboratorios de la SPCC ubicados en la Mina Toquepala.

III. GENERALIDADES GEOLÓGICAS DE LA MINA TOQUEPALA

3.1 Ubicación

El yacimiento minero de Toquepala en el departamento de Tacna entre 17° 13' latitud Sur y 70° 36' longitud Oeste (Figura N° 1) (Mattos et al 1999 y Cossío, D; 2016)) y las cotas 3100 a 3600 msnm. En dirección NO y entre 20 a 30 Km se encuentran los pórfidos de Quellaveco y Cuajone que constituyen la franja de pórfidos de Cu-Mo del sur del Perú.

El yacimiento de Toquepala se encuentra localizado en una región de topografía accidentada, debido a innumerables quebradas profundas que en su recorrido desde la sierra hacia los desiertos de la costa, cortan transversalmente el flanco occidental de los andes sur occidentales (Cossío, D; 2016).



Figura N° 1: Plano de ubicación de la Mina Toquepala. (Fuente Mattos, R; et. al. 1999).

3.2 Marco Geológico Regional

Según Mattos et al 1999 y Cossío, E, 2016 y mencionan que el yacimiento de Toquepala está situado en una área que fue sometida a intensa actividad ígneo eruptiva de magmas riolíticos y andesíticos que se registró hace 70 MA (Cretáceo-Terciario), esta actividad produjo enormes cantidades de material volcánico, el cual se acumuló en una serie de mantos de lavas, hasta completar un espesor de 1500m constituyendo el basamento regional, el mismo que está compuesto por derrames alternados de riolitas, andesitas y aglomerados inclinados ligeramente hacia el oeste y que constituyen el denominado «Grupo Toquepala» (Figura N° 2).

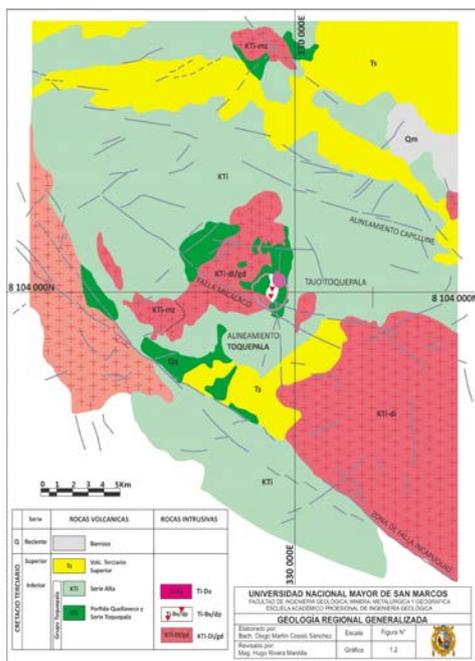


Figura N° 2: Geología regional generalizada (Fuente: mejorado de Mattos, R; 1999).

Posteriormente, la actividad ígnea fue principalmente epitermal y produjo grandes masas de rocas en fusión que intruyeron, rompiendo y fundiendo las lavas enfriadas del Grupo Toquepala. Estas rocas intrusivas constituyen apófisis del batolito andino y fueron emplazadas en diferentes etapas, debido a que provinieron de un magma calco alcalino de concentración química variable, resultaron diferentes tipos de rocas: diorita, granodiorita, dacita porfírica, etc

Asimismo Bellido 1979 y Cossio D, 2016 mencionan que la actividad tectónica regional que está relacionada con la formación de la Cordillera de los Andes, está representada estructuralmente en el área por las fallas Incapuquio, Micalaco de orientación NWS-SE y el alineamiento Toquepala. El basamento de Toquepala fue afectado por los movimientos de la según la fase de la orogenia andina (Fase Inca) durante el Eoceno tardío o comienzo del Oligoceno. La formación de la falla Micalaco ha sido favorecida por el contacto volcánico-intrusivo, mientras que el alineamiento Toquepala N-S se habría desarrollado como subsidiaria del fallamiento principal NO-SE y por el levantamiento del bloque situado al norte de la falla Micalaco, ambas fallas se interceptan en el área de la mina y determinaron una zona extensa de debilitamiento. Posteriormente, soluciones a elevada temperatura, resultantes de una etapa de diferenciación magmática atravesaron todas las rocas existentes destruyéndolas y alterando su composición química, haciéndolas más permeables. Estas soluciones favorecidas por el debilitamiento preexistente, produjeron la alteración y mineralización primaria, definiéndose un estadio estable y maduro del sistema.

3.3 Marco Geológico Local

Localmente, alrededor de Toquepala se pueden identificar flujos de riolita, andesitas y aglomerados constituidos por la Formación Quellaveco, Pórfido cuarcífero Quellaveco (Qq) y en discordancia las rocas volcánicas de la Serie Toquepala (Terciario inferior), constituida por dolerita Toquepala (Td), Pórfido cuarcífero

Toquepala (Tq), Andesita Toquepala (Ta) y Riolita Toquepala (Tr), también discordantemente sobre la serie Toquepala se presenta (c) Serie Alta del Terciario inferior (aa) que está compuesta por flujos volcánicos riolíticos y andesíticos ocasionalmente brechoides y aglomerádicos (Figura N° 3) (Miranda, 2016).

Las rocas intrusivas son plutones granitoides faneríticos ampliamente expuestas en la región. Estos plutones han sido asignados al Segmento Toquepala del Batolito de la Costa (Pitcher et.al. 1985). Estos intruyen a todos los miembros del Grupo Toquepala incluyendo la Serie Alta y están cortados a su vez por stocks porfiríticos en las regiones de Cuajone, Quellaveco y Toquepala. Estos intrusivos cuyo orden de cristalización va de magmas básicos a ácidos y su correspondiente diferenciación magmática se encuentran al norte de la falla Incapuquio donde se observan afloramientos de gabros, dioritas, monzonita y finalmente granitos, procesos de erosión expusieron estas rocas plutónicas que posteriormente fueron cubiertas por los flujos piroclásticos de la Formación Huaylillas.

En esta clasificación también se consideran los intrusivos hipabisales: pórfido de dacita, Aglomerado de dacita y Pórfido de latita, cuyas edades se encuentran en el rango de 57 a 52 MA, siendo éstos los que mayormente se encuentran asociados a fases de mineralización, tal como se puede comprobar en los yacimientos de cobre porfirítico de Toquepala, Quellaveco y Cuajone, estos cuerpos consisten de stocks de naturaleza ácida a intermedia que conforman una faja mineralizada dentro de la Sub provincia Cuprífera del Pacífico en el flanco occidental de los Andes del sur del Perú que se relacionan con los depósitos de cobre del norte de Chile.

Con respecto a la alteración hidrotermal: (Mattos et al, 1999 y Cossio, D, 2016) definen cuatro tipos de alteraciones más comunes:

- Alteración propilitica: epidota-clorita-calcita-pirita se presenta mayormente en la diorita.
- Alteración argilica supergena: caolin y arcillas en general y se presenta en la diorita y rocas volcánicas.
- Alteración fillica: cuarzo-sericita-pirita, presente en el intrusivo de dacita y brechas en general.

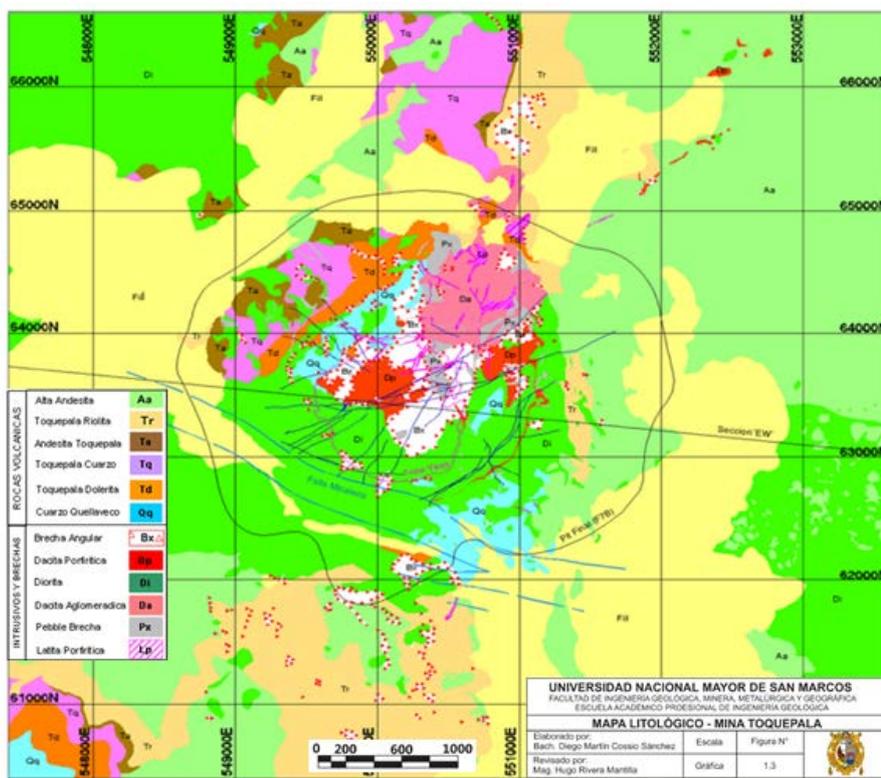


Figura N° 3: Mapa Litológico – Mina Toquepala (Fuente SPCC inédito: según Miranda, H; 2016)

- Alteración filico potásica: biotita, clorita-sericita y se presenta en el intrusivo de dacita y brecha.
- Todas las rocas del basamento y rocas intrusivas han sido alterados a excepción de la dacita aglomerádica y diques de latita porfirítica y la alteración a sílice ocurre mayormente en el pórfidocuarzófero Quellaveco.

Según Mattos et al, 1999 y Cossío, D, 2016 mencionan que la mineralización de Toquepala es simple siendo la distribución de leyes de cobre uniforme tanto lateral como en profundidad (ver Tabla N° 1). (Mattos et al 1999 y mejorado por Cossio, D, 2016)

- Los minerales económicos se encuentran en estado de sulfuros diseminados a través de toda la roca, en pequeñas venillas relleno vacíos o en pequeños agregados.
- Presenta una mineralogía compuesta por calcopirita (CuFeS_2) y calcosita (CuS), molibdenita (MoS) como minerales de mena y pirita (FeS_2) no económico.
- La zona de enriquecimiento secundario se encuentra en posición casi horizontal con espesores que varían de 0 a 150 m.
- En el nivel intermedio 3100 se ha localizado un tope de mineralización de yeso/anhidrita.
- La mineralización es del tipo mesotermal entre 225°C - 475°C .

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización Geoquímica

Se requiere realizar una adecuada caracterización geoquímica del zinc con respecto a los elementos Cu-Mo-Fe-As-Pb para tener un mejor entendimiento de la presencia de este elemento químico en el Yacimiento Toquepala dado que el contenido del zinc es perjudicial para la operación minera debido que disminuye tanto el grado de concentrado como la recuperación del cobre, así como también incrementa la cantidad de uso de reactivos (bisulfito de sodio) necesarios para la separación y flotación del cobre.

4.1 Determinación de Dominios Geológicos

Con la finalidad de realizar el modelamiento geológico en la mina Toquepala es necesario establecer o definir los dominios geológicos, los cuales serán importantes para realizar la estimación de los recursos mineros. La definición de estos dominios es importante para el proceso de planificación de mina, por las diferentes recuperaciones de las menas dentro de estas propiedades geológicas distintivas (Cossio, D, 2016).

Los límites de los dominios geológicos pueden ser «límites duros» o «límites suaves» los cuales serán definidos si se observa un cambio abrupto en la ley promedio o una variabilidad en el contacto entre dos dominios geológicos.

Tabla N° 1: Zonas mineral y mineralogía Mina Toquepala
(Fuente: mejorado de Mattos, R, 1999)

Zona Mineral	Minerales Predominantes	Ocurrencia
Leached Capping	Limonitas, Jarosita 30%, Hematita 60%, Goethita 10%	Diseminado mayormente y en fracturas
Óxidos	Practicamente no existe	
Enriquecido	Calcosita 90% y otros 10%, Digenita, Pirita, Covelita, Bornita, Cobre Nativo	Rellenando espacios en las brechas, diseminado y como vetas
Transicional	Calcopirita 60%, Calcosita 25%, otros 15% Molibdenita, Pirita, Bornita	Rellenando espacios en las brechas, diseminado y en vetas, asociado al Cuarzo
Primario	Calcopirita 90% y otros 10% Pirita, Bornita, Molibdenita, Tetraedrita, Esfalerita, Enargita, Galena	Rellenando espacios vacíos de las brechas, diseminado y en vetas

Para definir los dominios geológicos homogéneos se debe tener en cuenta sus características distintivas, es decir, mineralogía, alteraciones, litología, propiedades geofísicas, etc. que se obtienen a partir del conocimiento del cuerpo mineralizado y de la información provenientes de las muestras de los sondeos exploratorios.

En el caso de la mina Toquepala los dominios geológicos se establecieron en base a criterios de tipo de roca, tipo de alteración, zona mineral y presencia de yeso, obteniéndose así los dominios de litología, dominios de alteraciones, dominios de zona mineral y dominios de yeso/anhidrita

4.1.1 Dominios de Litología

Está compuesto de 15 dominios los cuales han

sido establecidos de acuerdo a diversas características que se presentan los tipos de rocas que se describe a continuación:

1. Dominio de alta andesita (Aa)
2. Dominio de Riolita Toquepala (Tr)
3. Dominio de Andesita Toquepala (Ta)
4. Dominio de Pórfido cuarífero Toquepala (Tq)
5. Dominio de Dolerita Toquepala (Td)
6. Dominio de Pórfido cuarífero Quellaveco (Qq)
7. Dominio de Latita porfirítica (Lp)
8. Dominio de Aglomerado de dacita (Da)
9. Dominio de Dacita porfirítica (Dp)
10. Dominios de Diorita (Di)
11. Dominios de Brecha Slump (SBx)
12. Dominios de Brecha Diorita (DiBx)
13. Dominios de Brecha Angular (Bx)
14. Dominios de Brecha Turmalina (BxT)
15. Dominios de Brecha Pebble (Px)

4.1.2 Dominios de Alteración

Está compuesta de 8 dominios los cuales han sido establecidos de acuerdo a diversas características en que se presentan las alteraciones hidrotermales:

1. Dominio de alteración fresca o inalterada (Fsh).
2. Dominio de alteración propilitica (Prop).
3. Dominio de alteración argílicas (Arg).

4. Dominio de alteración filica-cuarzo-sericita (Qs).
5. Dominio de alteración turmalina-cuarzo-sericita (Qs-T).
6. Dominio de alteración silificación (Sil).
7. Dominio de alteración potásica-cuarzo-sericita (Qs-K).
8. Dominio de alteración cuarzo-turmalina (Qtz-T).

4.1.3 Dominios de Zonas Mineral

Está compuesta de 6 dominios que se han establecidos de acuerdo a las ocurrencias de la mineralización:

1. Dominio de zona mineral Óxidos (Ox).
2. Dominio de zona mineral Leach Capping (Lc).
3. Dominio de zona mineral Transicional (T).
4. Dominio de zona mineral Enriquecida (E).
5. Dominio de zona mineral Primario (P).
6. Dominio de zona mineral Bornita Primaria (Bnp).

4.1.4 Dominios de Yeso/Anhidrita

1. Dominio geológico con presencia de yeso/anhidrita (G/A)
2. Dominio geológico sin presencia de yeso/anhidrita (no G/A)

4.1.5 Dominios Geológicos

Con la información anterior de los dominios predominantes en el yacimiento de Toquepala se propone los siguientes dominios geológicos (abarca dominio litológico, alteración, zonas mineral y yeso/anhidrita), habiéndose descartado otros dominios por falta de información o por el número de muestras que estadísticamente no eran suficientes para procesarlas:

Orden / Dominios Geológicos

- 1.- Tr-Prop-P-no G/A
- 2.- Ta-Prop-P- no G/A
- 3.- Tq-Prop-P.no G/A
- 4.- Tq-Qs-P-no G/A
- 5.-Td-Prop-P-no G/A
- 6.- Qq-Qs-T- no G/A

- 7.- Qq-Qs-P- no G/A
- 8.- Lp-Prop-P- no G/A
- 9.- Lp - Qs - P - no G/A
- 10.- Lp - Qs - P - G/A
- 11.-Da - Prop - P - no G/A
- 12.- Da - Qs - P - no G/A
- 13.- Dp - Prop - P - no G/A
- 14.- Dp - Prop - P - G/A
- 15.- Dp - Qs - P - no G/A
- 16.- Dp - Qs - P - G/A
- 17.- Dp - Sil - P - no G/A
- 18.- Di - Arg - P - no G/A
- 19.- Di - Arg - P - G/A
- 20.- Di - Prop - T - no G/A
- 21.- Di - Prop - P - no G/A
- 22.- Di - Prop - P - G/A
- 23.- Di - Qs - T - no G/A
- 24.- Di - Qs - P - no G/A
- 25.- Di - Qs - P - G/A
- 26.- Di - Qs- T - P - no G/A
- 27.- Di - Sil - P - no G/A
- 28.- Di - Sil - P - G/A
- 29.- DiBx - Qs - P - G/A
- 30.- Bx - Arg - P - G/A
- 31.- Bx - Prop - P - no G/A
- 32.- Bx - Qs - T - no G/A
- 33.- Bx - Qs - P - no G/A
- 34.- Bx - Qs - P - G/A
- 35.- Bx - Sil - P - G/A
- 36.- Bx - Sil - P - G/A
- 37.- BxT - Qs - P - G/A
- 38.- Px - Prop - P - no G/A
- 39.- BxT - Qs - P - G/A
- 40.- Px-Qs - P - G/A

4.2 Análisis de Datos Cuantitativos

El total de las muestras de los sondeos exploratorios comprende 9370 datos referidos al Zn-Cu-Mo-Fe-As-Pb, siendo la mayor cantidad de muestras tomadas de los dominios litológicos de diorita (orden 25 y 21) y brecha (orden 34) (Figura N° 4), sin embargo, pese a tener un número definido de dominios de litología, dominios de alteración, dominios de zona mineral y dominios de yeso/anhidrita, en el análisis cuantitativo se han considerados las muestras de los taladros entregados por la empresa habiéndose considerado 40 dominios geológicos, otros no se han considerado por no contar con información o por ser el número de muestras menor a 20 siendo poco representativos para un mega yacimiento.

4.2.1 Análisis Estadístico Global

Una vez agrupados los datos de acuerdo a cada dominio geológico, se procede al procesamiento estadístico descriptivo de cada variable en forma global, para obtener una visión general del comportamiento de las variables de estudio sin ser agrupadas de acuerdo a los dominios geológicos establecidos con un total de 9730 muestras (Tabla N° 2).

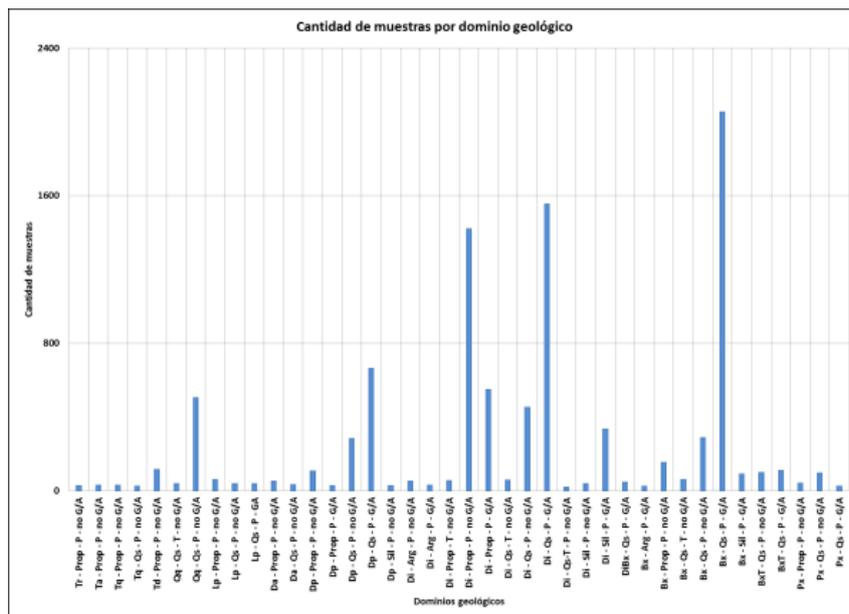
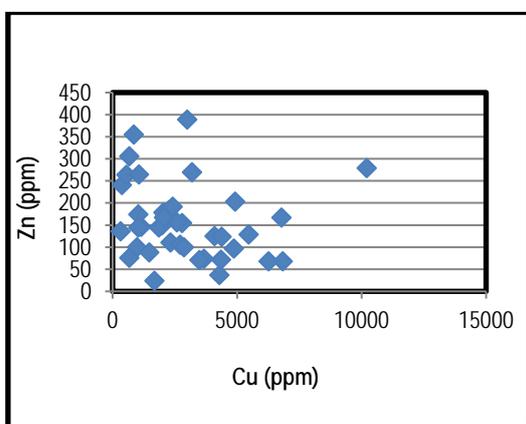


Figura N° 4: Cantidad de muestras por dominio geológico (Fuente: Cossío, D,

Tabla N° 2: Análisis estadístico - geoquímico global (Fuente: Cossío, D, 2016)

Global	Cu (ppm)	Mo (ppm)	Fe (ppm)	As (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
Media	3852	209	34930	63	40	140
Error típico	39	5	172	1	1	3
Mediana	2630	40	32380	40	30	80
Moda	630	10	43000	0	20	30
Desviación estándar	3802	456	16942	110	67	253
Varianza de la muestra	144515722	208289	287036082	12042	4506	64210
Curtosis	5433	99179	3700	146846	467117	209661
Coficiente de asimetría	1853	7461	1289	9635	17576	11634
Rango	35960	12240	172690	2770	2410	6840
Mínimo	40	0	4710	0	0	0
Máximo	36000	12240	177400	2770	2410	6840
Suma	37480520	2034140	339867760	613630	392470	1359000
Cuenta	9730	9730	9730	9730	9730	9730

Se obtuvo una matriz de correlaciones de Pearson (r) global (Tabla N° 3) para los 9730 muestras que nos da el comportamiento del elemento zinc respecto a los otros elementos Cu-Mo-Fe-As-Pb. Se puede observar que la mayor correlación positiva entre el zinc y plomo con $r = 0.389$ y una menor $r = 0.021$ entre el zinc y el molibdeno, y entre el zinc y cobre con $r = 0.09$; como también se demuestra en el gráfico que hay una gran variabilidad entre los dos elementos (Figura N° 5); pero se nota una tendencia inversa en cuanto el Zn baja su ley el Cu aumenta; en líneas generales la correlación global entre los elementos en la mina de Toquepala no tienen correlación positiva o negativa relevante.

**Figura N° 5:** Relación del Zn vs Cu en los dominios geológicos

El cálculo de la ley promedio de cada elemento por dominio geológico es importante debido a que de esta manera permite tener mayor conocimiento acerca de la ley ponderada de la mina.

A continuación se presenta las leyes promedio del elemento zinc con respecto al cobre (Figura N° 5) y con los demás elementos con respecto a la mayor abundancia (Tabla N° 4) En cuanto a las leyes promedio por dominio geológico se realizó una conversión a la data, convirtiendo los porcentajes a partes por millón (ppm) para una mejor visualización de la misma.

En cuanto a leyes promedios del cobre se puede apreciar mayor abundancia en los dominios BxT-Qs-P-G/A (37)(10210 ppm), Bx-Arg-P-G/A (30)(6837 ppm). Bx-Qs-P-G/A (34)(6781 ppm), predomina esta abundancia a tres factores importantes la poca abundancia del zinc, a la presencia de yeso/anhidrita, además la poca abundancia de hierro y plomo.

En cuanto a leyes promedios del zinc se puede apreciar que el dominio geológico con mayor abundancia es Bx-Qs-T-no G/A (32)(389 ppm), Ta-Prop-P- no G/A (2)(355 ppm), Ta-Prop-P- no G/A (5) (306 ppm) y BxT-Qs-P-G/A (36)(279 ppm).

Tabla N° 3: Matriz de correlaciones de Pearson (Fuente: Cossío, D, 2016)

Global	Cu (ppm)	Mo (ppm)	Fe (ppm)	As (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
Cu (ppm)	1	0.454	-0.197	0.158	-0.004	0.094
Mo (ppm)	0.454	1	-0.248	0.051	-0.058	0.000
Fe (ppm)	-0.197	-0.248	1	-0.021	0.075	0.060
As (ppm)	0.158	0.051	-0.021	1	0.008	0.017
Pb (ppm)	-0.004	-0.058	0.075	0.008	1	0.389
Zn (ppm)	0.094	0.000	0.060	0.017	0.389	1

La Figura N° 6 muestra la relación de las leyes promedios del Zn vs Cu por cada dominios, y determina que a mayor abundancia de zinc disminuye la concentración del cobre y además la relación de ambas es inversa a medida que baja la concentración del zinc aumenta la abundancia del cobre.(Tabla N° 4).

La Tabla N° 4 nos muestra que la ley promedio alta de Cu se centra en los dominios geológicos dominados por la diorita pero acompañado de altas leyes promedios de Fe y acompañado de yeso y la brecha angular y de turmalina acompañada de altos valores de Mo, baja ley de Fe, As, Pb y Zn y con presencia de yeso/anhidrita y ambos dominios geológicos están dentro del dominio mineral primario.

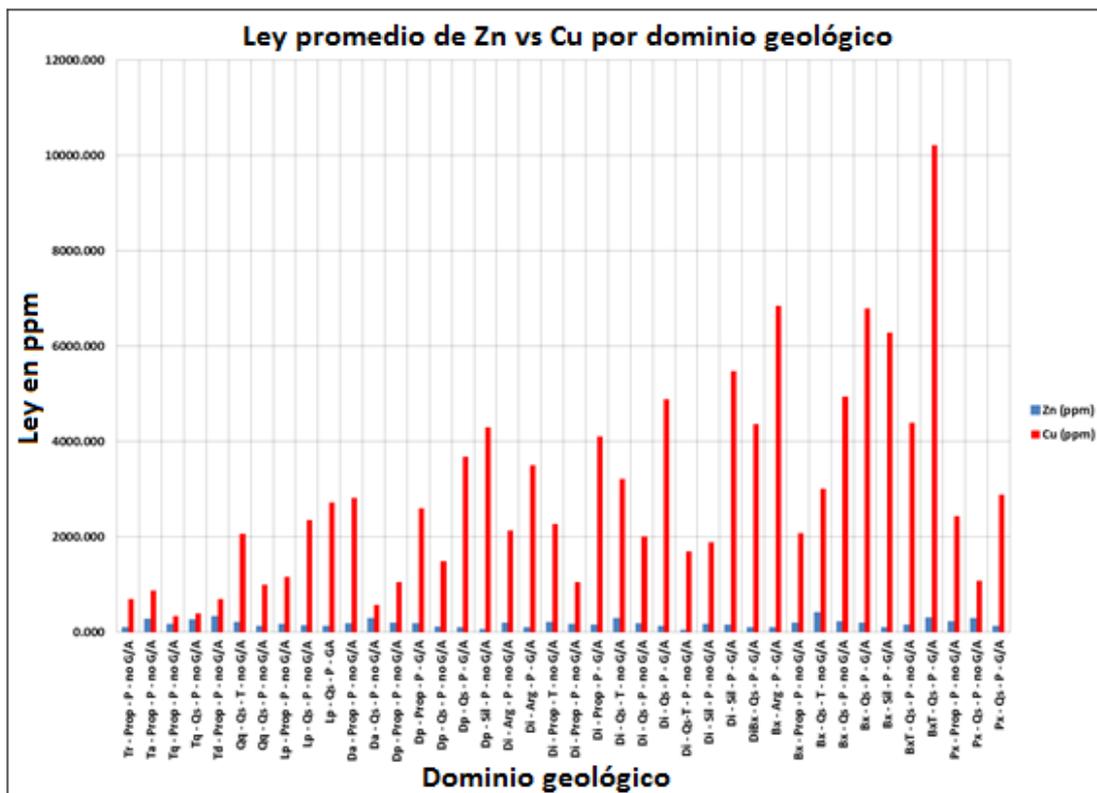


Figura N° 6: Cantidad de muestras por dominio geológico (Fuente: Cossío, D, 2016)

Tabla N° 4. Dominios geológicos con leyes promedio más altas (Fuente: Elaboración propia)

Orden	Dominios geológicos	Muestras	Ley promedio Cu (ppm)	Ley promedio Mo (ppm)	Ley promedio Fe (ppm)	Ley promedio As (ppm)	Ley promedio Pb (ppm)	Ley promedio Zn (ppm)
2	Ta - Prop - P - no G/A	31			57617	100		355
4	Tq - Qs - P - no G/A	23						241
5	Td - Prop - P - no G/A	114			48533		103	306
12	Da - Qs - P - no G/A	32					77	264
14	Dp - Prop - P - G/A	28					77	
16	Dp - Qs - P - G/A	662		263				
18	Di - Arg - P - no G/A	52			44711			
20	Di - Prop - T - no G/A	54			40304			
21	Di - Prop - P - no G/A	1419			46338			
22	Di - Prop - P - G/A	547			43728			
23	Di - Qs - T - no G/A	57			51721			
24	Di - Qs - P - no G/A	452			41463			
27	Di - Sil - P - no G/A	37			49455			
28	Di - Sil - P - G/A	335	5465	235				
29	DiBx - Qs - P - G/A	45				109		
30	Bx - Arg - P - G/A	24	6837	1252		161		
31	Bx - Prop - P - no G/A	154			44144			
32	Bx - Qs - T - no G/A	61						389
33	Bx - Qs - P - no G/A	287					72	203
34	Bx - Qs - P - G/A	2053	6781	570				
35	Bx - Sil - P - G/A	89	6268	260				
37	BxT - Qs - P - G/A	109	10210	683		116		279
39	PX - Qs - P - no G/A	96			40850		89	265

Tabla N° 5: Ley ponderado por dominio litológico (Fuente: Elaboración propia)

Dominios geológicos	Muestras	Ley promedio Cu (ppm)	Ley promedio Mo (ppm)	Ley promedio Fe (ppm)	Ley promedio As (ppm)	Ley promedio Pb (ppm)	Ley promedio Zn (ppm)
Riolita Toquepala (Tr)	27	673	12	37617	99	28	76
Andesita Toquepala (Ta)	31	853	20	57617	100	61	355
Pórfido Cuarzifero Toquepala (Tq)	52	345	12	29917	26	55	185
Dolerita Toquepala (Td)	114	674	12	48533	48	103	306
Pórfido cuarzifero Quellaveco (Qq)	542	1055	13	24329	62	32	131
Lalita porfirítica (Lp)	136	1914	70	32183	51	38	122
Aglomerado de Dacita (Da)	83	1932	44	30716	51	66	215
Dacita porfirítica (Dp)	1107	2842	112	28561	54	43	127
Diorita (Di)	4558	3212	98	34227	43	38	149
Brecha de diorita (DiBx)	45	4352	121	37271	109	22	72
Brecha angular (Bx)	2766	6141	458	22339	62	37	167
Brecha de turmalina (BxT)	109	10210	683	29682	116	25	279
Brecha Pebble (Px)	160	1672	115	36561	21	60	212

La Tabla N° 5 que muestra los dominios litológicos en donde sobresalen en número de muestras de taladro la dacita porfirítica, por ser la roca asociada a fases mineralizantes y las rocas encajonantes diorita, la brecha angular, brecha de diorita y de turmalina, las que probablemente estén relacionados genéticamente.

Las leyes ponderadas de altas leyes de Cu se registran en la brecha de turmalina, brecha angular, brecha de diorita y diorita y dacita porfirítica y los valores del Zn en estos dominios litológicos son de bajas leyes lo que permiten una mayor concentración de Cu.

4.3 Distribución Espacial de los Elementos Zn-Cu

En las curvas isovalóricas del Zn se puede apreciar que las zonas de mayor abundancia se encuentran en las zonas alejadas al pulso mineralizante principal, siendo mayor en las zonas periféricas y con tendencia a desaparecer en las zonas centrales del tajo, esto debido a que el Zinc es un elemento con temperatura de cristalización más baja que el cobre y el molibdeno, ubicándose en zonas más alejadas a estos elementos (Figura N^o 7), esta tendencia también se aprecia en el plomo, arsénico y hierro.

En las curvas isovalóricas del elemento cobre se puede observar que las zonas con mayor abundancia se encuentran en las zonas cercanas al pulso mineralizante principal, siendo menor en las zonas alejadas y con tendencia a desaparecer en las zonas periféricas del tajo, esto debido a la temperatura de cristalización del cobre y el molibdeno, al ser elementos mesotermales tienden a concentrarse en zonas de temperaturas más altas que el zinc (Figura N^o 8).

4.4. Implicancia del Zinc en el Tratamiento Metalúrgico

En cuanto al proceso de flotación de menas de Cu-Zn están determinados por la naturaleza y composición de la mena determinado por el tipo de minerales de cobre presentes, selectivamente entre la calcopirita y la esfalerita cuyo problema se aumenta ante la presencia de minerales secundarios de cobre (por ejemplo, bornita, covelita y digenita) que representa un problema significativo en la separación del cobre con la esfalerita. Debido a que estos minerales son solubles in situ o durante la molienda y se liberan los iones de cobre los cuales activan a la esfalerita y crean un problema en la separación selectiva del cobre de la esfalerita que en parte puede ser dificultosa (Bulatovic, S, 2007).

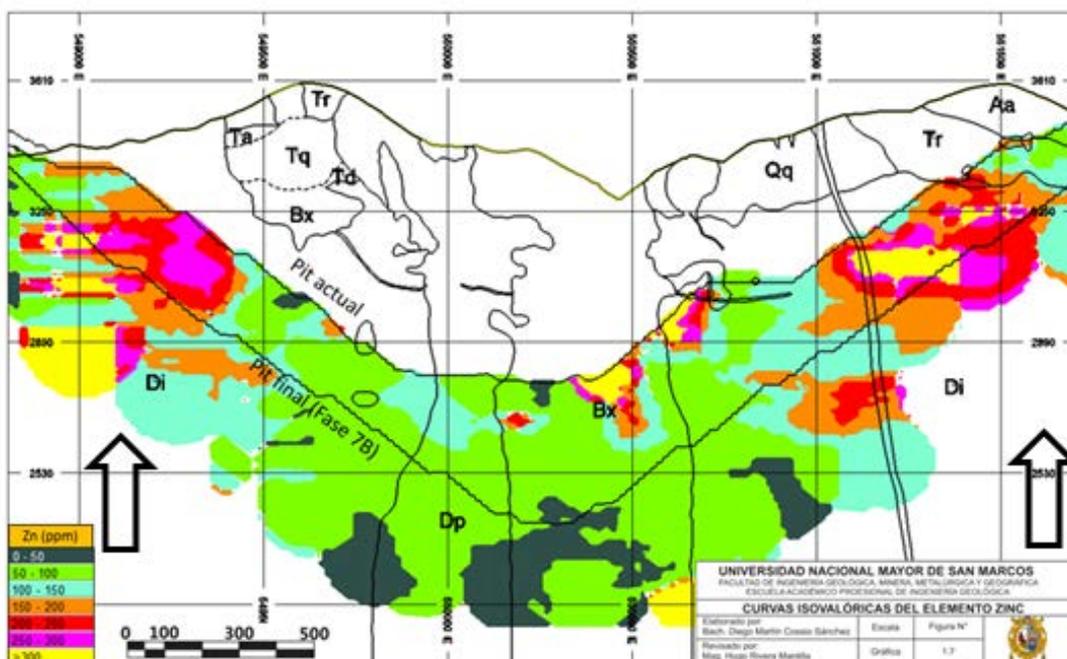


Figura N^o 7: Curvas isovalóricas del elemento Zn en sección longitudinal. (Fuente: Cossío, D, 2016).

Aplicando este conocimiento en la presente investigación se ha determinado que el dominio geológico más comprometido durante el tratamiento metalúrgico es principalmente el dominio geológico Bx-Qs-T-no G/A, debido a que presenta alto contenido de zinc según los análisis geoquímico, mientras que el dominio geológico Bx-Sil-P-G/A de bajo contenido de los elementos Zn, Fe, As, Pb es el más favorable para la recuperación del cobre.

Con el conocimiento de la implicancia del zinc sobre el cobre, problema a no solucionar, pero si minimizar sus efectos mediante la caracterización geoquímica del yacimiento la que juega un papel importante en la determinación de las leyes promedios de acuerdo a los dominios geológicos establecidos de acuerdo a la data disponible y realizar una óptima clasificación del material geológico para su envío a la planta metalúrgica.

V. CONCLUSIONES

- 1 La correcta determinación de los dominios geológicos en base de los dominios litológicos, de alteración, mineralización y yeso es fundamental para determinar el comportamiento del zinc y de los elementos Cu-Mo-Fe-As-Pb, ya que se determinó que las características estadística-geoquímicas son diferentes para cada dominio, resultando más favorables para su envío a la planta los materiales geológicos de algunos dominios que presentan bajos contenidos de Zn-Fe-As-Pb como el dominio geológico Bx-Sil-P-G/A, mientras que el dominio geológico Bx-Qs-T-no G/A presenta contenido bastante alto de zinc.
- 2 La determinación de la ley promedio, variabilidad, coeficientes de correlación, relaciones proporcionales del zinc y los elementos Cu-Mo-Fe-As-Pb de los diferentes dominios geológicos son fundamentales para determinar los dominios geo estadísticos y geo metalúrgicos y realizar una óptima clasificación de los materiales para su envío a la planta concentradora de la mina Toquepala.

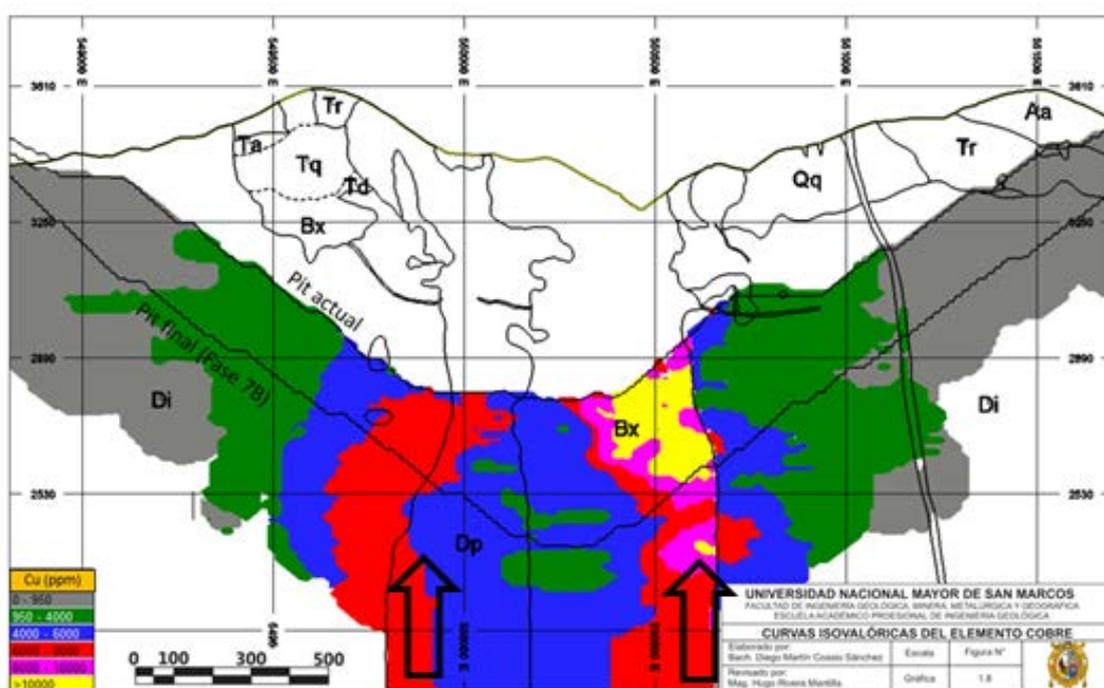


Figura N° 8: Curvas isovalóricas del elemento Cu en sección longitudinal (Fuente: Cossío, D, 2016)

- 3 El conocimiento de la distribución espacial del zinc y los elementos Cu-Mo-Fe-As-Pb resulta importante debido a que brinda una visión más general de la ubicación de las zonas de mayor concentración de cada elemento siendo importante para la definición de futuros targets de perforación diamantina.
- 4 Las implicancias del zinc en el tratamiento metalúrgico es un problema inherente al tipo de yacimiento, pero obtener mayor conocimiento de la caracterización geoquímica del yacimiento Toquepala, no elimina la presencia del zinc en los materiales enviados a planta concentradora, sin embargo, brinda la posibilidad de poder controlar y minimizar sus efectos, ampliando el conocimiento hacia los dominios geo estadísticos y geo metalúrgicos partiendo de los dominios geológicos establecidos en esta investigación.

VI. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Empresa Southern Peru Copper Corporation-SPCC por brindar la data geoquímica y su autorización para su publicación y a las Autoridades de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la UNMSM por la publicación de este artículo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Bellido, E. (1979). Geología del cuadrángulo de Moquegua. INGEMMET Boletín Serie A Carta Geológica Nacional No. 15
- 2 Bulatovic, S. (2007). Handbook of flotation reagents: Chemistry, Theory and Practice 1st Edition Volume 1: Flotation of Sulfide Ores. Elsevier Science (2007), pp 367 – 400.
- 3 Cossío, D. (2016). Caracterización geoquímica del elemento zinc en la Mina Toquepala y sus implicancias en el tratamiento metalúrgico. Tesis de Ingeniero Geólogo. UNMSM
- 4 Miranda, H. (2016). Informe Estudio de la Geología del Tajo Toquepala (Reporte interno de Southern Peru Copper Corporation).
- 5 Mattos, R. & Valle, J. (1999). Exploración, geología y desarrollo del yacimiento Toquepala. Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores, 1, Lima, PE, Primer libro de monografías de yacimientos minerales peruanos: historia exploración y geología. Lima: Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. Pp.101-116.
- 6 Pitcher, W., Atherton, MP., Cobbings, E.J. & Becksinsale, R. (1985). Magmatism at a plate edge. The Peruvian Andes. Glasgow: Blackie, 329p.