



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS QUÍMICOS EN LOS EVENTOS MAGMÁTICO  
HIDROTERMALES DEL PÓRFIDO CUPRÍFERO MINA MINISTRO HALES,  
DISTRITO DE CHUQUICAMATA,  
REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

JUAN RAMÓN MALUENDA PINTO

PROFESOR GUÍA:

VICTOR MAKSAEV JURCHUC

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

KATJA DECKART

SANTIAGO DE CHILE

2015

## RESUMEN

Mina Ministro Hales (MMH), ubicada unos 7 km al norte de la ciudad de Calama en la región de Antofagasta, forma parte de una de las principales agrupaciones de reservas cupríferas a nivel mundial, junto a los depósitos minerales de Chuquicamata, Radomiro Tomic y Mina Sur, pertenecientes a Codelco Norte, todos ellos alineados en sentido norte-sur por un control que habría ejercido la Falla Oeste, perteneciente al Sistema Estructural Falla Domeyko. El depósito MMH, es un pórfido cuprífero de Cobre y Molibdeno, con emplazamiento de Brechas Hidrotermales tardías mineralizadas con Cobre, Plata e impurezas de Arsénico, asociadas a un sistema de alta sulfidización. El depósito se ha subdividido en tres sectores: norte, central y sur, siendo el sector central del de mayor valor económico y la zona donde se realizó este estudio.

El determinar que MMH reunía las condiciones para ser un proyecto rentable, consideró la integración de estudios de toda la información preexistente acerca del depósito, particularmente la proveniente de los sondajes perforados con fines de evaluación económica y la conceptualización geológica de la génesis del depósito mineral.

Actualmente el yacimiento está en su etapa de explotación a rajo abierto, pero a futuro se considera extraer los recursos por métodos de explotación subterránea. Este trabajo analiza el comportamiento geoquímico de un grupo de elementos químicos y como estos se relacionan con las alteraciones dominantes, litologías principales y mineralogía de mena del sector central de MMH.

Los análisis químicos que conforman las bases de datos utilizadas en este estudio, corresponden a una información pre existente, que fue obtenida de muestras de testigos de sondajes realizados entre los años 2000 y 2009. Una de las bases analiza 9 elementos químicos: Cu, Mo, Au, Ag, As, Sb, Pb, Fe y Zn utilizando el método de *Absorción Atómica* (AAS) y la otra base, analiza 49 elementos químicos utilizando el método de *Plasma de Acoplamiento Inductivo* (ICP-MS e ICP-AES). Ambas bases de datos se depuraron por separado utilizando *Microsoft Excel*, seleccionando sólo 24 elementos para procesar estadísticamente sus datos mediante *software STATISTICA 8.0* e *ioGAS-64* y luego se analizaron los resultados para los casos univariable, multivariable y también por lo entregado en diagramas *caja y bigote*.

Del análisis estadístico realizado en ambas bases de datos se infirió, que el Cu, Ag, Mo y Au, se asocian a la Alteración Argílica Avanzada de alta sulfidización y a las Brechas Hidrotermales, que el Mo asociado a etapas de alteración/mineralización temprana de zonas profundas del yacimiento, por probable *telescopeo* habría ascendido hasta cotas superiores hasta zonas de Zn, que el Mo y el Re estarían asociados a un evento temprano de alteración/mineralización presumiblemente generado por la intrusión del Pórfido MM. Cu, Ag, As, Bi, S, Se y Sb tienen alta correlación, probablemente por la ocurrencia de minerales como Enargita y de la serie Tenantita-Tetraedrita que se asocian con la etapa de alta sulfidización que acompañó la formación de las Brechas Hidrotermales. Al y K como elementos químicos formadores de roca con sus elementos traza asociados, probablemente están vinculados a las unidades litológicas Granodiorita MM, Diques de Pórfido Dacítico y Pórfido Feldespático. El Al se acompañaría de los elementos traza Ga, Li, Ge, Sc, U y V y el K con Ru, Sc, Th y Tl. El conjunto de análisis químicos evidencia claramente la superposición del evento tardío de alteración Argílica Avanzada y mineralización de alta sulfidización asociada al mismo. Esta superposición oblitera gran parte de la mineralización introducida en etapas previas. Sin embargo, el análisis estadístico indicaría la independencia de la mineralización de Mo (con Re asociado) probablemente acompañado de Cu más tempranamente y la de Pb-Zn. Las rocas del depósito muestran valores de concentración bajo el *Clarke* para, Al, Fe, Ga, Ge, K, Li, Rb, Sc, Th, U y V, los cuales probablemente fueron lixiviados por los procesos hidrotermales que afectaron al yacimiento durante su formación.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis agradecimientos a Victor Maksaev, por aceptar ser profesor guía de esta tesis, por atender mis dudas, por su paciencia y buena disposición para escuchar todo comentario que le hiciera y por sus respuestas francas y directas, cruciales para concluir con lo que aquí se presenta. A Brian Townley y Katja Deckart por el apoyo que me otorgaron cuando los requerí por motivo de este trabajo. Para ellos, mi reconocimiento a su calidad humana.

Agradezco a Codelco Norte, en los nombres de Alfredo Parra, Loreto Cáceres, Gladys Lorca y Cristian Rojas, el haberme permitido el que utilizara la información que sirvió de base para esta investigación.

Finalmente mi gratitud a todos quienes, de uno u otro modo, me apoyaron durante el desarrollo de esta tesis.

# TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	v
INDICE DE TABLAS	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 GENERALIDADES.....	1
1.2 OBJETIVO.....	1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	1
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	2
1.4 UBICACIÓN Y ACCESO.....	4
1.5 TRABAJOS ANTERIORES.....	6
1.6 METODOLOGÍA.....	7
II. GEOLOGÍA.....	8
2.1 MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL.....	8
2.1.1 UNIDADES METAMORFICAS.....	10
2.1.2 UNIDADES ESTRATIFICADAS.....	10
2.1.3 ROCAS INTRUSIVAS.....	11
2.1.4 ROCAS SEDIMENTARIAS.....	12
2.1.5 DEPOSITOS NO CONSOLIDADOS.....	13
2.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL.....	14
2.2.1 LITOLOGÍA.....	16
2.2.2 ESTRUCTURAS.....	22
2.3 ALTERACIÓN Y MINERALIZACIÓN.....	23
III. GEOQUÍMICA.....	26

3.1	ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	26
3.2	CONTROL DE CALIDAD .....	28
3.3	ESTADÍSTICA UNIVARIABLE .....	32
3.3.1	CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA RESPECTO AL <i>CLARKE</i> .....	34
3.3.2	DIAGRAMAS <i>CAJA Y BIGOTE</i> .....	36
3.4	ESTADÍSTICA MULTIVARIABLE.....	45
3.4.1	ESTADÍSTICA BIVARIABLE .....	45
3.4.2	ANÁLISIS MULTIVARIABLE POR COMPONENTES PRINCIPALES .....	48
IV.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	63
V.	BIBLIOGRAFÍA.....	65
	ANEXO .....	70

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de sondajes campañas 2000-2009 en MMH central, (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo Distrital (GRMD), Codelco Norte). .....	3
Figura 2. Ubicación y acceso a MMH central (modificado de Zúñiga, 2012). .....	5
Figura 3. Geología Distrital (Modificado de Díaz, 2009). .....	9
Figura 4. Planta y Sección con Unidades Geológicas MMH sector central.....	15
Figura 5. Litologías Principales de MMH Sección 25900 N. (Modificado de Becerra, 2009). .....	17
Figura 6. Pórfido MM (PMM), Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo Distrital (GRMD), Codelco Norte.....	19
Figura 7. Pórfido Cuarzófero (PC) intruyendo al Pórfido MM (PMM) (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo Distrital (GRMD), Codelco Norte). .....	19
Figura 8. Brechas Hidrotermales (BH), (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo Distrital (GRMD), Codelco Norte).....	20
Figura 9. Fallas en superficie de MMH Central (Modificado de Zúñiga, 2012). .....	22
Figura 10. Alteración-Mineralización en Sección 7.525.400 N (Díaz, 2010). .....	25
Figura 11. Porcentajes de datos en alteraciones y litologías para mediciones en ASS e ICP .....	27
Figura 12. Diagrama de Control de Calidad utilizado en MMH. ....	29
Figura 13. Cartas de control de materiales de referencia para elementos analizados por ICP-MS (Becerra y Contreras, 2006) .....	30
Figura 14. Gráficos de comparación de análisis de las muestras y su duplicados para determinar imprecisión (Becerra y Contreras, 2006).....	31
Figura 15. Diagramas <i>caja y bigote</i> de concentración de elementos <i>económicos</i> en alteraciones dominantes de MMH central. ....	37

Figura 16. Diagramas <i>caja y bigote</i> de concentración de elementos <i>impurezas</i> en alteraciones dominantes de MMH central. ....	38
Figura 17. Diagrama <i>caja y bigote</i> de concentración de elementos de interés en alteraciones dominantes de MMH central. ....	39
Figura 18. Diagrama <i>caja y bigote</i> de concentración de elementos <i>económicos</i> en las litologías principales de MMH central. ....	40
Figura 19. Diagrama <i>caja y bigote</i> de concentración de elementos <i>impurezas</i> en las litologías principales de MMH central. ....	41
Figura 20. Diagrama <i>caja y bigote</i> concentraciones de elementos <i>de interés</i> en litologías principales de MMH central. ....	42
Figura 21. Diagramas <i>caja y bigote</i> de minerales de mena en alteraciones dominantes de MMH central. ....	43
Figura 22. Minerales de mena en porcentajes relativos. (Base de datos ICP). ....	44
Figura 23. Matriz de correlación entre elementos químicos de base de datos AAS en MMH central. ....	46
Figura 24. Matriz de correlación entre elementos químicos de la base de datos ICP en MMH central. ....	48
Figura 25. Diagramas <i>caja y bigote</i> de puntuaciones tipificadas de Componentes Principales en Alteraciones Dominantes de base de datos AAS. ....	51
Figura 26. Diagramas de <i>caja y bigote</i> de puntuaciones tipificadas de Componentes Principales en Litologías Principales de base de datos ASS. ....	53
Figura 27. Diagrama 3D de los elementos químicos asociados a los tres primeros factores o componentes principales rotados con Varimax obtenidos de la base de datos AAS. ....	54

Figura 28. Diagramas de *caja y bigote* con puntuaciones tipificadas de Componentes Principales en Alteraciones Dominantes de base de datos ICP..... 60

Figura 29. Diagramas de *caja y bigote* con puntuaciones tipificadas de Componentes Principales en Litologías Principales de la base de datos ICP. .... 61

Figura 30. Diagrama 3D de los elementos químicos asociados a los factores o componentes principales rotados con Varimax obtenidos de la base de datos ICP. .... 62

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de la cantidad de datos en alteraciones dominantes y litologías principales en bases de datos ASS e ICP. ....	27
Tabla 2. Muestras bajo el límite de detección para mediciones por AAS.....	32
Tabla 3. Muestras bajo el límite de detección para mediciones por ICP.....	32
Tabla 4. Estadística univariable para mediciones por AAS en MMH central.....	33
Tabla 5. Estadística univariable para mediciones por ICP en MMH central. ....	33
Tabla 6. Concentración media respecto al <i>Clarke</i> de elementos químicos medidos por AAS en MMH central. ....	34
Tabla 7. Concentración media respecto al <i>Clarke</i> de elementos químicos medidos por ICP en MMH central. ....	35
Tabla 8. Factores o componentes principales y su correlación con los elementos químicos de MMH central. (Base de datos AAS).....	49
Tabla 9. Valores propios y varianza explicada por las componentes principales o factores en MMH central. (Base de datos AAS).....	50
Tabla 10. Factores rotados por método Varimax. (Base de base de datos AAS).....	50
Tabla 11. Las diez primeras componentes principales o factores obtenidos para los elementos químicos en MMH central de base de datos ICP.....	55
Tabla 12. Los trece restantes factores o componentes principales obtenidos para los elementos químicos en MMH central de base de datos ICP.....	56
Tabla 13. Valores propios y varianza explicada para las componentes principales o factores en MMH central de la base de datos ICP. ....	57

Tabla 14. Primeros tres factores seleccionados rotados con Varimax obtenidas de la base de datos  
ICP..... 58

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 GENERALIDADES

Mina Ministro Hales (MMH) es un pórfido cuprífero tipo cobre-molibdeno con superposición de eventos de alta sulfidación con Brechas Hidrotermales mineralizadas con cobre, plata y arsénico. Se encuentra 5 km al sur de la mina Chuquicamata, alineándose, en sentido norte-sur, con un grupo de yacimientos pertenecientes a Codelco Norte controlados por el sistema estructural de la Falla Oeste. El yacimiento, se subdivide en los sectores Norte, Central y Sur, alcanzando una longitud de 7 km en sentido norte-sur y de 200 m a 300 m en sentido este-oeste, ubicándose entre las coordenadas UTM 7.530.000 N - 7.523.000 N y 507.000 E - 510.000 E. El sector central de mayor valor económico, donde se desarrollará este estudio, se encuentra actualmente en explotación a rajo abierto y está limitado por las coordenadas UTM 7.524.400 N - 7.526.450 N. A junio de 2009 la estimación de los recursos alcanza a 1.050.219 toneladas, con 0,94% de Cobre Total, con una ley de corte de 0,2 % (Díaz, 2009).

## 1.2 OBJETIVO

Este estudio analiza el comportamiento geoquímico de un grupo de elementos químicos del sector central del yacimiento Ministro Hales (MMH) de Codelco Norte y su relación con las zonas de alteración, mineralización y litologías presentes en las mismas.

### 1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El principal objetivo de este trabajo, es analizar el comportamiento de determinados elementos químicos, en la zona de alteración-mineralización comprendida entre las cotas 1.200 y 2.380 m s.n.m., aproximadamente, del sector central de Mina Ministro Hales, utilizando dos bases de datos pre-existentes con análisis de elementos químicos; una por *Absorción Atómica* (AAS) y otra por *Plasma de Acoplamiento Inductivo* (ICP-MS e ICP-AES).

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar geoquímicamente la distribución de los elementos químicos en las alteraciones dominantes y litologías principales de MMH central.

- Procesar estadísticamente de modo univariable y multivariable los elementos y analizar sus resultados.
- Identificar y describir las relaciones entre los elementos químicos y de estos con las alteraciones dominantes, minerales de mena y litologías principales del yacimiento.

### 1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

Para este estudio se dispuso de dos bases de datos pre existentes, con mediciones de elementos químicos, una por *Absorción Atómica* y la otra por *Plasma de Acoplamiento Inductivo*, ambas además contienen información de registros geológicos.

La base de datos que utiliza *Absorción Atómica* analiza 9 elementos químicos: Cobre, Molibdeno, Oro, Plata, Arsénico, Antimonio, Plomo, Fierro y Cinc para 112.818 muestras de sondajes diamantina, sondajes de aire reverso y canaletas. La otra base de datos que utiliza el método de *Plasma de Acoplamiento Inductivo*, analiza 49 elementos para 7.775 muestras de sondajes diamantina y de aire reverso.

Estas bases fueron depuradas antes de su procesamiento, dejando sólo aquellas muestras de 1,5 m de longitud, cambiando a la mitad de su valor las mediciones que estaban bajo el límite de detección, seleccionando sólo litologías y alteraciones principales y dejando sólo 24 elementos químicos, seleccionados según su potencial valor económico (*económicos*), según su incidencia negativa en los procesos de extracción de la mena (*impurezas*) y *otros de interés*. Estos son: Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Plata (Ag), Oro (Au), Arsénico (As), Aluminio (Al), Fierro (Fe), Plomo (Pb), Antimonio (Sb), Cinc (Zn), Bismuto (Bi), Potasio (K), Rubidio (Rb), Litio (Li), Renio (Re), Azufre (S), Escandio (Sc), Selenio (Se), Uranio (U), Talio (Tl), Galio (Ga), Germanio (Ge), Vanadio (V) y Torio (Th). Luego de esta depuración, la cantidad de muestras se redujo a 74.997 en *Absorción Atómica* y a 3.454 en *Plasma de Acoplamiento Inductivo*, todas provenientes de sondajes diamantina.

En Figura 1, se observa la distribución de sondajes de ambas bases de datos.

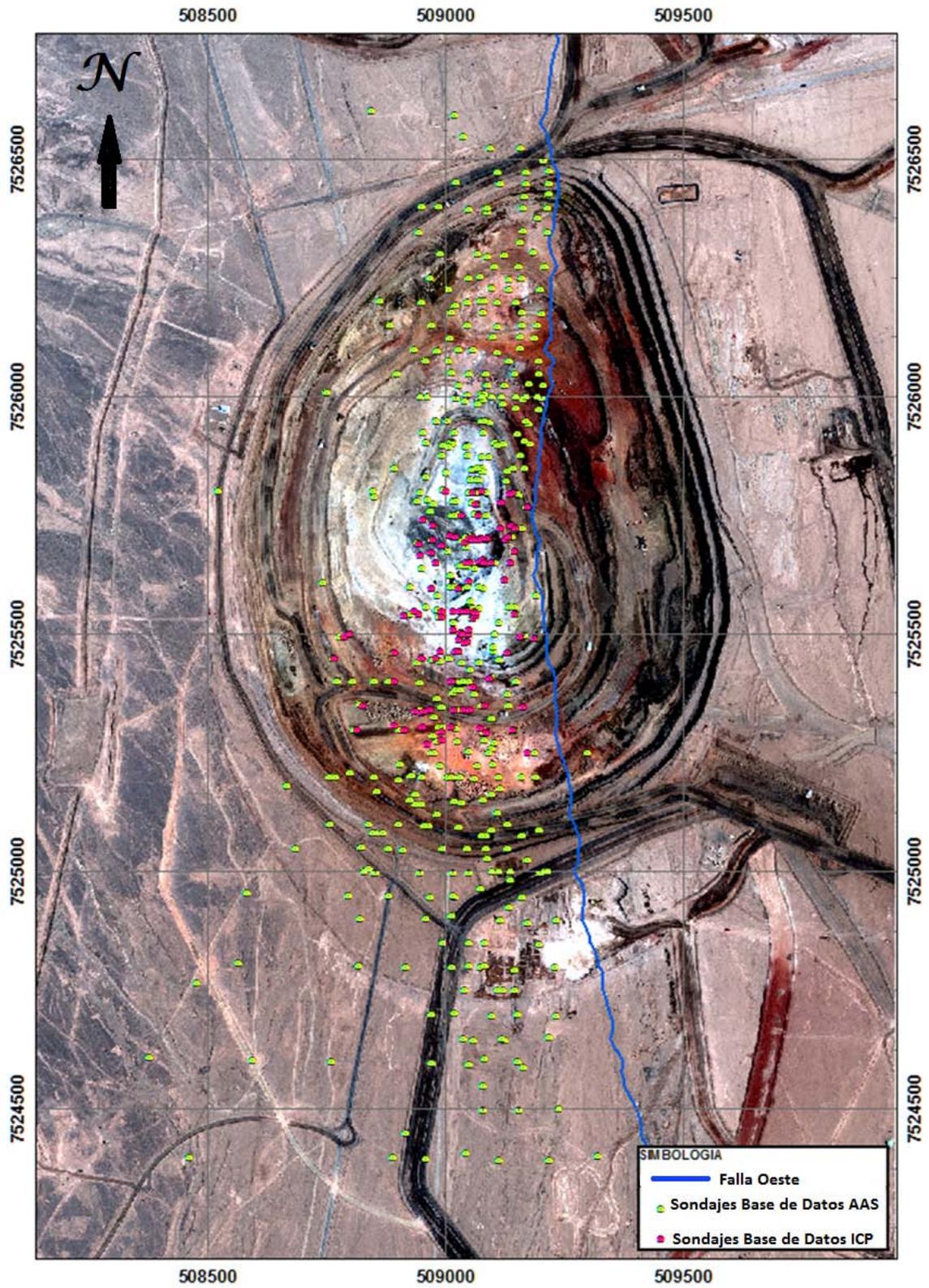


Figura 1. Distribución de sondajes campañas 2000-2009 en MMH central, (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo Distrital (GRMD), Codelco Norte).

Las principales limitaciones son:

- No se pudo utilizar una sola base de datos unificada debido a que al seleccionar sólo las muestras comunes de las analizadas por ambas metodologías, la cantidad de estas se reduce a un 30% en la base analizada por ICP y a un 2% en la analizada por AAS.
- Molibdeno, Antimonio y Oro, disminuyen la cantidad de sus mediciones a un 30% con respecto a la base de datos original de análisis por AAS, luego de que esta última fuera sometida a las etapas de filtrado y depuración.
- Sólo el 10%, aproximadamente, del conjunto de muestras de ambas bases estudiadas se encuentran en la zonas profunda de MMH central, en particular bajo la cota final del rajo proyectada a 1.800 m s.n.m.
- En las bases de datos, las muestras al no ser selectivas, sólo informan de la alteración dominante, pero no acerca de otras alteraciones que pudiesen estar presentes.

## **1.4 UBICACIÓN Y ACCESO**

Mina Ministro Hales (MMH), se localiza en la Provincia de El Loa, Región de Antofagasta, Chile, 7 km al norte de la ciudad de Calama y a 9 km al surde la mina Chuquicamata. Las distancias aproximadas, en línea recta, desde Santiago y desde Antofagasta son 1.230 km y 200 km, respectivamente. Para acceder desde Antofagasta se toma la Ruta 26, accediendo luego a la Ruta 5 Norte para desde ahí, empalmar con la Ruta D25 que llega directamente a Calama. Desde esta ciudad hay que dirigirse al norte por la Ruta D24 (que también conduce a la mina Chuquicamata) y desde ahí tomar la variante que va directamente hasta el camino concesionado por Codelco ingresando directamente a la mina Ministro Hales (Figura 2).

El yacimiento MMH se encuentra bajo una cobertura de, aproximadamente, 20 a 30 m de gravas aluviales y se extiende por unos 7 km, en sentido norte-sur, con un ancho variable entre 200 y 320 m (Zúñiga, 2012). El cuerpo mineralizado está limitado en su flanco oriental por la Falla Oeste perteneciente al Sistema de Falla de Domeyko.

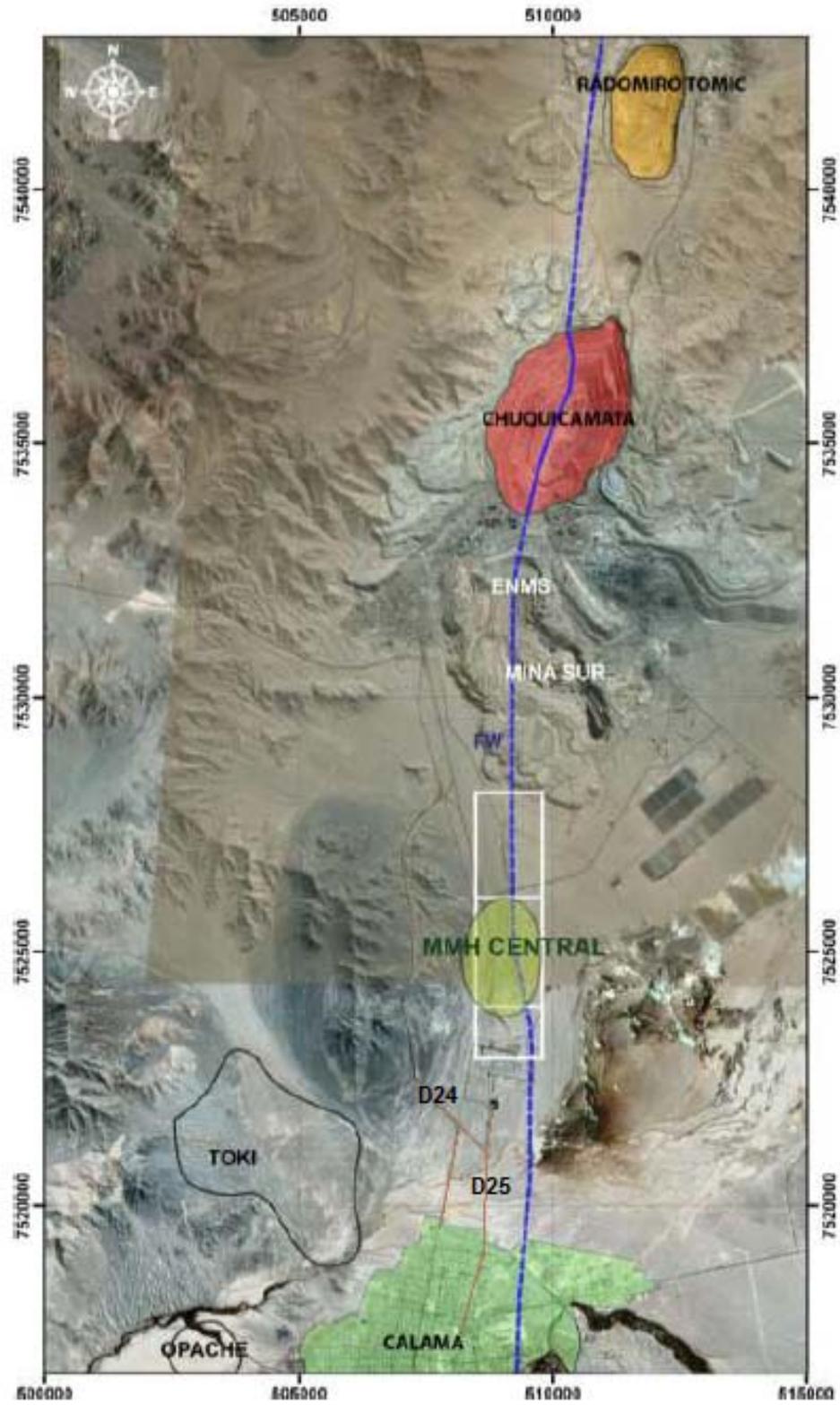


Figura 2. Ubicación y acceso a MMH central (modificado de Zúñiga, 2012).

## 1.5 TRABAJOS ANTERIORES

En el año 1993 se desarrolló, por parte de la Superintendencia de Geología División Chuquicamata, el primer modelo geológico de estimación de recursos del sector MMH. En él se contemplaba explotar a rajo abierto y lixiviar unos 2,2 Mt de cobre fino (Lowell, 1993). En 1995, Sergio Rivera actualizó el modelo geológico representándolo en 28 secciones EW a escala 1:1000, el cual, entre los años 1996 y 1998, se fue utilizado para estimaciones geoestadísticas, que indicaron un potencial de recursos minerales entre 475 y 584 millones de toneladas (Müller y Quiroga, 2000).

Müller y Quiroga (2000) entregaron un modelo geológico actualizado del yacimiento, sustentado en el re-mapeo de aproximadamente 9.000 m de testigos de roca, en la interpretación geológica de 6 secciones tipo, a escala 1:500, entre las coordenadas 25.400N y 25.900N y en desarrollos subterráneos en los niveles 2.200 y 2.100 m s.n.m. Además, utilizando registros geológicos de la mineralización definieron unidades geológicas de estimación (UGE) que finalmente dio por resultado una estimación geoestadística, que indicaba 511 Mt de recursos con ley CuT de 1,04%, 776 ppm de As y 18 g/t de Ag (esto para una ley de corte de 0,25% Cu), asegurando con ello la viabilidad de explotación del yacimiento MMH.

El año 2003, la Superintendencia de Geología Distrital, actualizó nuevamente el modelo geológico. Para ello generó 88 secciones EW, con interpretaciones de litología, estructuras, alteración, UGE y pisos de con ley CuT 1,04% para una ley de corte 0,25%.

Tobey (2005) realizó un completo y detallado estudio mineral-químico y dataciones en muestras especiales para el depósito MMH.

El año 2006 se realizó una nueva actualización de estimación de recursos y luego, durante el año 2009 en un trabajo liderado por Jaime Díaz, se emitió la última estimación de recursos efectuada para MMH Central arrojando valores de: 1,06 Mt con ley 0,945 % CuT, 13 g/t de Ag, 73 ppm Mo y 451 ppm As.

Zúñiga (2012) efectuó un trabajo de memoria de título, donde estudió la ocurrencia y distribución de Molibdenita, Esfalerita y Galena en la parte central- sur de MMH.

Finalmente, M. Zentilli, entre los años 2011 y 2012 entregó un estudio mineral-químico-petroquímico para muestras especiales y dataciones del yacimiento MMH.

## 1.6 METODOLOGÍA

Para poder someter a análisis la información contenida en las bases de datos, estas se depuraron, dejando sólo muestras con soporte de 1,5 m y en aquellos casos cuya concentración no superó el límite de detección se dejó la mitad de ese valor. Se seleccionaron sólo las litologías principales en cuanto a su participación en los procesos de alteración-mineralización que dieron origen al depósito mineral: Andesita (AND), Granodiorita MM (GRMM), Diques de Pórfido Dacítico (DPD), Pórfido Feldespático (POF), Pórfido MM (PMM), Pórfido Cuarzífero (POC) y Brecha Hidrotermal (BH). Se mantuvieron las alteraciones dominantes, con la salvedad de la denominada alteración silíceá (SIL), que al ser componente principal de la Agilización Avanzada (Rojas, 2005) se incorporó a ella. De este modo, las alteraciones dominantes son: Propilítica, Potásica, Fílica, Argílica y Argílica Avanzada.

Para depurar las bases de datos se utilizó *Microsoft Excel* y para procesar los datos y generar figuras *Caja y Bigote* se utilizaron *STATISTICA 8,0* e *ioGAS-64*, respectivamente.

Los datos de ambas bases, *Absorción Atómica* e ICP, se llevaron a su logaritmo natural, se retiraron valores *extremos*, con los que se obtuvieron estadígrafos univariados comparando sus concentraciones con el valor *Clarke* y se construyeron diagramas *caja y bigote* de elementos seleccionados para mostrar su relación con la litología principal, alteración dominante y minerales de mena en MMH central. Se realizó un análisis bivariado utilizando la técnica de *Pearson* y se obtuvo la matriz de correlación entre los elementos químicos por separado, para ambas bases de datos. Luego, se realizó un análisis multivariado con el software *STATISTICA 8,0*, aplicando el método de las Componentes Principales, seleccionando aquellos factores cuya varianza explicada se encontraba alrededor del 70%. A las Componentes Principales, con la finalidad de facilitar la interpretación de sus resultados, se les aplicó rotación *Varimax*. Esta técnica es uno de los cuatro métodos para rotar ortogonalmente las cargas de los factores iniciales halladas por Componentes Principales y lo hace girando solidariamente los ejes hasta aproximarlos a las variables correlacionadas, redistribuyendo la varianza explicada entre los factores lo que acentúa la relación que se establece entre ellos facilitando la interpretación de la estructura de los datos.

## **II. GEOLOGÍA**

### **2.1 MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL**

El distrito minero Chuquicamata contiene una de las principales agrupaciones de reservas cupríferas de categoría mundial, destacando los depósitos minerales de Chuquicamata, Radomiro Tomic (RT), Mina Ministro Hales (MMH) y Mina Sur. La distribución y ocurrencia de estos depósitos estarían controladas por la Falla Oeste, perteneciente al Sistema Estructural Falla Domeyko de carácter regional (Maksaev y Zentilli, 1988). Considerando esta estructura como divisoria, el distrito puede dividirse en dos bloques, uno oriental y otro occidental, de ambientes geológicos claramente diferenciados (Figura 3) (Maksaev y otros, 1994). En el bloque oriental predominan rocas volcánicas e intrusivas estériles Paleozoico-Triásicas, entre ellas, la Granodiorita Este, la Granodiorita Elena, los Estratos de Cerros de Chuquicamata y el Complejo Metaplutónico de Cerros de Chuquicamata. Por otra parte, el bloque occidental, donde se encuentra el depósito MMH, está conformado por rocas metamórficas e intrusivas Paleozoicas, por estratos volcánico sedimentarios del Carbonífero Superior al Triásico Medio (Formación Collahuasi y Estratos de Quetena) y por rocas volcánicas y volcánico-sedimentarias de edades Triásicas a Eocenas (Grupo Caracoles, Formación Cerritos Bayos, Formación Quebrada Mala y Formación Icanche). Estas rocas se disponen en dirección norte-sur en un claro control estructural y se encuentran cortadas transversalmente por dos unidades intrusivas: Diorita Los Picos y Complejo Intrusivo Fortuna.

Aproximadamente un 60% de toda la extensión areal del distrito está cubierto por depósitos de gravas aluviales, sedimentitas lacustres y aluvio-coluvio de edades Mioceno-Reciente.

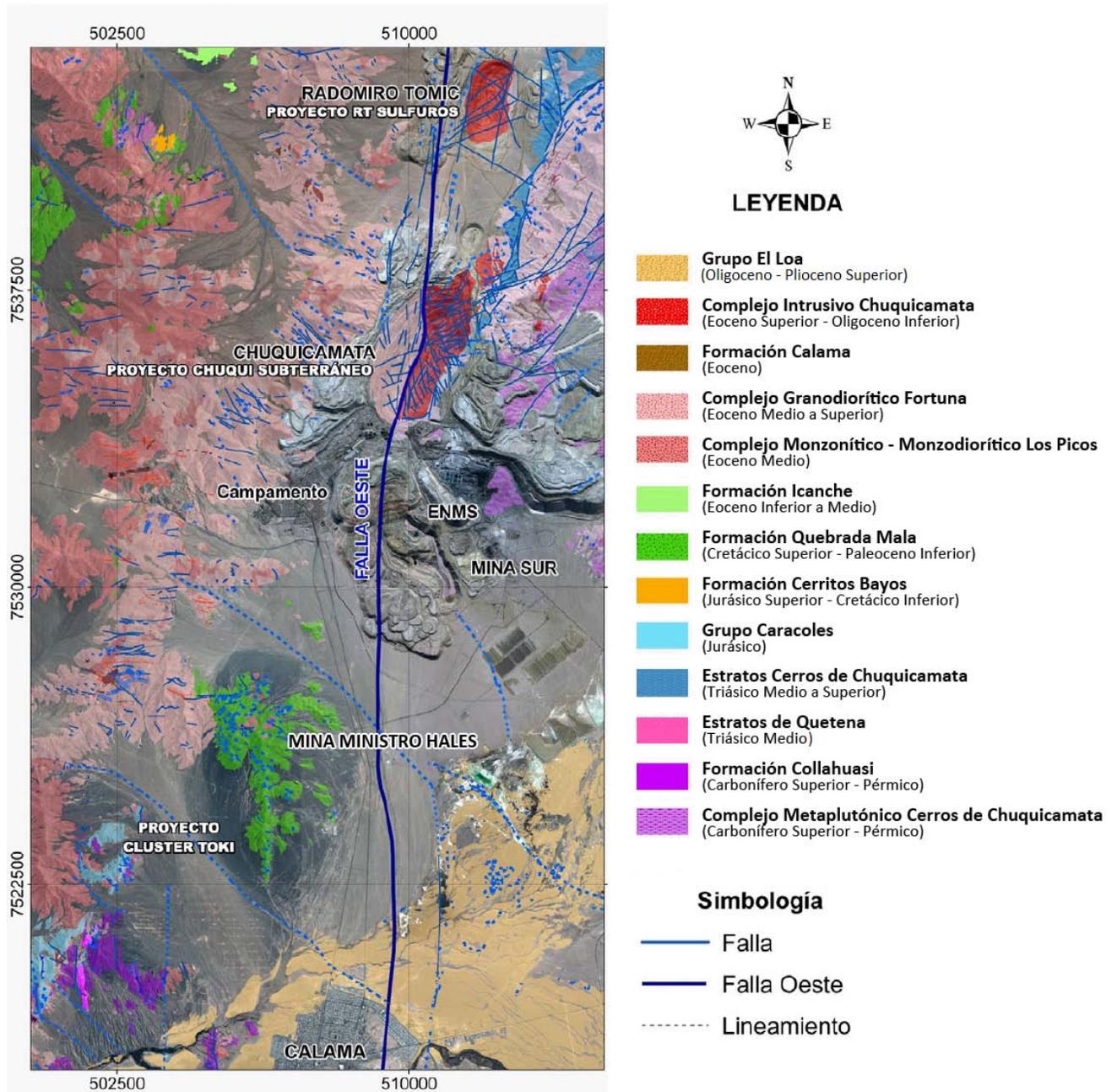


Figura 3. Geología Distrital (Modificado de Díaz, 2009).

En la Figura 3 se muestra la geología distrital con las unidades que se describen a continuación.

## **2.1.1 UNIDADES METAMORFICAS**

### **Carbonífero Superior-Pérmico**

Complejo Metaplutónico de Cerros de Chuquicamata (Carbonífero Superior – Pérmico) (Marinovic y Lahsen, 1984, enmend. Tomlinson *et al.*, 2010): en la zona está constituido por tres unidades. La primera está constituida esencialmente por dioritas y dioritas cuarcíferas de hornblenda, localmente gneisicas y esquistos de hornblenda y biotita migmatítica; se encuentra intruida por los granitoides triásicos. La segunda Unidad se compone de tonalitas de biotita, leucocráticas, inequigranulares de grano medio a grueso y corresponde a la Tonalita Cere. La última unidad corresponde a un conjunto de monzogranitos y metagranitos leucocráticos de microclina y biotita, de grano medio a grueso, levemente gnéisicos; corresponde al Granito Mesa y está intruida por la primera unidad. (Zúñiga, 2012)

## **2.1.2 UNIDADES ESTRATIFICADAS**

### **Paleozoico-Triásico**

Estratos de Quetena (Lira, 1989): se caracteriza por ser una secuencia de rocas metasedimentarias siliciclásticas de granulometría fina a gruesa que afloran al lado oriental del yacimiento Quetena. La edad probable de esta unidad según dataciones realizadas por Tomlinson en 2005 correspondería probablemente al límite entre el Paleozoico Superior y el Triásico Inferior – Medio.

Estratos de Cerros de Chuquicamata (Tomlinson et al., 2001) (Triásico Medio a Superior en Zuñiga, 2012): corresponde a una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias continentales, constituidas por dacitas, andesitas, y riolitas porfídicas, la parte superior de la secuencia contiene a areniscas, conglomerados con intercalaciones de limonitas, lutitas y algunos niveles calcáreos. Afloramientos de esta Unidad se encuentran al nororiente de la mina Chuquicamata y al lado oriental de la mina Radomiro Tomic.

### **Jurásico -Cretácico Inferior.**

Formación Cerritos Bayos (Jurásico Superior – Cretácico inferior) (Lira, 1989): es una secuencia de rocas carbonatadas de facies detríticas y pefíticas intensamente plegadas y falladas, sobreyaciendo en concordancia a rocas sedimentarias continentales de la Formación Agua Dulce. Aflora al poniente de la Falla Oestey.

Grupo Caracoles (Jurásico) (García, 1967; ampliado Ramirez y Gardeweg, 1982; Marinovic y Lahsen, 1984): está constituido por calizas, calcilutitas, lutitas, areniscas calcáreas, y calcarenitas con fósiles.

### **Cretácico Superior-Terciario**

Formación Quebrada Mala (Cretácico Superior – Paleoceno Inferior) (Montaño, 1976 en Zúñiga 2012): es una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias de origen continental, separadas en dos miembros, uno inferior con predominancia de rocas volcano sedimentarias y otro superior de rocas volcánicas (Vergara y Thomas, 1984 en Alcota y otros, 2009). Afloramientos de esta Formación se encuentran al noroeste de la ciudad de Calama y en las cercanías del yacimiento Mina Ministro Hales.

Formación Icanche (Maksaev, 1978, publicado en Ortega y otros, 2006): corresponde a una secuencia de Andesitas porfídicas, aglomerados y tobas dacíticas parcialmente silicificadas de a lo menos 500 m de potencia; se le asigna una edad eocénica. Aflora en el Cerro Icanche y en el distrito se distribuyen en una franja discontinua de dirección norte-sur, en las proximidades de la traza principal de la Falla Oeste.

### **2.1.3 ROCAS INTRUSIVAS**

Las rocas intrusivas reconocidas en el distrito se distribuyen en una marcada orientación nortesur, se asocian a eventos magmáticos acaecidos en el Paleozoico Superior-Triásico, Cretácico Superior-Paleoceno y Oligoceno.

#### **Intrusivos Paleozóicos.**

Estas rocas intrusivas paleozóicas conforman el basamento sobre el cual se depositaron las series estratificadas mesozoicas (Tapia, 1980, publicado en Ortega y otros, 2006).

Granodiorita Este (Renzetti, 1957): corresponde a un *stock* granodiorítico de biotita y hornblenda, de grano medio a grueso, con textura hipidiomórfica equigranular, de forma elongada noreste y de edad Triásica (Ossandón y otros, 2001 en Ortega y otros, 2006). Se le ha reconocido al noreste del rajo Chuquicamata (intruyendo al Complejo Intrusivo Chuquicamata), al este de la mina Radomiro Tomic y en el basamento de Mina Sur (intruyendo al Granito Mesa). Tiene una edad U-Pb en circón de  $229 \pm 1$  Ma (Tomlinson *et. al.* 2001).

Granodiorita Elena (Renzetti, 1957): es un *stock* granodiorítico, color gris rosa, de textura hipidiomórfica granular con facies porfídica marginales alteradas, con escasa mineralización y vinculadas al pórfido Chuqui. Se expone, como pequeños cuerpos aislados, en las cercanías del

cerro Chuquicamata, al este del depósito Radomiro Tomic y en el basamento de Mina Sur. La determinación de la edad más reciente de U-Pb en circón indica una edad del Triásico de  $227\pm 2$  Ma (Tomlinson *et al.*, 2001), aunque en la zona del Carmen, al este de la mina Chuquicamata, esta unidad ha dado edades U-Pb en circón de  $233,1\pm 2,2$  y  $231,4\pm 2,0$  Ma (Proffett y Dilles, 2007).

## **Intrusivos Cenozoicos**

Complejo Monzonítico-Monzodiorítico Los Picos. (Thomas, 1978, enmend. Tomlinson y Blanco, 2008): corresponde a un conjunto de rocas que presentan variaciones composicionales desde monzonita cuarcífera a diorita cuarcífera, distribuidas en afloramientos aislados en una franja de orientación norte-sur, de, aproximadamente, 30 km de longitud y unos 7 km de ancho en el lado occidental de la Falla Oeste. En la Sierra de San Lorenzo se le encuentra al lado oeste del yacimiento Radomiro Tomic. Intruye a las Formaciones Collahuasi e Icanche y es intruida por el Complejo Granodiorita Fortuna. Aplicando el método K/Ar en biotitas se obtuvieron las siguientes edades:  $38,1\pm 1$  Ma (Ambrus, 1979),  $45,1\pm 1,8$  Ma (Thomas, 1978),  $43,4\pm 1,2$  Ma (Maksaev *et al.*, 1994), 34 a 40 Ma (Barra y otros, 2013).

Complejo Granodiorítico Fortuna (Eoceno medio-Eoceno Superior; 40 -37 Ma) (Rensetti, 1957): es un complejo ígneo que se ubica inmediatamente al oeste y suroeste del yacimiento Radomiro Tomic, contactándose estructuralmente por la falla Oeste con el Pórfido Chuqui (Ambrus, 1979). Está conformado por los intrusivos: Granodiorita Fortuna Clara (Maksaev *et al.*, 1978 en Ortega *et al.*, 2006) o Granodiorita Fiesta (Dilles *et al.*, 1997) en la Mina Chuquicamata, Granodiorita Fortuna Gris (Maksaev *et al.*, 1978 en Ortega *et al.*, 2006), también denominada Granodiorita Antena (Ambrus, 1979) en la Sierra de San Lorenzo y un conjunto de pórfidos principalmente granodioríticos, denominados Pórfidos San Lorenzo (Marinovic y Lahsen, 1984).

Complejo Intrusivo Chuquicamata (Ambrus, 1979; enmend. Ossandon *et al.*, 2001): este Complejo, que ocurre como un gran dique subvertical y cuya mineralización dio origen al yacimiento Chuquicamata, es una variedad de rocas monzograníticas a granodioríticas, color gris rosado, de textura porfídica con fenocristales de feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo y biotita, inmersos en una masa fundamental aplítica. Atendiendo a las variaciones texturales que presenta este complejo, se han diferenciado tres unidades: el Pórfido Este ( $34,6$  Ma por U- Pb en zircón, Ballard *et al.*, 2001), que corresponde a una granodiorita a monzodiorita cuarcífera, el Pórfido Banco ( $33,5$  Ma por U- Pb en zircón, Ballard *et al.*, 2001), un conjunto de cuerpos filonianos de pórfidos monzograníticos y el Pórfido Oeste ( $33,3$  Ma por U- Pb en zircón, Ballard *et al.*, 2001), un pórfido monzodiorítico

### **2.1.4 ROCAS SEDIMENTARIAS**

Formación Calama (Eoceno – Oligoceno Inferior, 52 – 31 Ma) (Naranjo y Paskof, 1981, enmend. Blanco *et al.*, 2003; Blanco, 2008): corresponde a una secuencia sedimentaria, detrítica

conformada principalmente por conglomerados. Esta Formación se ha dividido en dos miembros: el Miembro Topater y el Miembro Chorrillos. El primero de ellos contiene dos facies, una dominada por andesitas fuertemente fracturadas y diaclasadas y otra de brechas volcano-sedimentarias. El segundo miembro, se compone de una sucesión de conglomerados gruesos, de colores marrón anaranjado claro la mitad inferior y gris verdoso claro la mitad superior. Esta Formación se puede reconocer al este de la ciudad de Calama, en los Cerros de Topater y en el cauce del río Loa.

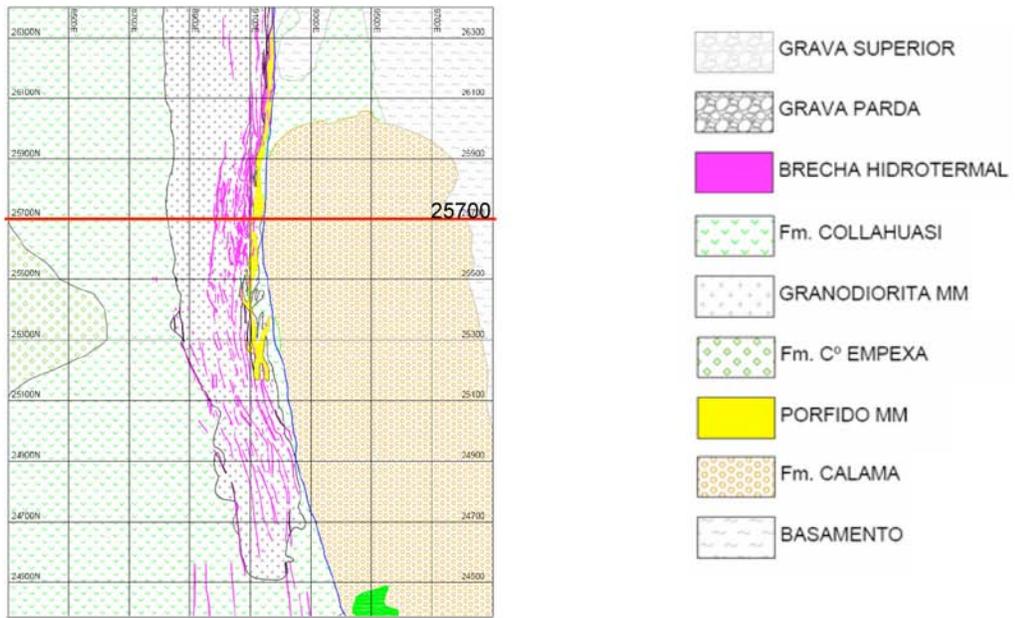
Grupo El Loa (Oligoceno – Plioceno Superior) (May, 1997; May *et al.*, 2005, enmend. Tomlinson y Blanco, 2008 en Zúñiga 2012): es una secuencia sedimentaria bien estratificada, que agrupa a un conjunto de otras Formaciones (Yalqui, El Yeso, Chiquinaputo, Lasana, Opache y Jalquinche). Es de carácter clástico y presenta notorios cambios de facies laterales y verticales; sus depósitos se encuentran en la antigua Cuenca Calama.

### **2.1.5 DEPOSITOS NO CONSOLIDADOS**

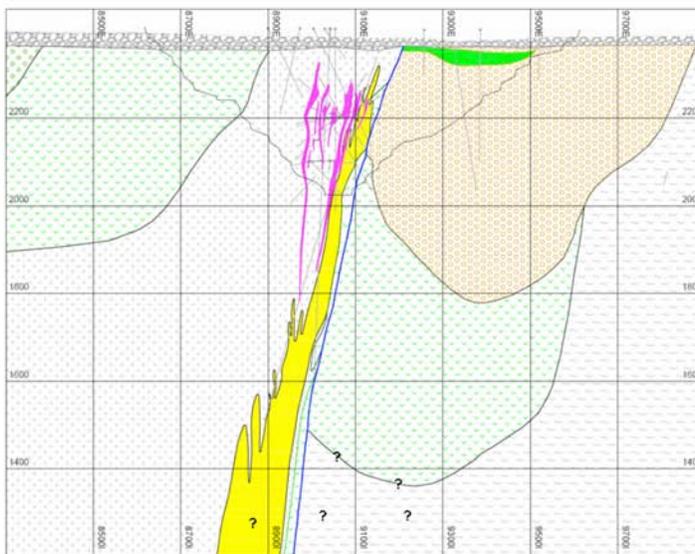
Esta unidad no formal comprende sedimentos fluviales, aluviales, coluviales y de piedemonte. Comprende llanuras y terrazas abandonadas generadas en estadios de inundación fluvial del río Loa y Depósitos Salinos de los salares Talabre y Del Indio También se incluyen en esta unidad los depósitos antrópicos correspondientes a suelos agrícolas situados sobre los depósitos fluviales del río Loa y los depósitos artificiales producto de la remoción de material en las faenas mineras del distrito.

## **2.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL**

En Mina Ministro Hales, de modo similar a lo que sucede a escala regional, hay dos ámbitos geológicos diferentes, ambos separados por la Falla Oeste, la estructura más relevante en el depósito. Al oeste de esta falla predominan rocas intrusivas emplazadas durante el Eoceno, asociadas a los procesos de alteración y mineralización primaria, así como afloramientos menores de rocas volcano-sedimentarias de edades Triásico al Paleoceno. A su vez, el bloque este de la falla está conformado mayoritariamente por rocas volcánicas e intrusivas estériles que son parte de un basamento Paleozoico-Triásico. En ambos lados de la falla hay una cobertura de gravas aluviales del Mioceno al Cuaternario, un alzamiento y erosión posteriores al emplazamiento de los principales depósitos minerales del distrito, contribuyeron a que se desarrollaran los procesos de mineralización supérgena durante el Mioceno. La Figura 4 muestra, en planta y sección, las unidades geológicas reconocidas en el sector central de Mina Ministro Hales.



NIVEL 2.200 m



SECCIÓN 25.700 N

Figura 4. Planta y Sección con Unidades Geológicas MMH sector central (Díaz, 2010).

## **2.2.1 LITOLOGÍA**

### **Rocas Volcánicas**

#### **Formación Collahuasi**

Corresponde a una secuencia de rocas volcánicas constituida por lavas y brechas andesíticas con intercalaciones de rocas sedimentarias, tobas y dacitas. Al lado este de la Falla Oeste, donde predominan las brechas andesíticas, esta secuencia sobreyace a rocas del basamento igneo-metamórfico constituyendo la base para la depositación de la Formación Calama, mientras que en el lado oeste de esta Falla, donde predominan flujos andesíticos y dacitas levemente porfídicas, la Formación Collahuasi se encuentra intruida por la Granodiorita MM de edad triásica. La roca de caja de la mineralización en MMH corresponde, tanto a las rocas andesíticas como a la Granodiorita MM.

La edad para esta formación probablemente es triásica o más antigua, ello porque dataciones U/Pb LAM-ICPMS en circones no fueron concluyentes (mostraron cuatro poblaciones de 450, 300, 250 y 230 Ma). Al correlacionar estas rocas con afloramientos de rocas expuestas en el sector del Cluster Toki, la edad asignada para esta Formación es Carbonífero Superior a Pérmico Inferior (Maksaev *et. al.*, 2014).

#### **Formación Cerro Empexa**

Esta unidad, reconocida parcialmente por sondajes en el borde occidental de MMH, corresponde a una secuencia de rocas volcánicas andesíticas con intercalaciones de conglomerados, areniscas sedimentarias y algunos niveles de tobas, la cual sobreyacen en discordancia angular a la Formación Collahuasi y es intruida por el Complejo Intrusivo Diorítico Los Picos del Eoceno Medio. Estudios regionales asignan a esta Formación una edad Cretácico Superior a Paleoceno Inferior (Tomlinson y Blanco, 2008, en Zúñiga, 2012). Corresponde a la Formación Quebrada Mala (Zúñiga, 2012).

#### **Complejo Igneo-Metamórfico de Cerros de Chuquicamata**

Corresponde a un basamento igneo y metamórfico constituido en su mayor parte por granitos asignados al Granito Mesa y por esquistos anfibolíticos, que se ubica en el bloque oriental de MMH. En el área de estudio esta unidad conforma el basamento de las rocas volcánicas de la Formación Collahuasi y rocas sedimentarias de la Formación Calama.

En los Cerros de Chuquicamata este complejo está constituido principalmente por granitos, dioritas y metadioritas migmatíticas (Tomlinson y Blanco, 2008, en Zúñiga, 2012).

Dataciones U/Pb en circón, por el método ID-TIMS, efectuadas en Granito Mesa, dieron como resultado una edad de  $296,9 \pm 2,1$  Ma; esta edad sería la de cristalización del granito (Tomlinson *et. al.*, 2001, en Zúñiga, 2012).

## Rocas Intrusivas

La secuencia de emplazamientos de rocas intrusivas en MMH, se inicia en el Triásico con la Granodiorita MM intruyendo a la Formación Collahuasi, de modo prácticamente simultáneo a como lo hacen también numerosos diques dacíticos y pórfidos feldespáticos; todos estos cuerpos se orientan en dirección norte-sur siguiendo la tendencia de orientación de la Falla Oeste. Durante el Eoceno estas unidades son intruidas por un complejo granodiorítico conformado por los pórfidos MM y Cuarcífero (Figura 5). La actividad intrusiva en MMH finaliza en el Oligoceno, con el emplazamiento de cuerpos tabulares de brechas magmático-hidrotermales que cortan a todas las unidades pre-existentes.

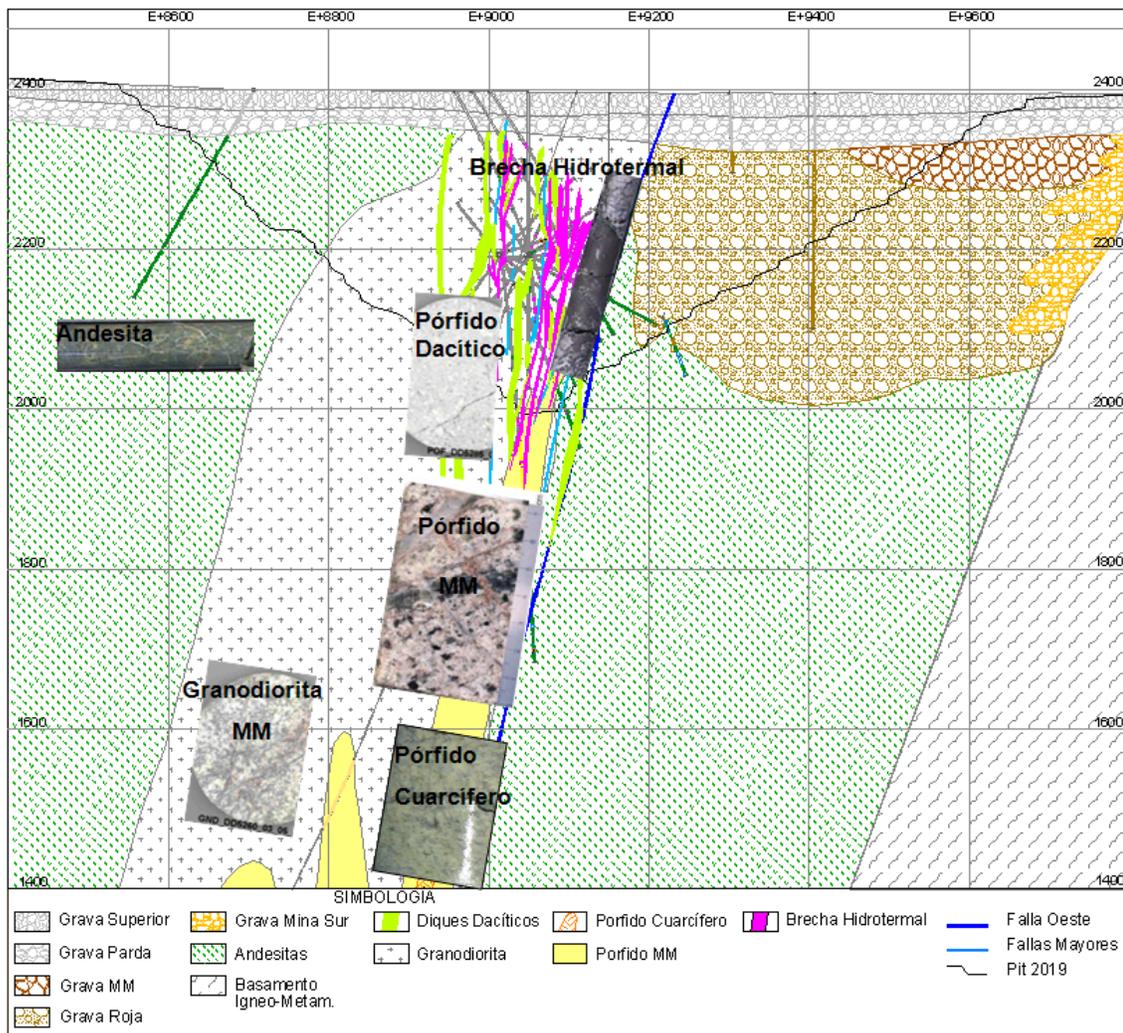


Figura 5. Litologías Principales de MMH Sección 25900 N. (Modificado de Becerra, 2009).

## **Granodiorita MM**

Este cuerpo intrusivo, de composición granodiorítica, intruye a la Formación Collahuasi y a su vez es intruida por numerosos diques dacíticos, por el Pórfido MM y es cortado por las Brechas Hidrotermales. Su forma en planta es elongada en dirección norte-sur, alcanzando unos 7 km a lo largo y su borde oriental se orienta subverticalmente en una actitud similar a como se encuentra la Falla Oeste. Utilizando el método U/Pb LAM-ICPMS en circones, para esta granodiorita se han determinado edades de  $233,6 \pm 1,5$  y  $224 \pm 5$  Ma (Bertens, 2001, en Rojas, 2005). Al este del depósito de Chuquicamata y en el sector Toki, se han reconocido granodioritas de similares composición y edad que esta Granodiorita MM.

## **Filones Dacíticos**

Estos cuerpos, cuyo emplazamiento está controlado por fallas mayores de rumbo norte-sur, intruyen a la Formación Collahuasi y a la Granodiorita MM y son atravesados por las Brechas Hidrotermales; no se ha determinado aún su relación con el Pórfido MM. A estos filones se les asigna una edad Triásica Tardía (similar a la Granodiorita MM), esto en base a dataciones efectuadas en dos muestras de dacita mediante el método U/Pb LAM-ICPMS en circones, que dieron edades de  $237,6 \pm 1,4$  y  $222 \pm 4,9$  Ma (Bertens, 2001, en Rojas, 2005).

## **Pórfido MM**

Este intrusivo (Figura 6), cuyo emplazamiento presenta evidencias de haber sido controlado por un sistema estructural paralelo a la Falla Oeste, en la parte alta del sector oriental de MMH corresponde a un apófisis adosado a esta Falla; es subvertical y elongado en sentido norte-sur. En su tramo superior está cortado por *pebble dikes* y presenta una intensa Alteración Fílica y Argílica que oblitera su textura confundiendo con las rocas granodioríticas de intensa alteración y mineralización. En el sector sur de MMH Central este pórfido se aleja de la Falla Oeste y se le encuentra a una cota más baja que más al norte.

En las zonas profundas, donde esta unidad sólo se ha reconocido parcialmente, presenta textura porfídica, intensa Alteración Potásica manifestada por vetillas tempranas de biotita cortadas por vetillas de cuarzo tipo A, abundante feldespato potásico bordeando fenocristales de Plagioclasa y también en vetillas. Presenta mineralización de Bornita-Calcopirita-(Digenita) en vetillas EDM (*early dark micaceous*) y SGV (Sericita Gris Verde) y Molibdenita relleno de fracturas y en vetillas de cuarzo. No se ha reconocido con certeza el núcleo central de mineralización-alteración de este pórfido.

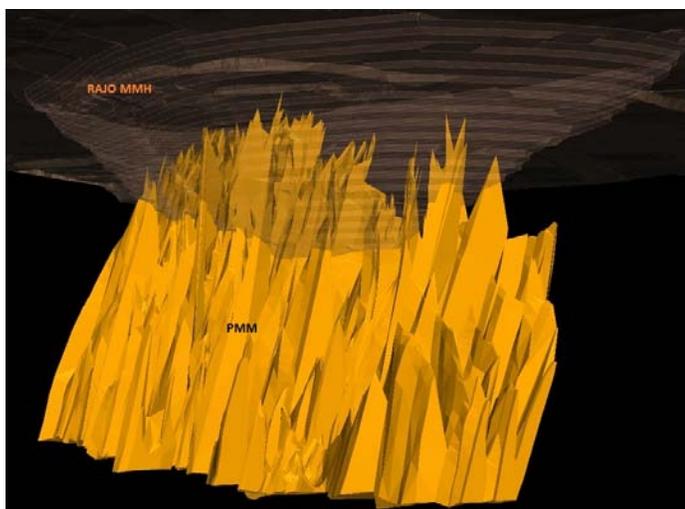


Figura 6. Pórfido MM (PMM), Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo Distrital (GRMD), Codelco Norte.

La edad de este intrusivo se ha determinado en  $38,9 \pm 0,4$  Ma (Eoceno Medio) (Rojas, 2005), utilizando el método U/Pb LAM-ICPMS en circones.

### **Pórfido Cuarcífero**

Este pórfido (Figura 7), que aún no ha sido bien reconocido, estaría emplazado en la parte central y baja del Pórfido MM. Es de textura porfídica con *ojos* y fenocristales de cuarzo inmersos en una masa fundamental obliterada por una intensa Alteración Potásica constituida por Sericita gris verdosa, feldespato potásico y Anhidrita. Está mineralizada con Calcopirita y Bornita diseminada en vetillas tipo SGV (Sericita Gris Verde) y en vetillas tempranas de cuarzo.

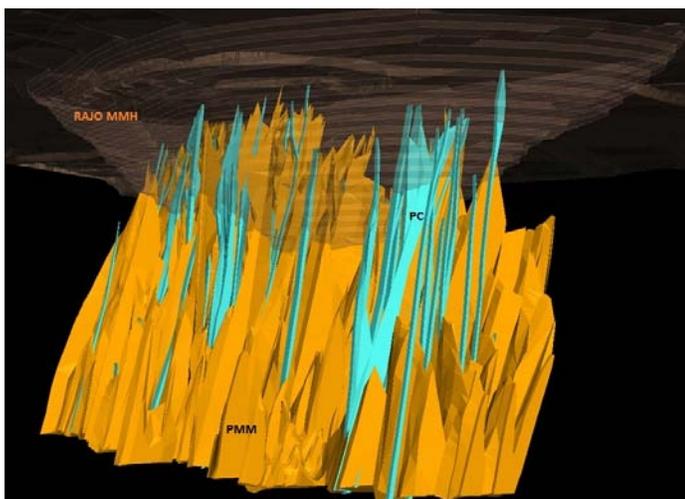


Figura 7. Pórfido Cuarcífero (PC) intruyendo al Pórfido MM (PMM) (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo Distrital (GRMD), Codelco Norte).

Se le asigna una edad Eoceno Tardío, en base a una datación realizada por el método U/Pb LAM-ICPMS en circones de  $35,53 \pm 0,58$  Ma (Bertens, 2001, en Rojas, 2005).

### Brechas Hidrotermales

Estos cuerpos (Figura 8) están íntimamente relacionados al principal centro de alteración-mineralización tardío del yacimiento. Se distribuyen en la parte superior del depósito como cuerpos tabulares subverticales, adoptando una orientación similar a la de la Falla Oeste y a aquellos sistemas de fallas mayores que tienen rumbo aproximado norte-sur en la parte central variando a noroeste sureste en el sector sur. Estas brechas las habrían generado fluidos hidrotermales que ascendieron por las estructuras mayores y por los bordes de contacto con los Diques Dacíticos, fragmentándolos para incorporarlos como clastos en su matriz hidrotermal. Estas unidades cortan a la Granodiorita MM, a los Diques Dacíticos y al Pórfido MM, relacionándose con este último principalmente en su parte superior y externa.

Los fragmentos de la brecha, predominantemente de composición dacítica, están total o parcialmente inmersos en una matriz hidrotermal, la cual contiene sulfuros y sulfosales de cobre de alta sulfidización. Estas se caracterizan por manifestar una avanzada Alteración Argílica Avanzada representada por Sílice, Alunita, Pirofilita, Sericita y Dickita. La mineralogía en estas brechas presenta una zonación vertical, con Pirita-Calcopirita-Bornita-Digenita en las zonas inferiores y Pirita-Calcosina-Enargita-Tenantita-Argentita-Proustita-Covelina en las zonas medias y superiores. Las alteraciones asociadas a estas zonaciones son del tipo Argílico Avanzada, típicas de sistemas de alta sulfidización y son las responsables de las altas leyes de Cobre, Arsénico y Plata. Estas Brechas Hidrotermales de MMH se han agrupado en cuatro grandes unidades: Brecha Central, siendo esta la de mayor valor económico, Brecha Myriam, Brecha Sur y Brecha Oeste. Dataciones Ar/Ar en Alunita y Re/Os en molibdenitas indican que estos cuerpos de brecha se habrían emplazado en el Oligoceno Inferior (Bertens, 2006, en Rojas, 2005).

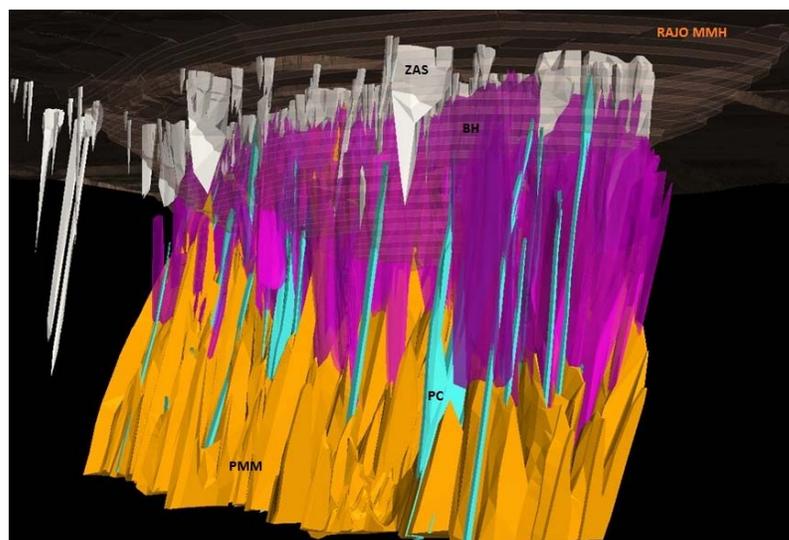


Figura 8. Brechas Hidrotermales (BH), (Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo Distrital (GRMD), Codelco Norte).

## **Brechas Fluidizadas y *Pebble Dikes***

Estas estructuras, post-mineralización, corresponden a una serie de cuerpos menores tipo diques con formas tabulares, adosados a la Falla Oeste y siguiendo su misma tendencia estructural. Tanto las brechas fluidizadas como los *pebble dikes* atraviesan a todas las rocas incluso a las Brechas Hidrotermales y a las zonas mineralizadas del sistema porfídico. Ambas unidades están conformadas por abundantes guijarros, algunos de Granodiorita MM mineralizada y en menor abundancia por Brechas Hidrotermales, insertos una matriz clástica sericitizada. (Díaz, 2010).

## **Rocas Sedimentarias**

### **Conglomerados Brechosos**

Corresponden a una secuencia de conglomerados estratificados rellenando una cuenca desarrollada sobre volcanitas permotriásicas y sobre el basamento ígneo-metamórfico del Paleozoico. Estos conglomerados se encuentran en el lado este de la Falla Oeste.

Petrográficamente se clasifican como conglomerados brechosos polimícticos, clastos soportantes, pobremente consolidados y disgregables, clastos subredondeados a subangulosos, matriz con grado de madurez bajo a medio y constituida por clastos polimícticos de tamaño arena muy gruesa, arena fina y limo. En esta unidad se pueden distinguir: Conglomerados Brechosos Rojos, con dominio de Hematita (más del 60% de este mineral en el cemento); Conglomerados Brechosos MM con dominio de Jarosita y Goethita (sobre el 30% del cemento es Goethita); Conglomerados Brechosos Exóticos predominando los minerales oxidados de cobre (mayoritariamente Crisocola y *copper wad*) y finalmente Conglomerados Brechosos Negros con predominio de óxidos de manganeso. Por sus características petrográficas estos Conglomerados Brechosos se han correlacionado con el Miembro Chorrillos de la Formación Calama del Eoceno. Una datación efectuada a un clasto de diorita cuarcífera por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , dio una edad de  $44,9\pm 0,4$  Ma, indicando una edad máxima Eocena para estos conglomerados. (Zuñiga, 2012).

### **Gravas Modernas**

Estas gravas cubren a los Conglomerados Brechosos y a las litologías de MMH Central, distribuyéndose en ambos lados de la Falla Oeste. Estas se diferencian en dos subunidades: Grava Parda, descrita como una unidad monomíctica de carácter aluvial correlacionable con la Formación Sichal del Mioceno y una Grava Superior, compuesta por sedimentos recientes de origen aluvial, polimícticos, alcanzando una potencia de 20 a 30 m en MMH Central y dispuesta subhorizontalmente sobre la Grava Parda.

## 2.2.2 ESTRUCTURAS

La zona donde se encuentra el depósito MMH está dentro del Sistema de Falla de Domeyko y uno de estos sistemas, de orientación norte-sur similar al de la Falla Oeste (Figura 9), es el que se relacionaría y que habría controlado el emplazamiento y la forma del yacimiento MMH. Esta Falla Oeste en la zona de MMH presenta salbanda gris-roja, potencia de un metro y se orienta con rumbo N-S a N15°W e inclinación 75° a 80° al oeste.

Se han identificado otras estructuras mayores del sistema estructural en MMH, tales como las Fallas Negras (Central Este), Central Oeste y Myriam, todas estas fallas con rumbo aproximado norte-sur y ubicadas en el bloque occidental de la Falla Oeste. Una zona de cizalle generada entre las fallas Oeste y Negra habría favorecido el ascenso de diques de Pórfido MM, de *pebble dikes* y de brechas de fricción.

Como fallas secundarias en el yacimiento se cuentan los sistemas Irene, Marlen y Cecilia, orientados W-NW, NW y N-NE, respectivamente.

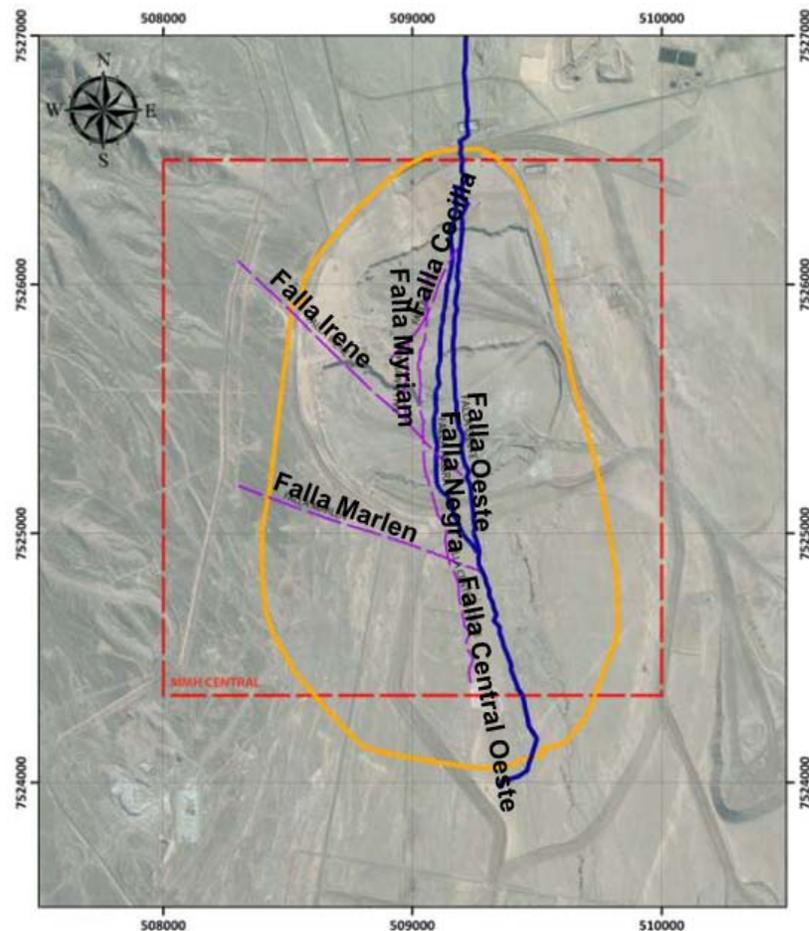


Figura 9. Fallas en superficie de MMH Central (Modificado de Zúñiga, 2012).

## 2.3 ALTERACIÓN Y MINERALIZACIÓN

El yacimiento MMH es el resultado de sucesivas etapas de alteración-mineralización, siendo un depósito tipo pórfido cuprífero de Cu-Mo que evoluciona a un sistema de alta sulfidización con la formación de Brechas Hidrotermales mineralizadas con Cu, Ag y As. Quienes aportan la mineralización son fluidos hidrotermales relacionados a los pórfidos MM y Cuarcífero, emplazados en la Granodiorita MM y las rocas volcánicas del basamento.

### Alteración y Mineralización Potásica

La alteración y mineralización Potásica está vinculada al núcleo del Pórfido MM, en las partes más profundas del yacimiento, donde puede identificarse parcialmente, por asociaciones de feldespatos potásico, Anhidrita, Sericita y Biotita secundaria subordinada. Este evento genera vetillas de cuarzo tipo A con halos de feldespatos potásico, vetillas con Sericita Gris Verde (SGV), vetillas de biotita temprana (EDM) y un núcleo de Bornita con cantidades variables de Calcopirita, Pirita, Idaíta, Digenita, Calcosina primaria y Magnetita; esta última asociada con Hematita y Rutilo. Se ha detectado Molibdenita tanto en *smears* como en vetillas de cuarzo que serían posteriores a las del tipo A. Esta etapa se habría iniciado en el Eoceno, luego de haberse emplazado el Pórfido MM ( $38,9 \pm 0,4$  Ma datado con U/Pb), lo que está respaldado por una datación Re/Os en Molibdenita que arrojó  $37,3 \pm 0,1$  Ma (Tobey, 2005).

### Alteración y Mineralización Fílica

La Alteración Fílica, se vio favorecida por la canalización de los fluidos hidrotermales por los sistemas de estructuras mayores asociadas a la Falla Oeste. Su intensidad produjo la destrucción, reemplazo y removilización de la mineralización temprana. En esta etapa hay un importante aporte de pirita, principalmente en vetas y vetillas tipo D de pirita con halo sericítico, asociado a una fuerte alteración hidrolítica con destrucción del feldespatos potásico y con biotita reemplazada por sericita. El desarrollo de esta etapa de Alteración Fílica aconteció a los 32,5 Ma (Zentilli, 1994 en Rojas, 2005).

### Alteración y Mineralización Argílica

La alteración y mineralización Argílica, de difícil individualización por la superposición destructora de la alteración Argílica Avanzada, se caracteriza principalmente por la asociación Caolín-Montmorillonita-Sericita y una mineralización de Pirita, Calcosina, óxidos de hierro y cantidades menores de Covelina.

## **Alteración y Mineralización Argílica Avanzada (Alta Sulfidización)**

Esta etapa aporta la mineralización económica de mayor importancia al yacimiento, al producirse un enfriamiento del sistema e incrementar su estado de sulfidización, lo que generó asociaciones Pirita-Bornita-Digenita, Pirita-Enargita-Tenantita-Digenita y Pirita-Covelina. Simultáneamente con esta depositación de sulfuros se desarrolló una fuerte actividad hidrolítica, que originó una Alteración Argílica Avanzada, localizada principalmente en las partes centrales altas del depósito, en sobreimposición a asociaciones de alteración mineralización más tempranas y caracterizada por abundante Alunita, Pirofilita, Caolinita y Sílice. Los fluidos que participaron de esta fase tardía, dieron origen a Brechas Hidrotermales que aportaron abundantes contenidos de S, Cu, Fe, As, Ag, Zn y en menor cantidad Sb y Au. Dataciones por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  *STEP HEATING* en Alunita hipógena datan el desarrollo de la alteración hidrotermal Argílica Avanzada en  $31.41 \pm 0,15\text{Ma}$ . (Bertens, 2001 en Rojas, 2005)

## **Mineralización Supérgena.**

Este proceso que normalmente incrementa notoriamente el potencial económico de los yacimientos, en MMH no es relevante, pues el enriquecimiento secundario se remite a una pátina sobre pirita donde el reemplazo es escaso a nulo (Rojas, 2005).

La mineralización supérgena que generó el enriquecimiento secundario, en MMH se caracteriza por la presencia de sulfuros, óxidos y de zonas mixtas (coexistencia de ambos). Al este del depósito, en el bloque oriental de la Falla Oeste, se ha identificado un cuerpo de gravas con mineralización exótica, principalmente con *copper wad*, Crisocola y Atacamita, que se habrían generado por procesos de oxidación-lixiviación. Dataciones en Alunita supérgena por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  *STEP HEATING* (Bertens, 2001 en Rojas, 2005) le asignan una edad de  $23,16 \pm 1,85$  Ma.

En Figura 10 se representan asociaciones de alteración-mineralización en una sección de MMH sector central.

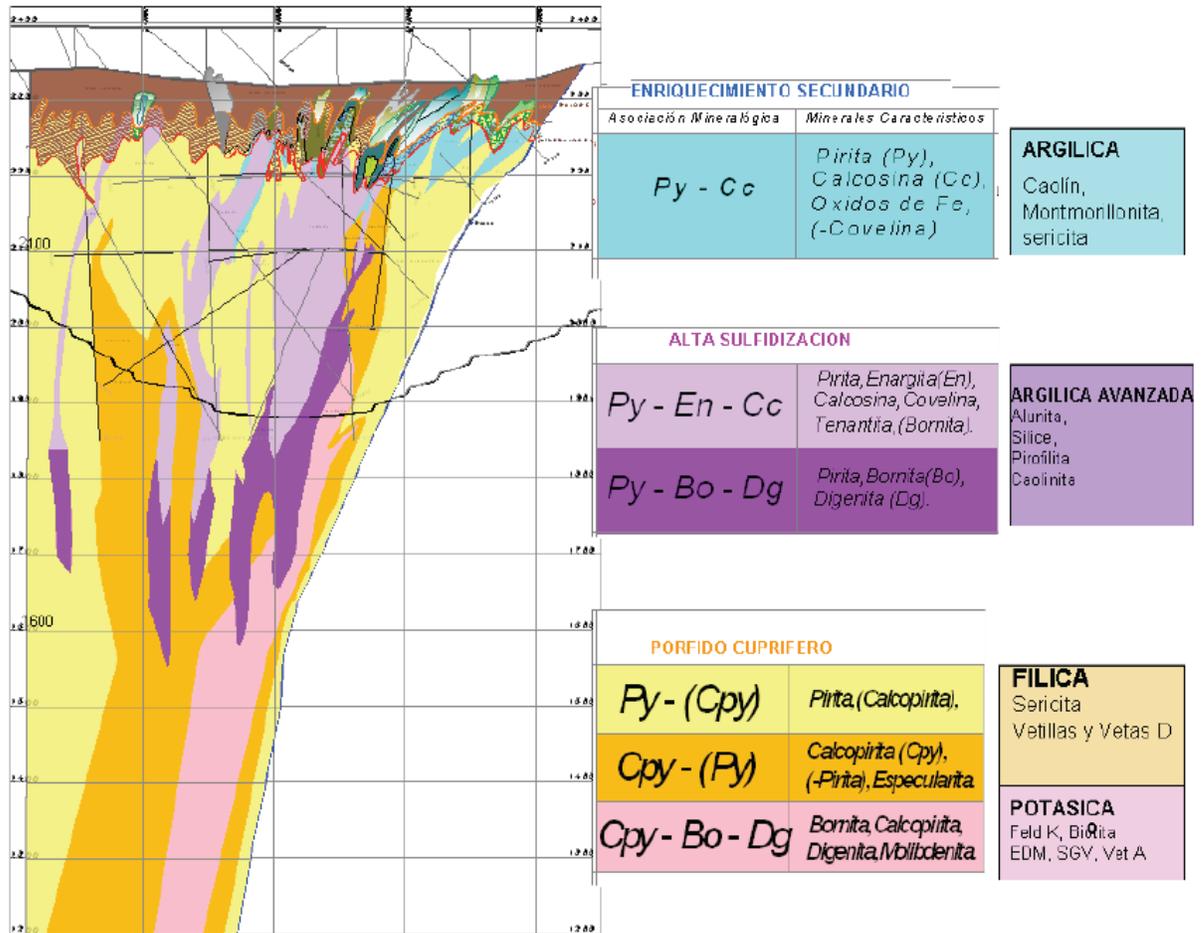


Figura 10. Alteración-Mineralización en Sección 7.525.400 N (Díaz, 2010).

## III. GEOQUÍMICA

### 3.1 ANALISIS ESTADÍSTICO

Mediante la aplicación de técnicas estadísticas es posible analizar la información de un gran volumen de datos, obteniendo parámetros cuyos resultados representan variabilidad, similitud y discrepancias entre los distintos elementos químicos que son el objetivo de este estudio. Estas técnicas, sea para su aplicación o para una mejor representatividad de las observaciones, parten del supuesto de que los datos se ajustan a una distribución estadística normal y que representan a una sola población; un modo rápido y efectivo de verificar estas condiciones es la inspección visual de histogramas y de gráficos cuantil-cuantil (cuantil distribución teórica vs cuantil distribución de observaciones) a lo que se agregan test para determinar tal ajuste, como el de *Kolmogorov-Smirnov* con la corrección de *Lilliefors*.

El procesamiento estadístico se realizó, por separado para cada una de las bases de datos ya depuradas, único modo de incorporar todos los elementos químicos seleccionados. La base con análisis por *Absorción Atómica* contiene 9 elementos (Cu, Mo, Ag, Au, As, Sb, Pb, Fe y Zn) para un total de 74.997 muestras, provenientes de 508 sondajes diamantina y la base de datos por Acoplamiento de Plasma Inductivo contiene mediciones para 49 elementos de un total de 3.454 muestras de 113 sondajes diamantina, ambas bases recopilan la información obtenida desde el año 2.000 al 2.009 en el sector central de MMH entre la cotas 1.200 m y 2.380 m, aproximadamente. Las bases de datos además contienen información geológica de mapeo.

En este trabajo se depuraron y se filtraron las bases de datos por separado, con Microsoft Excel, para seleccionar aquellas muestras que tuviesen el soporte de muestra estandarizado (1,5 m) e información geológica, para someterlas a los distintos procesamientos conducentes a sus análisis.

Finalmente se procesaron las variables de las bases de datos por separado, para los 9 elementos de la base por AAS y 23 elementos para la base por ICP, obteniendo estadísticos que permitieron realizar el análisis del comportamiento de los elementos químicos, de modo univariable y multivariable, en el sector central de mina Ministro Hales.

A continuación se presenta en Tabla 1, la cantidad de datos para cada una de las alteraciones dominantes y litologías principales, en las bases de datos AAS e ICP y en Figura 11, se muestran diagramas con sus respectivos porcentajes:

Tabla 1. Distribución de la cantidad de datos en alteraciones dominantes y litologías principales en bases de datos ASS e ICP.

ALTERACIÓN	Base ASS	Base ICP
ARGÍLICA	8105	467
ARGÍLICA AVANZADA	21581	1264
FÍLICA	33133	1461
POTÁSICA	371	5
PROFILÍTICA	6600	257
TOTAL DATOS	69789	3454
LITOLOGÍA		
ANDESITA	5178	178
BRECHA HIDROTERMAL	4828	299
DIQUES DE PÓRFIDO DACÍTICO	6595	280
GRANODIORITA MM	43220	2130
PÓRFIDO CUARCÍFERO	742	7
PÓRFIDO FELDESPÁTICO	5290	229
PÓRFIDO MM	5619	331
TOTAL DATOS	71470	3454

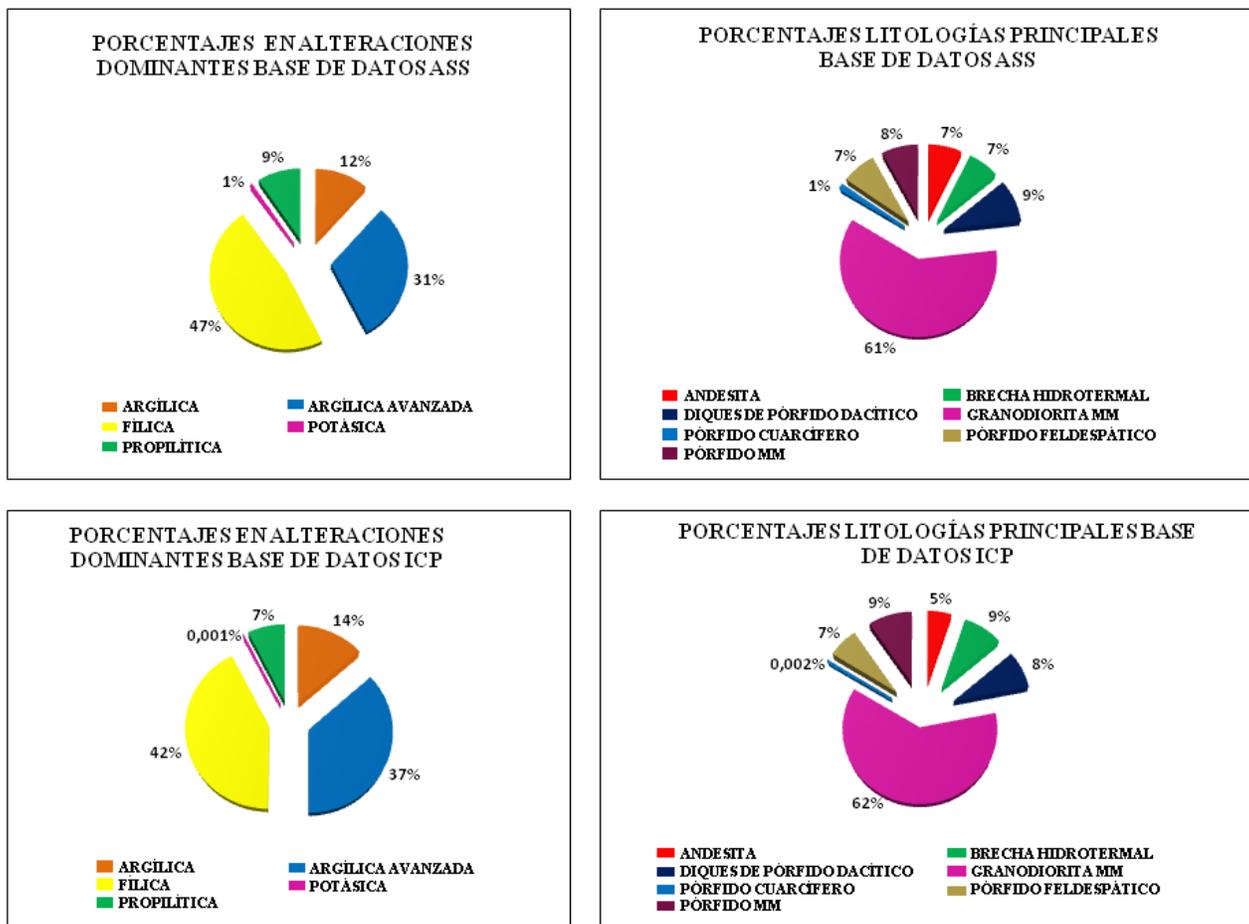


Figura 11. Porcentajes de datos en alteraciones y litologías para mediciones en ASS e ICP

## 3.2 CONTROL DE CALIDAD

Los análisis químicos que conforman la base de datos utilizada en este trabajo fueron obtenidos de muestras de testigos de sondajes realizados entre los años 2000 y 2009. Los análisis se realizaron en los laboratorios de ALS Chemex en Canadá y en Coquimbo, utilizando los métodos de *Absorción Atómica* (AAS) y de *Plasma de Acoplamiento Inductivo* (ICP) multi-elementos con las técnicas ICP-MS (*Inductively Mass Spectrometry*) e ICP AES (*Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry*) con digestión por cuatro ácidos. Mediante la digestión por cuatro ácidos se logra disolver prácticamente la totalidad de los elementos para la mayoría de los materiales geológicos y aplicando las dos técnicas de ICP antes mencionadas se amplía al máximo posible el rango de medición de las concentraciones.

Los elementos analizados por Espectrometría de *Absorción Atómica* son: Cobre, Molibdeno, Oro, Plata, Arsénico, Antimonio, Plomo, Hierro y Cinc. Para el Oro se utilizó la técnica de *ensaye al fuego*. Por *Plasma de Acoplamiento Inductivo* (ICP) se cuantificaron paquetes para 49 elementos.

El siguiente es un resumen del protocolo que utiliza mina Ministro Hales para el Control de Calidad:

- Control de Medición:

Se efectúa un control de la curva de calibración cada 10 mediciones (*reslope*).  
Control de repetibilidad y reproducibilidad a diferentes rangos para cada elemento.

- Control de precisión:

Uso de duplicados de muestras (se vuelve a preparar a partir de la primera división de masa) y duplicados de análisis químico con re-análisis en un mismo frasco.  
Se duplica entre un 2 a un 5 % de las muestras.  
La aceptación depende de los rangos de repetibilidad y reproducibilidad previamente establecidos para cada elemento.

- Control de exactitud :

Uso de 5 Materiales de Referencia (*MREF*), tres de ellos certificados por Codelco y dos de *Rocklabs, New Zeland*, alternados en forma ciega en cada lote analizado.  
Los *MREF* y blancos corresponden entre un 2 a un 10 % de las muestras.  
Se aceptan valores en el rango:

- Valor certificado  $\pm 2$  desviaciones estándar
- Sin sesgos

En caso contrario, se repite todo el lote involucrado.

- Control Geológico :

Se comparan los resultados de análisis químico con la descripción geológica (mapeo).  
Cualquier discrepancia implica repetición del análisis.  
Si este problema continúa se repite:

- El mapeo (verificación)
- La preparación de la muestra
- El análisis químico.

- Estrategia de control:

En Figura 12, se presenta el diagrama de Control de Calidad utilizado en MMH

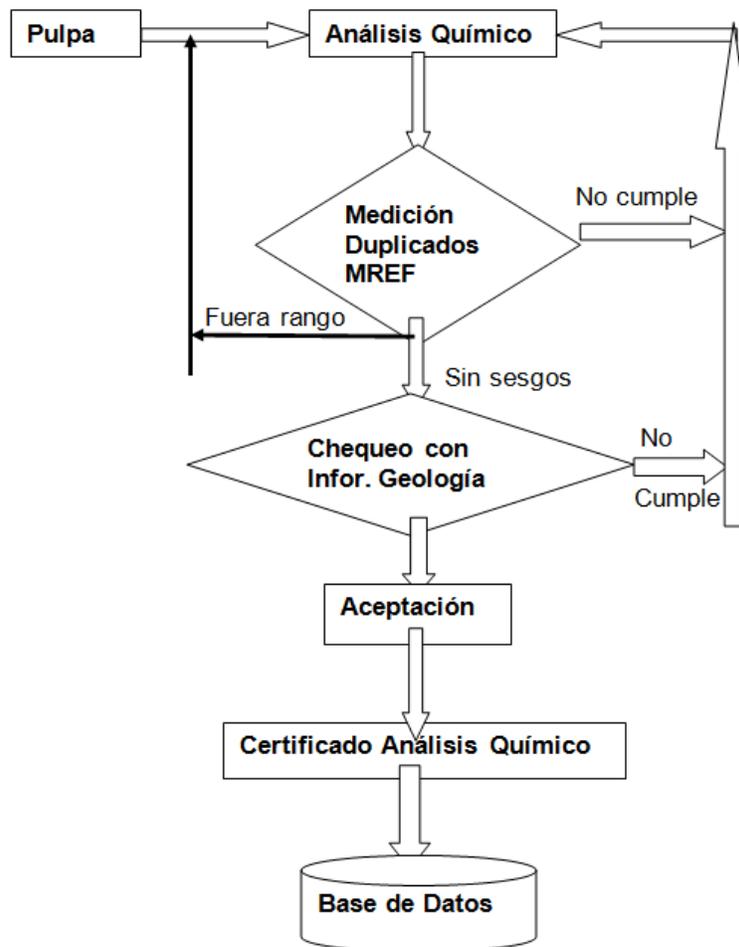


Figura 12. Diagrama de Control de Calidad utilizado en MMH.

A continuación se presenta parte del informe de control de calidad elaborado por Becerra y Contreras (2006), realizado a mediciones por ICP-MS de Cobre total (CuT), Plata (Ag) y Arsénico (As), que da cuenta del control para establecer exactitud y precisión de las mediciones.

En la Figura 13 se presentan las cartas de control para determinar la exactitud de las mediciones, mediante los resultados obtenidos para materiales de referencia certificados que se insertaron en los envíos a laboratorio.

Los sesgos para Cobre total y para Plata, arrojaron valores de 0,72% y 2,26%, respectivamente, lo que se considera despreciable. Para el Arsénico el sesgo fue -17,21% con leyes un 16,5% mayor al valor esperado, lo que para el rango de leyes analizadas y para el tipo de análisis, se considera un valor de exactitud admisible. Lo anterior se puede apreciar en las Cartas de Control (Figura 13) donde la mayor parte de las mediciones quedan dentro de la *franja de seguridad* de dos desviaciones estándar.

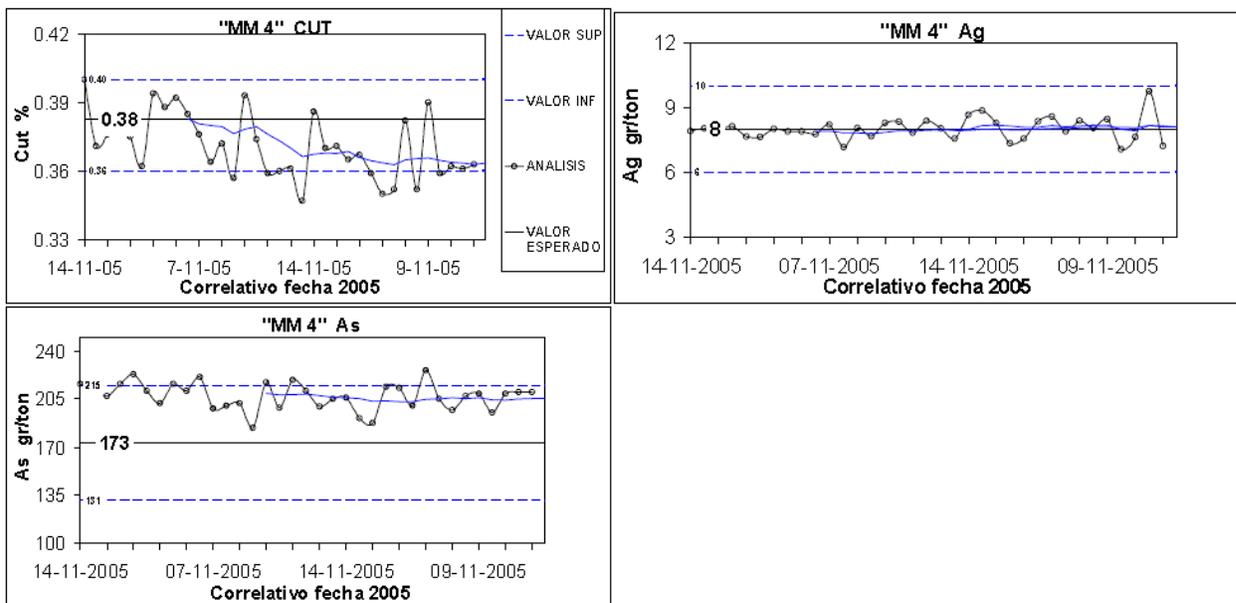


Figura 13. Cartas de control de materiales de referencia para elementos analizados por ICP-MS (Becerra y Contreras, 2006)

Por otra parte, al comparar el resultado de los análisis de las muestras con la de los duplicados para Cobre total, Plata y Arsénico incorporados dentro de los elementos analizados por ICP-MS, cuyas gráficas se pueden ver en la Figura 14, se obtuvieron valores con coeficientes de variación de, 5,10% para el Cobre total, 28,17% para la Plata y de 16,23% para el Arsénico, los que fueron considerados admisibles dentro del grado de precisión para este tipo de análisis.

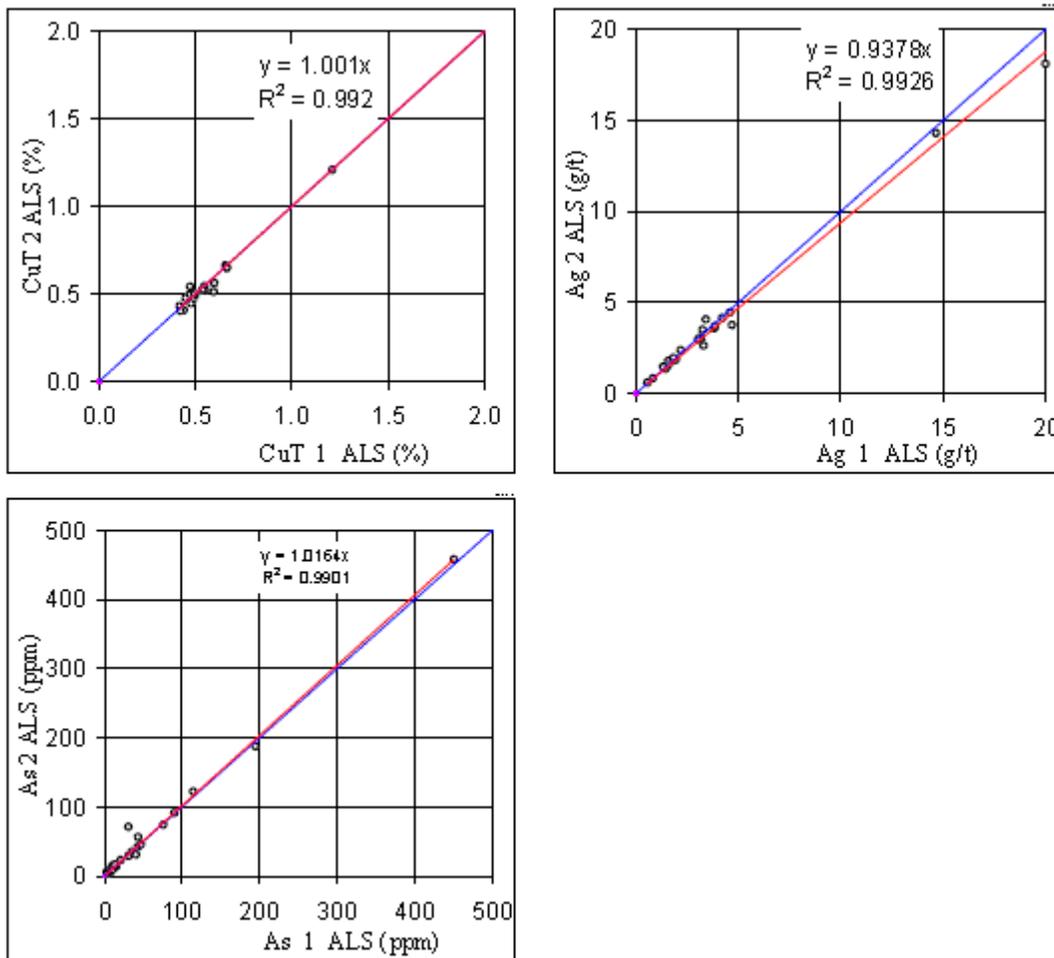


Figura 14. Gráficos de comparación de análisis de las muestras y su duplicados para determinar imprecisión (Becerra y Contreras, 2006)

### 3.3 ESTADÍSTICA UNIVARIABLE

Debido a que las mediciones de las variables estudiadas, en ambas bases de datos, se ajustan a una distribución estadística *lognormal*, se prepararon bases de datos *normalizadas* transformando los datos originales a su logaritmo natural (Ln), en esta condición se identificaron y retiraron los valores *extremos* y luego se obtuvo la estadística univariable. Aún cuando hay elementos que tienen un alto porcentaje de datos bajo el límite de detección como puede apreciarse en Tabla 2 y Tabla 3, igual se procesaron estos datos estadísticamente en todas sus etapas, sin embargo se restringió su utilización para procesos posteriores de análisis geoquímicos.

Tabla 2. Muestras bajo el límite de detección para mediciones por AAS.

ELEMENTO QUÍMICO	TOTAL DE MUESTRAS ANALIZADAS	MEDICIONES BAJO EL LÍMITE DE DETECCIÓN (PORCENTAJE)
Cu	74.995	3,36
Ag	64.188	19,26
As	71.182	19,47
Fe	67.100	0,00
Mo	67.287	52,56
Pb	67.084	5,40
Sb	30.309	43,08
Zn	67.097	1,24
Au	12.671	7,96

Tabla 3. Muestras bajo el límite de detección para mediciones por ICP.

ELEMENTO QUÍMICO	TOTAL DE MUESTRAS ANALIZADAS	MEDICIONES BAJO EL LÍMITE DE DETECCIÓN (PORCENTAJE)
Ag	3.454	0,90
Al	3.453	0,00
As	3.454	0,00
Bi	3.454	0,93
Cu	3.454	0,00
Fe	3.454	0,00
Ga	3.422	0,00
Ge	3.422	13,73
K	3.451	0,00
Li	3.422	0,26
Mo	3.454	0,84
Pb	3.454	0,03
Rb	3.422	0,00
Re	3.422	14,58
S	3.446	0,00
Sb	3.453	0,49
Sc	2.577	0,04
Se	3.361	11,54
Th	3.419	0,06
Tl	2.375	0,00
U	3.419	0,09
V	3.451	0,06
Zn	3.451	0,00

Para identificar valores extremos se aplicó el método *Tukey*, que considera como *observación anómala extrema* cualquier valor mayor a 3 veces el rango intercuartílico por sobre el tercer cuartil, y también aquellos que están a 3 veces el rango intercuartílico por abajo del primer cuartil.

Una vez normalizados los datos de las variables de ambas bases y habiendo retirado *valores extremos*, se obtuvieron estimadores estadísticos de centralización: media, mediana; de dispersión: máximo, mínimo, desviación estándar, cuartiles y de distribución: asimetría y curtosis, con los que se confeccionaron las tablas 4 y 5, que muestran la estadística univariable para los elementos químicos de las bases de datos con mediciones por AAS e ICP, respectivamente.

Tabla 4. Estadística univariable para mediciones por AAS en MMH central.

Elemento Químico	Unidad de magnitud	Número de Mediciones	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Primer Cuartil	Tercer Cuartil	Rango Intercuartílico	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Asimetría	Curtosis	Umbral
Cu	ppm	74.995	1.788,97	2.500,00	10,00	329.800,00	400,00	8.400,00	8.000,00	1,99	0,01	-0,32	-0,77	1.788,98
Ag	ppm	64.188	6,31	5,00	0,40	2.510,00	1,60	15,00	13,40	1,29	0,01	0,64	-0,19	6,32
As	ppm	71.182	143,26	110,00	5,00	126.100,00	30,00	500,00	470,00	1,77	0,01	0,56	-0,44	143,28
Fe	ppm	67.036	26.786,29	26.600,00	3.200,00	226.800,00	19.700,00	36.300,00	16.600,00	0,50	0,00	0,10	0,89	26.786,30
Mo	ppm	67.256	22,45	20,00	3,00	2.546,00	10,00	40,00	30,00	0,96	0,00	1,05	1,40	22,46
Pb	ppm	67.084	184,00	209,00	4,00	36.895,00	83,00	460,00	377,00	1,31	0,01	-0,37	-0,17	184,01
Sb	ppm	30.309	17,78	13,00	1,00	17.300,00	5,00	44,00	39,00	1,49	0,01	0,98	0,45	17,80
Zn	ppm	67.097	451,40	450,00	2,50	87.525,00	140,00	1.480,00	1.340,00	1,51	0,01	-0,01	-0,72	451,42
Au	ppm	12.671	0,04	0,04	0,00	32,90	0,01	0,09	0,08	1,36	0,01	-0,04	-0,21	0,06

Tabla 5. Estadística univariable para mediciones por ICP en MMH central.

Elemento Químico	Unidad de magnitud	Número de Mediciones	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Primer Cuartil	Tercer Cuartil	Rango Intercuartílico	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Asimetría	Curtosis	umbral
Ag	ppm	3.454	6,54	7,30	0,03	771,00	1,77	23,20	21,43	5,55	0,03	0,85	0,62	6,60
Al	ppm	3.453	2.876,12	7.400,00	0,37	104.500,00	900,00	70.900,00	70.000,00	42,18	0,06	0,44	0,39	2.876,24
As	ppm	3.454	155,35	171,25	0,40	74.000,00	25,90	874,00	848,10	8,78	0,04	1,01	0,42	155,42
Bi	ppm	3.454	1,75	1,67	0,01	204,00	0,82	3,65	2,83	3,29	0,02	1,17	1,51	1,79
Cu	ppm	3.454	3.833,04	5.950,00	17,30	289.000,00	1.530,00	12.850,00	11.320,00	6,03	0,03	0,46	0,98	3.833,10
Fe	ppm	3.446	27.562,66	27.449,95	4.000,00	188.000,00	20.700,00	36.600,00	15.900,00	1,62	0,01	1,08	2,89	27.562,68
Ga	ppm	3.422	9,33	17,00	0,10	124,00	3,12	21,40	18,28	3,71	0,02	0,40	0,71	9,38
Ge	ppm	3.402	0,10	0,11	0,03	1,77	0,06	0,14	0,08	2,09	0,01	0,96	1,76	0,12
K	ppm	3.451	880,70	2.800,00	0,02	63.900,00	100,00	25.500,00	25.400,00	52,75	0,07	0,39	0,58	880,84
Li	ppm	3.422	6,10	7,75	0,10	175,00	3,00	15,10	12,10	3,55	0,02	0,49	1,08	6,14
Mo	ppm	3.454	13,55	11,95	0,39	3.860,00	4,48	40,50	36,02	4,30	0,02	1,28	0,58	13,60
Pb	ppm	3.454	140,93	163,50	0,70	4.000,00	63,10	358,00	294,90	3,66	0,02	0,62	1,10	140,97
Rb	ppm	3.422	30,66	42,85	0,10	282,00	9,90	124,50	114,60	4,81	0,03	0,53	0,64	30,72
Re	ppm	3.422	0,01	0,01	0,00	2,92	0,00	0,04	0,04	5,36	0,03	1,22	0,43	0,07
S	ppm	3.446	1.989,75	15.900,00	0,02	302.000,00	100,00	31.400,00	31.300,00	54,68	0,07	0,36	0,54	1.989,89
Sb	ppm	3.453	10,31	9,57	0,03	5.060,00	1,89	56,00	54,11	9,08	0,04	1,05	0,50	10,38
Sc	ppm	2.577	2,50	3,50	0,05	20,80	0,90	6,30	5,40	2,94	0,02	0,67	0,34	2,55
Se	ppm	3.361	2,65	2,20	0,50	151,00	1,00	5,00	4,00	3,03	0,02	1,93	1,50	2,69
Th	ppm	3.415	3,09	4,00	0,30	26,70	2,30	5,00	2,70	2,05	0,01	0,33	1,46	3,11
Tl	ppm	3.419	0,49	0,62	0,01	8,52	0,18	1,41	1,23	3,34	0,02	0,58	0,63	0,53
U	ppm	3.417	0,97	1,00	0,05	18,70	0,60	1,50	0,90	2,14	0,01	1,07	2,50	0,99
Y	ppm	3.451	24,20	38,00	0,50	229,00	12,00	55,00	43,00	3,14	0,02	0,39	0,81	24,24
Zn	ppm	3.451	302,51	270,00	2,00	13.400,00	98,00	881,00	783,00	4,28	0,02	1,24	0,55	302,56

En tablas 4 y 5 se incluyó el valor de *background* o umbral para el sector donde se encuentran las muestras y que corresponde al límite por sobre el cual los elementos se pueden considerar de concentraciones anómalas. Este se calculó con los valores transformados a base Ln (el que luego se revirtió a base aritmética) según la siguiente fórmula:

$$Umbral = Media + 2 x (Error Estándar de la Media)$$

Para todos los elementos químicos en ambas bases la Media y el Umbral dieron valores muy similares.

### 3.3.1 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA RESPECTO AL CLARKE

Para determinar qué elementos se considerarán para los análisis geoquímicos, sea por su valor económico o por su interferencia negativa en los procesos de extracción, se compararon los valores medios de los elementos químicos, para ambas bases datos, con los valores medios de la corteza terrestre (valor *Clarke*); lo que se observa en las tablas 6 y 7, para mediciones por AAS e ICP, respectivamente, las cuales serán de utilidad para análisis posteriores.

Tabla 6. Concentración media respecto al *Clarke* de elementos químicos medidos por AAS en MMH central.

Elemento Químico	Unidad de medición	Concentración Media en MMH	Contenido medio en la corteza terrestre ( <i>Clarke</i> ). (Krausköpf & Bird, 1995)	Razón de Concentración con respecto al <i>Clarke</i>
Cu	ppm	1.789	55	33
Ag	ppm	6,3	0,07	90
As	ppm	143,3	1,8	79,6
Fe	ppm	26.786,3	50.000	0,5
Mo	ppm	22,4	1,5	15
Pb	ppm	184	13	14
Sb	ppm	17,8	0,2	89
Zn	ppm	451	70	6
Au	ppm	0,035	0,004	9

Para la base de datos por AAS, todos los elementos analizados están por sobre la media excepto el Hierro que se encuentra deprimido respecto al *Clarke*. Los restantes elementos químicos, están por sobre este valor, siendo el Arsénico, la Plata y el Cobre los de mayor concentración respecto al valor medio cortical.

Tabla 7. Concentración media respecto al *Clarke* de elementos químicos medidos por ICP en MMH central.

Elemento Químico	Unidad de medición	Concentración Media en MMH	Contenido medio en la corteza terrestre ( <i>Clarke</i> ). (Krausköpf & Bird, 1995)	Razón de Concentración con respecto al <i>Clarke</i>
Ag	ppm	6,5	0,07	93
Al	ppm	2876	81.300	0,04
As	ppm	155,3	1,8	86
Bi	ppm	1,8	0,2	9
Cu	ppm	3.833	55	69,69
Fe	ppm	27.562,7	50.000	0,55
Ga	ppm	9,3	15	0,62
Ge	ppm	0,1	1,5	0,06
K	ppm	880,7	25.000	0,04
Li	ppm	6,1	20	0,30
Mo	ppm	13,5	1,5	9
Pb	ppm	140,9	13	10,84
Rb	ppm	30,7	90	0,34
Re	ppm	0,011	0,001	11
S	ppm	1.989,8	200	9,95
Sb	ppm	10,3	0,2	51,5
Sc	ppm	2,5	16	0,16
Se	ppm	2,6	0,05	52
Th	ppm	3,1	7,2	0,43
Tl	ppm	0,5	0,5	1
U	ppm	0,97	1,8	0,54
V	ppm	24,2	135	0,18
Zn	ppm	302,5	70	4,32

Al comparar las concentraciones medias de los elementos químicos analizados por ICP con el valor *Clarke*, se obtuvo lo que se muestra en la Tabla 7 y que en parte se utilizó como criterio para seleccionar aquellos elementos químicos que por su concentración anómala positiva se consideraron para análisis posteriores. Estos fueron: Cobre, Molibdeno, Plata, Oro por su valor económico; Arsénico, Azufre, Antimonio, Plomo, Cinc y Aluminio, por sus características de impurezas y otros como el Hierro, Potasio, Renio y Selenio.

Se puede observar que en ambas bases de datos hay elementos que presentan concentraciones significativamente inferiores al *Clarke*, lo que puede interpretarse como una remoción de ellos por los procesos de alteración hidrotermal que han afectado al yacimiento, o bien que las rocas del yacimiento pudieran haber tenido bajas concentraciones de ellos previo a los eventos de alteración/mineralización.

### 3.3.2 DIAGRAMAS CAJA Y BIGOTE

Los diagramas *caja y bigote*, permiten visualizar en una sola figura las principales características de la distribución de un conjunto de datos, como son: centralización, dispersión y distribución; además individualiza claramente valores que se alejan de modo poco usual del resto de los datos (*outliers* y *extremos*). Son simples de construir y fáciles de interpretar, particularmente cuando se comparan varios grupos de datos. Su origen se debe a Tukey (1977) introdujo este tipo de gráfico denominándolo *box and whisker*.

Para su construcción se utilizan medidas descriptivas de la misma distribución que se quiere representar. La longitud de la caja corresponde a la diferencia entre el tercer y el primer cuartil (*rango intercuartil*) y desde cada extremo de la caja se prolonga una línea (los *bigotes*), cuya longitud puede determinarse de varios modos: 1,5 veces el *rango intercuartil*, 3 veces el *rango intercuartil*, que coincidan los extremos de cada *bigote* con los valores extremos de la distribución, respectivamente o bien, que el bigote inferior se inicie al 5% del total de datos y el bigote superior termine al 95% de los mismos.

Los elementos representados en estos diagramas corresponden a los analizados por ICP, excepto el Oro el cual sólo se encuentra en análisis por AAS.

A continuación las figuras muestran la distribución de los elementos químicos con las alteraciones dominantes, litologías principales y con la mineralogía de mena registrada para MMH central. Estas distribuciones se representan en *cajón y bigote* realizados con el Software *ioGAS-64* considerando bigotes de longitud 1,5 veces el rango intercuartil.

En la Figura 15, se representa la concentración de los elementos *económicos* en las alteraciones dominantes de MMH central. Cabe hacer notar que la cantidad de datos que representan los diagramas *caja y bigote* para las distintas alteraciones dominantes son: 450 para Argílica, 1200 para Argílica Avanzada, 1400 para Fílica, 5 para Potásica y 250 para Propilítica.

Se puede ver que el Cobre, la Plata y el Oro se concentran mayoritariamente en la Alteración Argílica Avanzada, lo que se explicaría por los aportes que son característicos de estos elementos en los eventos de alta sulfidización. El Molibdeno muestra una mayor concentración en la Alteración Potásica, donde, en MMH central, este elemento se encuentra como Molibdenita en fracturas discontinuas de aparición posterior y muy cercana a la de las vetillas de cuarzo *tipo A* (con halo de feldespatos potásicos) que caracterizan a esta alteración (Rojas, 2009).

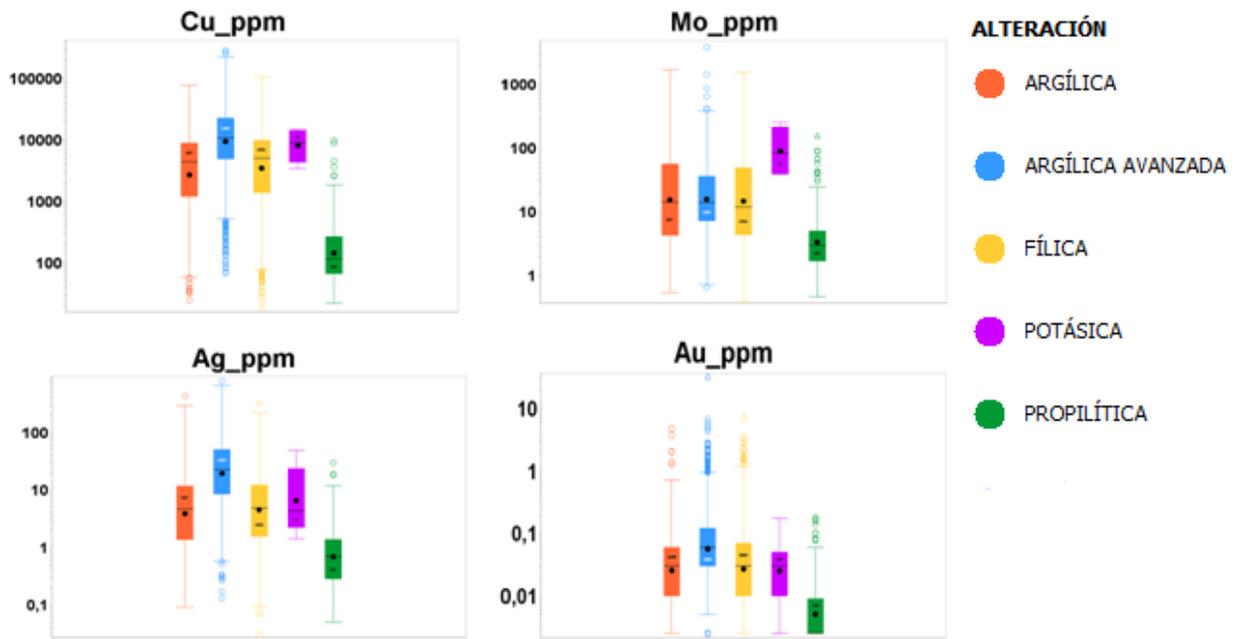


Figura 15. Diagramas *caja y bigote* de concentración de elementos *económicos* en alteraciones dominantes de MMH central.

En la Figura 16, donde se representan las concentraciones de los elementos *impurezas* en las alteraciones dominantes de MMH central, Arsénico, Antimonio y en menor grado Azufre, muestran las mayores concentraciones en la Alteración Argílica Avanzada, corroborando el que estos elementos se encuentran asociados a las brechas magmático hidrotermales formadas durante los eventos de alta sulfidización. Estas impurezas coexisten con sulfosales (Enargita, Tenantita) en las zonas que exhiben las mayores leyes de Cobre y Plata del yacimiento (Díaz, 2009). Plomo y Cinc, según se ve en su representación de *caja y bigote*, se distribuyen en concentraciones aproximadamente similares para todas las alteraciones, coincidiendo con que estos elementos se depositaron durante toda la historia de la mineralización del yacimiento (Zúñiga, 2012) a medida que disminuía la temperatura en los fluidos que transportan el Plomo y el Cinc (Corbett y Leach, 1998 en Rojas, 2009). El aluminio, como puede verse en la Figura 16, presenta concentraciones aproximadamente similares para la mitad superior de los datos en las alteraciones Fílica, Argílica y Argílica Avanzada, lo que se debería principalmente a que estas alteraciones se caracterizan por la presencia de minerales arcillosos.

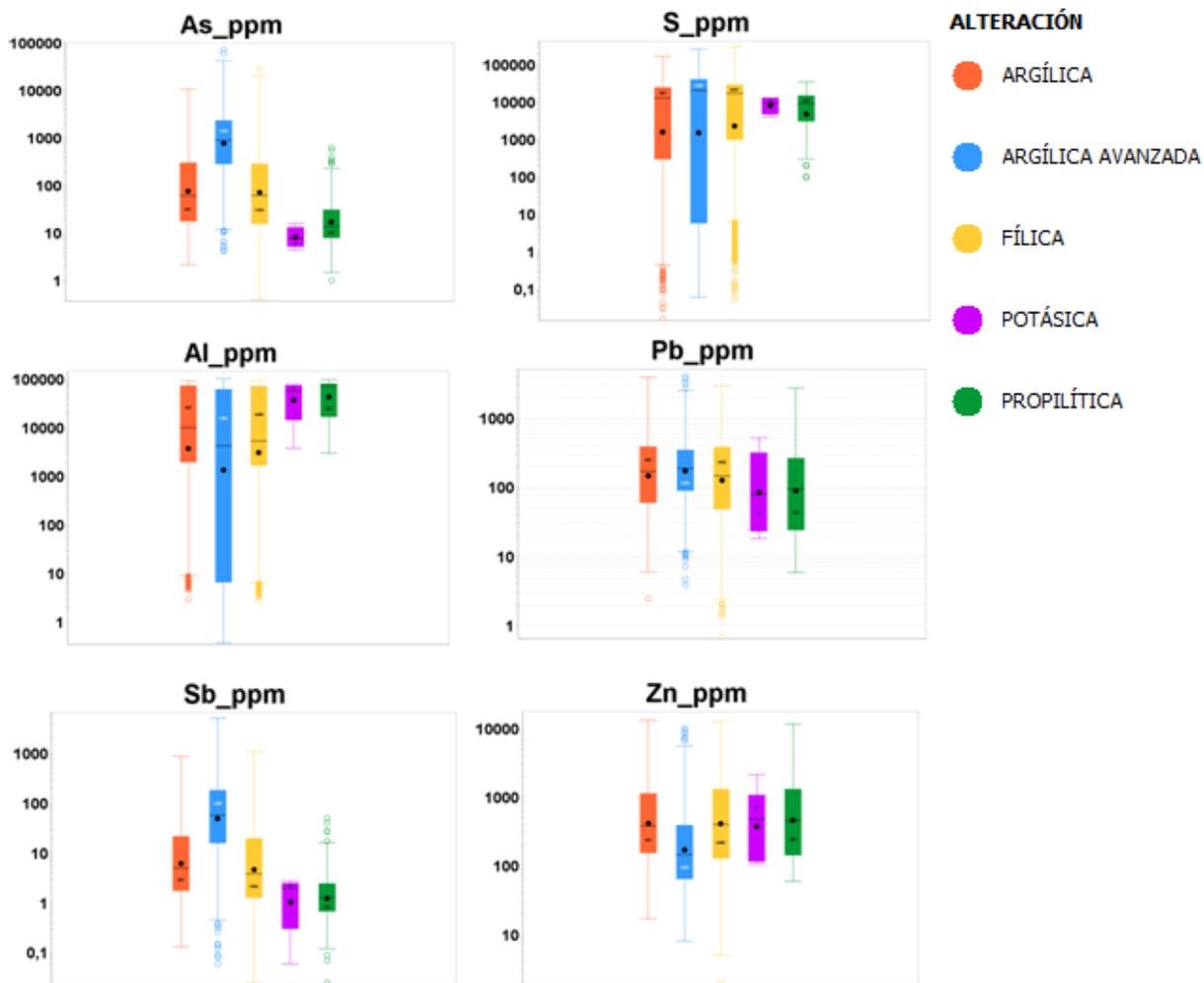


Figura 16. Diagramas *caja y bigote* de concentración de elementos *impurezas* en alteraciones dominantes de MMH central.

En la Figura 17, el Potasio toma los mayores valores en la Alteración Potásica dominante, que en MMH se encuentra en las zonas profundas lugar donde prácticamente no se le han sobreimpuesto alteraciones más tardías y donde este elemento fue tempranamente conformando minerales que caracterizan a esta alteración. Las otras alteraciones donde el Potasio toma valores altos es en las alteraciones dominantes Argílica y Argílica Avanzada, donde el Potasio participa como constituyente de la mayoría de sus minerales característicos, particularmente los arcillosos.

El Potasio se encuentra en altas concentraciones en todas las alteraciones dominantes, aunque menor en la Argílica Avanzada.

El Hierro, muestra un leve aumento de concentración para la Alteración Argílica Avanzada, lo que se explicaría porque en las etapas más tardías, junto con la disminución de la temperatura,

aumenta la actividad de Fe/Cu favoreciéndose la formación de minerales con este elemento como constituyente al tiempo que disminuye la concentración de Cobre.

Tanto el Selenio como el Renio se concentran en la Alteración Potásica dominante.

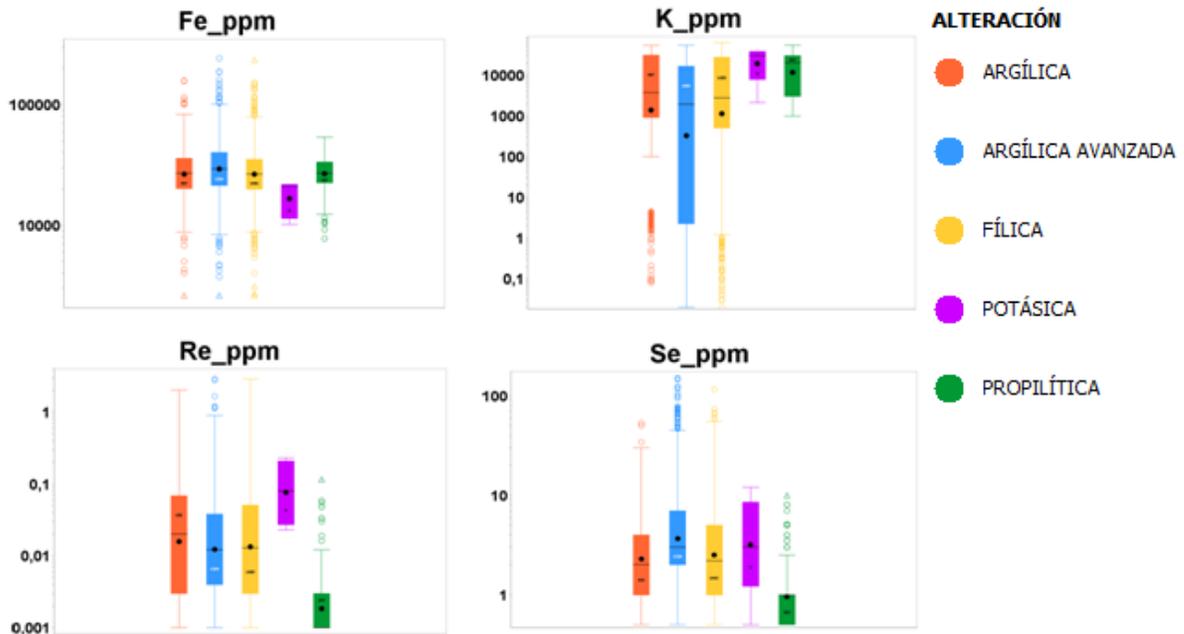


Figura 17. Diagrama *caja y bigote* de concentración de elementos de interés en alteraciones dominantes de MMH central.

Al observar las figuras 18, 19 y 20 donde se representa la concentración de los elementos *económicos, impurezas y de interés* en las litologías principales, se puede inferir lo siguiente:

- Los elementos Cobre, Plata y Oro se concentran mayoritariamente en las Brechas Hidrotermales, unidad litológica que en MMH son las que contienen los más altos volúmenes de estos elementos y le dan el valor económico al depósito.
- Azufre, Arsénico, Antimonio y Fierro al igual que los elementos mencionados anteriormente tienen sus mayores concentraciones en las Brechas Hidrotermales, habiendo sido aportados por fluidos de alta sulfidización que generaron la formación de esta unidad litológica.

- El Molibdeno, el Renio y el Cinc, tienen sus mayores valores de concentración en el Pórfido Cuarcífero, siendo esta la última unidad en intruir antes de las Brechas Hidrotermales.
- El Aluminio y el Potasio presentan, con respecto a las restantes litologías, un leve aumento de su concentración en la Andesita y una alta dispersión tanto en las Brechas Hidrotermales como en el Pórfido Cuarcífero.

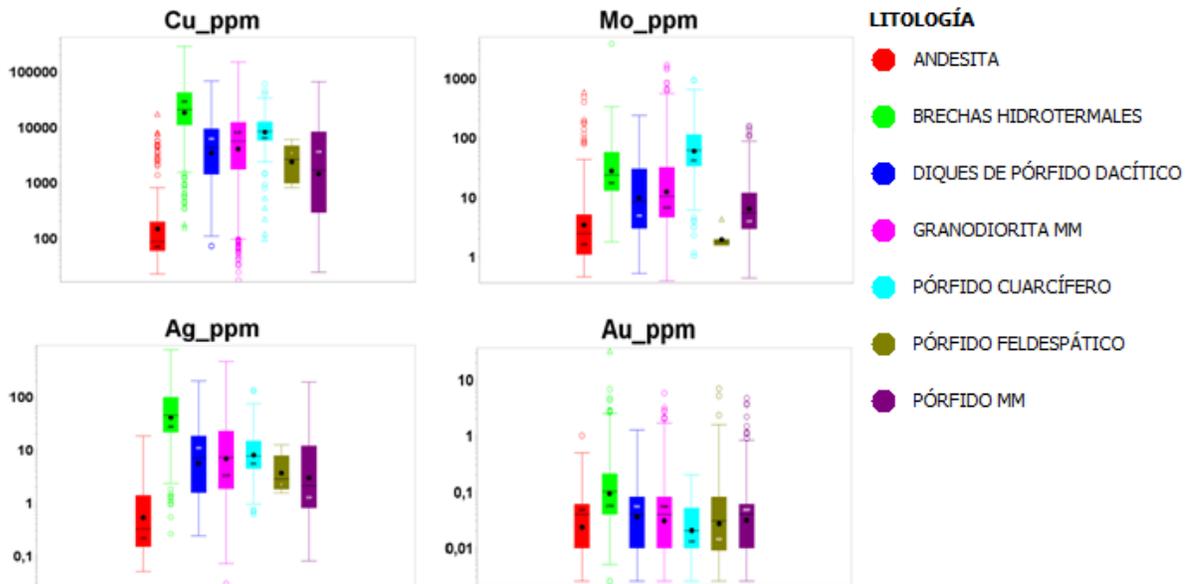


Figura 18. Diagrama *caja y bigote* de concentración de elementos *económicos* en las litologías principales de MMH central.

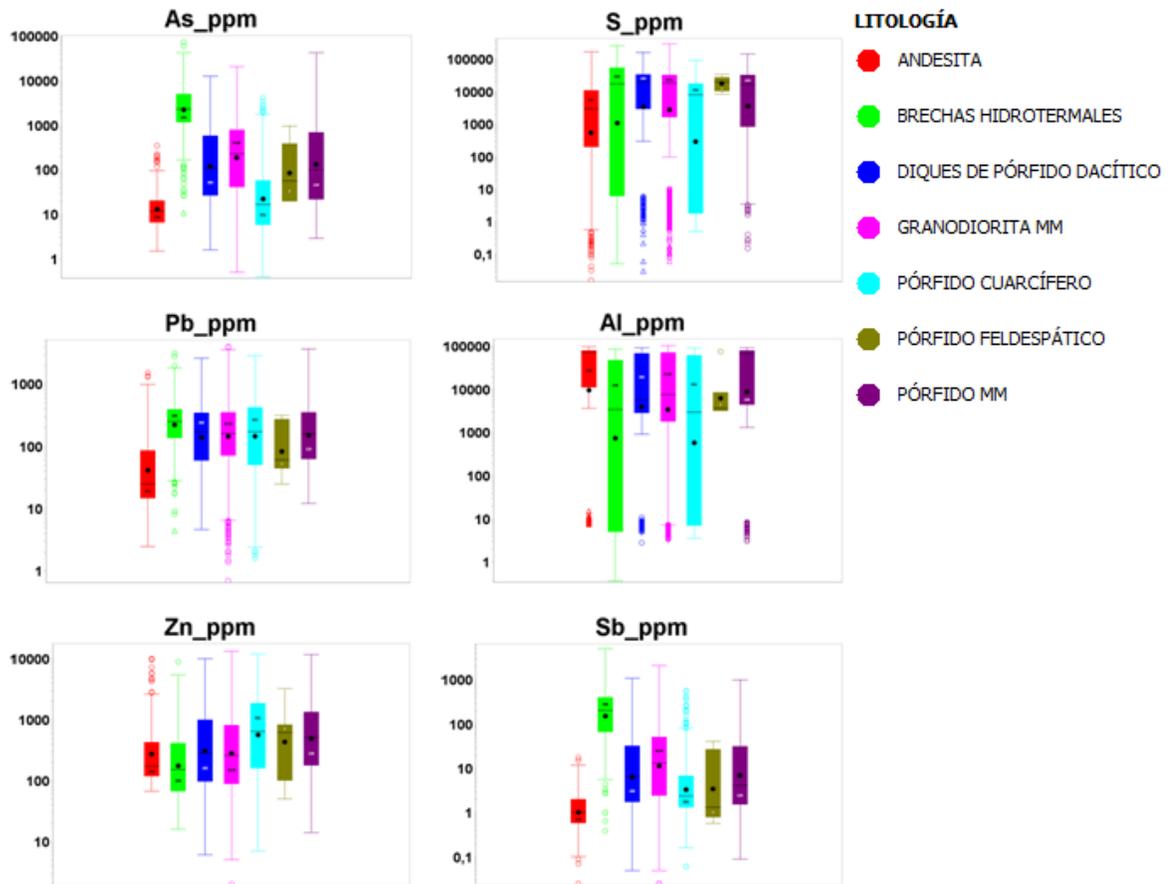


Figura 19. Diagrama *caja y bigote* de concentración de elementos *impurezas* en las litologías principales de MMH central.

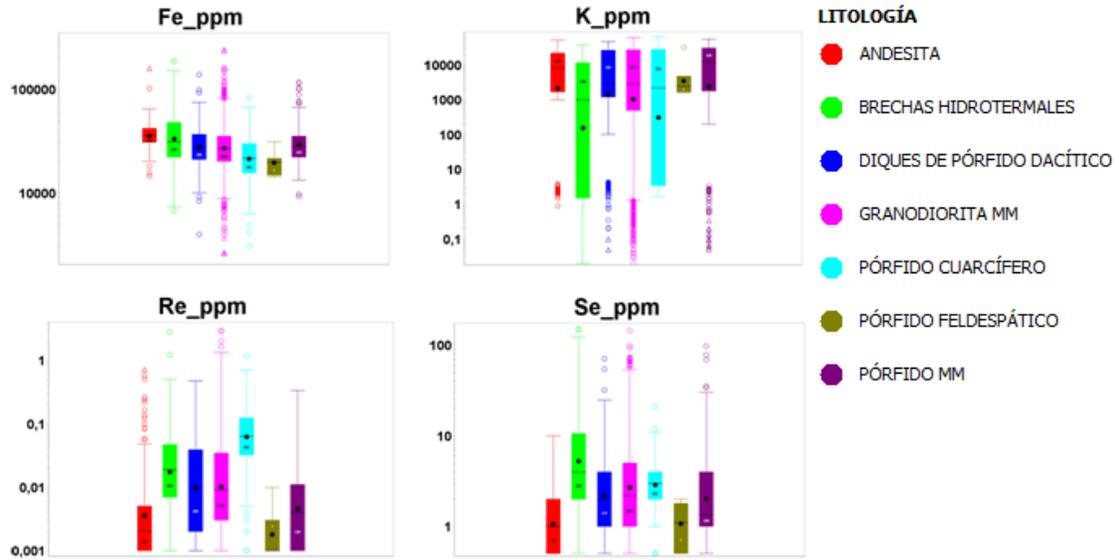


Figura 20. Diagrama *caja bigote* concentraciones de elementos *de interés* en litologías principales de MMH central.

A continuación se muestran los minerales de mena, Bornita, Calcopirita, Pirita, Tenantita, Covelina, Enargita y Calcosina en porcentajes relativos para cada una de las alteraciones dominantes.

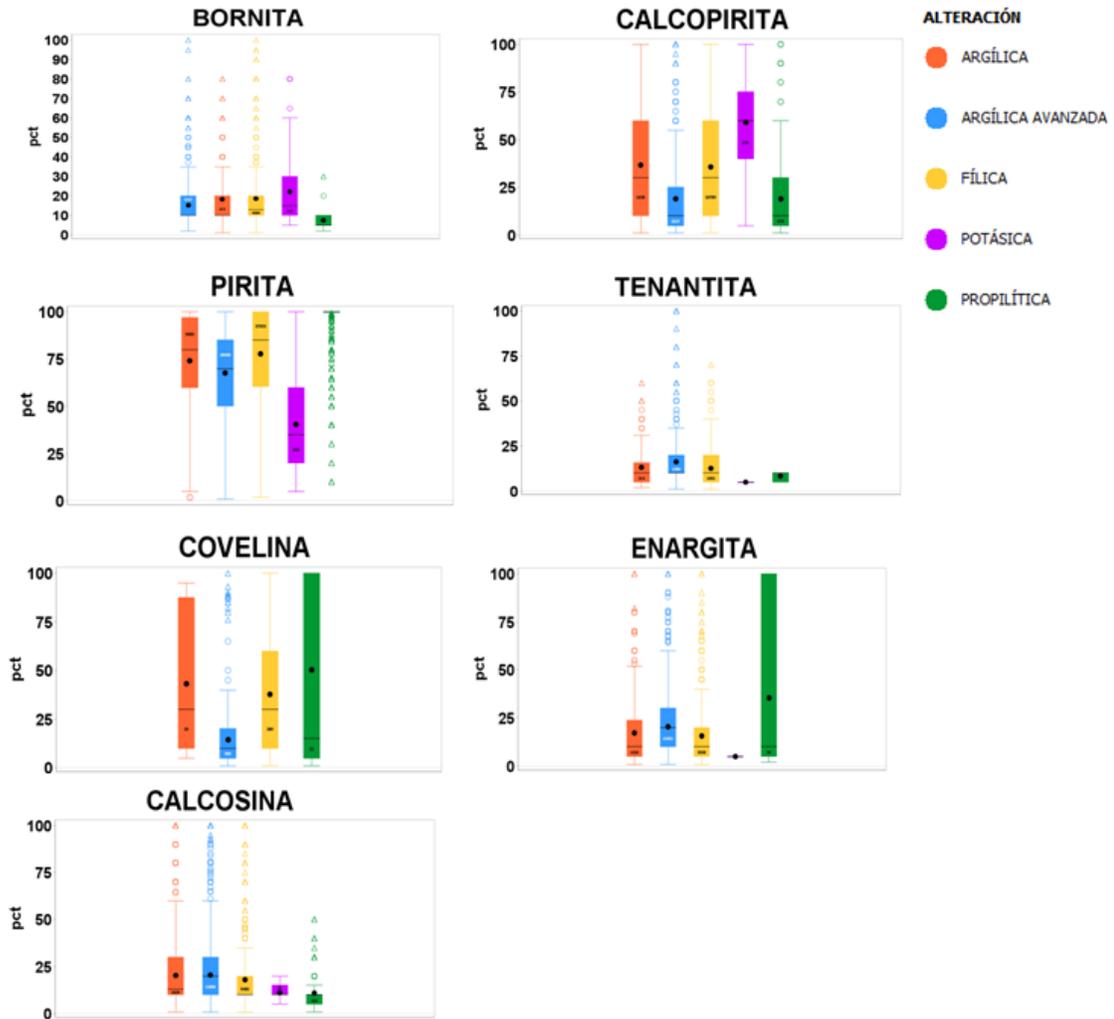


Figura 21. Diagramas *caja y bigote* de minerales de mena en alteraciones dominantes de MMH central.

En la Figura 21 se puede observar que tanto Bornita como Calcopirita registran, con respecto a las restantes alteraciones dominantes, mayores valores para la Alteración Potásica. Bornita se encuentra en cantidades relativas menores que la Calcopirita, estando esta última presente de modo importante en las alteraciones Fílica y Argílica.

Los mayores porcentajes relativos de Pirita están las alteraciones dominantes Fílica y Argílica, contrastando con la zona de Alteración Potásica donde está muy disminuida.

Tenantita y Enargita se distribuyen de modo muy similar en todas las alteraciones dominantes, alcanzando los mayores valores en las alteraciones Argílica Avanzada, Argílica y Fílica.

Covelina presenta la mayor concentración de datos en la Alteración Argílica Avanzada, pero con valores porcentuales relativos menores que las restantes alteraciones donde se le encuentra en casi todo el rango porcentual. De modo similar la Calcosina, si bien se encuentra en bajas proporciones relativas, la mayor concentración de datos de este mineral está en la Alteración Argílica Avanzada y en la Argílica.

En Figura 22, se muestra la distribución porcentual relativa entre los minerales de mena, extraídos de la base de datos ICP.

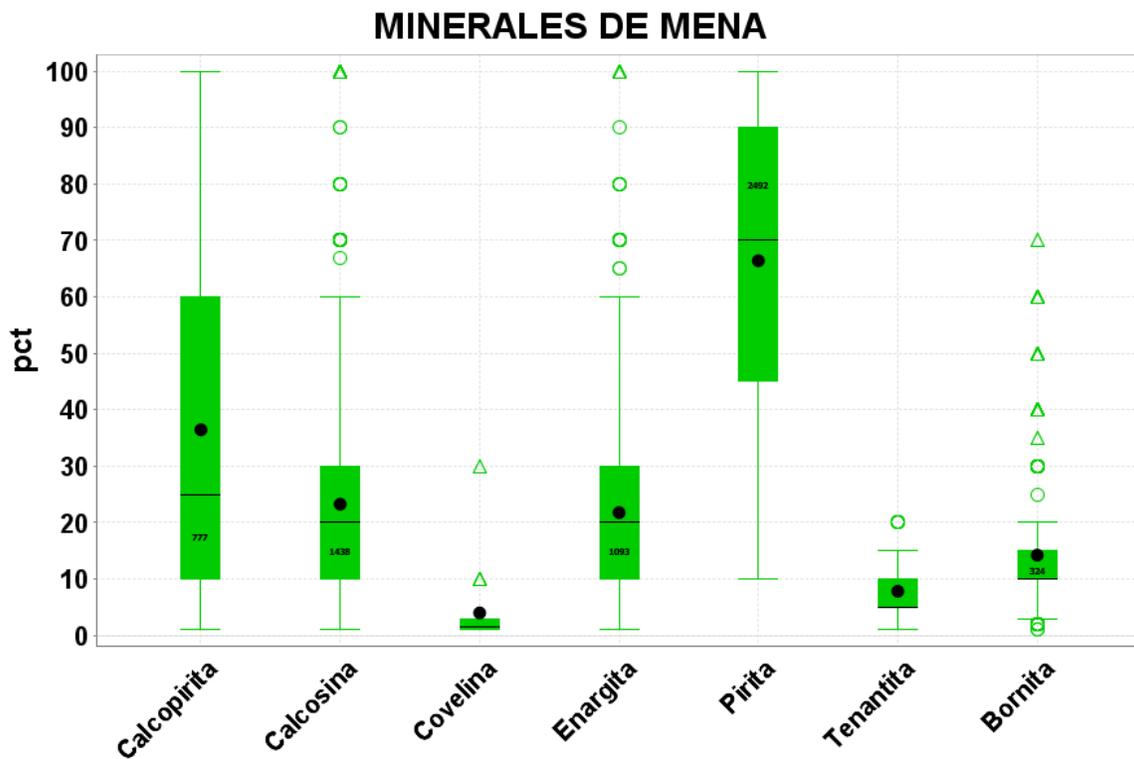


Figura 22. Minerales de mena en porcentajes relativos. (Base de datos ICP).

Del análisis de la base de datos se tiene que Pirita, Calcosina, Enargita y Calcopirita representan un 41%, 23%, 17% y 13%, respectivamente, del total de las muestras.

Pirita y Calcopirita cubren casi todo el rango porcentual, seguido por la Calcosina y Enargita, que se distribuyen desde un 10% hasta un 60%, aproximadamente.

El amplio rango para Pirita y Calcopirita se explicaría porque a estos minerales se les encuentra prácticamente en toda la columna mineralizada pues participan en todos los procesos de alteración /mineralización del yacimiento.

Calcosina tendría su origen en procesos de alteración/mineralización supérgena, aunque no se descarta la presencia de calcosina primaria; se le encuentra junto a Enargita, Tenantita y Covelina

Parte de la Calcopirita estaría asociada a Bornita, como producto de la alteración/mineralización hidrotermal temprana en la zona Potásica.

### **3.4 ESTADISTICA MULTIVARIABLE**

#### **3.4.1 ESTADISTICA BIVARIABLE**

Para determinar el grado de variación conjunta existente entre cada par de elementos químicos involucrados en este estudio se utilizó el método del Coeficiente de Correlación de *Pearson*, que considera el supuesto de una distribución estadística normal de los datos. Este coeficiente se obtiene efectuando el cociente entre la covarianza de las variables y el producto de sus desviaciones estándar; es adimensional lo que lo libera de las magnitudes de medición. El rango de valores que puede tomar este coeficiente, va de -1 a +1, siendo la unidad (positiva o negativa) el indicador de la relación más fuerte entre dos variables, la que se va debilitando en tanto el coeficiente se va aproximando a cero, valor que una vez alcanzado indica de que ya no existe relación lineal alguna entre las variables.

Para proceder al cálculo de valores de correlación bivariable, se procesaron los datos de las bases de análisis por AAS e ICP, sin sus *valores extremos*, previa transformación a su logaritmo natural. En las figuras 22 y 23 se observan los resultados de la correlación entre los elementos de la base de datos con mediciones por AAS e ICP, respectivamente.

En la Figura 23, se pueden ver los distintos grados de correlación (en diferentes colores) que resultaron de procesar por el método *Pearson* las mediciones de los elementos por *Absorción Atómica*. Los mayores valores, de 0,8 aproximadamente, son para Cobre-Plata y Arsénico-Antimonio, luego, con valores alrededor de 0,6 se correlacionan Oro-Plata, Oro-Cobre, Plata-Arsénico y para valores en torno a 0,5 Cobre-Arsénico, Plata-Antimonio y Cobre-Antimonio.

Las correlaciones positivas corresponden a elementos que se habrían formado en la etapa de alta sulfidización de MMH central (Enargita, serie Tenantita-Tetrahedrita, metales preciosos) que se asocia con Alteración Argílica Avanzada. Destaca además la ausencia de correlación de elementos como Pb, Zn y Mo; lo que se puede interpretar como que estos elementos se habrían incorporado al yacimiento en otra etapa o etapas de alteración/mineralización, sin relación estadística con los anteriores.

	Au	Ag	As	Cu	Fe	Mo	Pb	Sb	Zn
Au	1								
Ag	0,681	1							
As	0,491	0,635	1						
Cu	0,678	0,769	0,563	1					
Fe	0,381	0,275	0,262	0,284	1				
Mo	-0,036	-0,011	-0,222	0,019	-0,145	1			
Pb	0,035	0,229	0,236	0,099	-0,126	0,062	1		
Sb	0,433	0,524	0,802	0,506	0,187	-0,231	0,117	1	
Zn	0,025	-0,016	-0,061	0,002	0,031	0,159	0,281	-0,076	1

	CORRELACIÓN $\leq -0,2$ ; $\geq 0,2$ y $< 0,5$
	CORRELACIÓN $\geq 0,5$ Y $< 0,6$
	CORRELACIÓN $\geq 0,6$ Y $< 0,7$
	CORRELACIÓN $\geq 0,7$ Y $< 1$

Figura 23. Matriz de correlación entre elementos químicos de base de datos AAS en MMH central.

En la Figura 24, se muestran los valores de correlación de *Pearson* que se obtuvieron para las mediciones efectuadas por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP). Los siguientes elementos se correlacionan en un grado mayor a 0,7:

- Plata con: Bismuto y Cobre,
- Aluminio con: Galio, Potasio, Litio, Rubidio, Escandio, Torio, Talio y Vanadio
- Arsénico con Antimonio
- Bismuto con; Cobre y Plata
- Galio con: Potasio, Litio, Escandio, Aluminio y Vanadio
- Potasio con: Rubidio, Escandio, Talio, Aluminio, Galio y Vanadio
- Litio con: Escandio, Aluminio, Galio y Vanadio
- Rubidio con: Antimonio, Aluminio, Potasio, Escandio y Talio
- Escandio con: Rubidio, Aluminio, Galio, Potasio, Talio, Litio y Vanadio
- Cobre con: Plata y Bismuto
- Antimonio con Arsénico

En grado entre 0,6 a 0,7, se correlacionan:

- Plata con: Arsénico y Antimonio
- Cobre con Azufre
- Galio con: Germanio, Rubidio, Torio y Talio
- Potasio con Torio
- Molibdeno con Renio
- Rubidio con: Torio y Vanadio
- Escandio con Torio
- Torio con Vanadio
- Talio con Vanadio
- Torio con: Galio, Potasio, Rubidio
- Arsénico con Plata

Correlación entre 0,5 y 0,6:

- Plata con: Azufre y Selenio
- Aluminio con: Germanio, Plomo y Uranio
- Arsénico con Cobre
- Bismuto con: Azufre y Selenio
- Cobre con: Renio, Antimonio y Selenio
- Fierro con Germanio
- Galio con: Plomo y Uranio
- Germanio con: Litio y Vanadio
- Potasio con: Litio, Plomo y Uranio
- Litio con: Rubidio y Torio
- Torio con Talio
- Uranio con Vanadio
- Germanio con: Aluminio y Fierro

De lo anterior se destaca, que Cobre, Plata, Arsénico y Antimonio tienen un alto grado de correlación, lo que se explicaría por la ocurrencia de minerales como Enargita y de la serie Tenantita-Tetraedrita que se asocian con la etapa de alta sulfidización que originó las Brechas Hidrotermales. La correlación Galio-Aluminio se explica porque estos elementos tienen similitud en sus propiedades cristaloquímicas donde el Ga puede entrar en las redes cristalinas, dispersarse y sustituir al Aluminio, que es un elemento formador de rocas. La asociación Renio-Molibdeno se explica por la ocurrencia de Molibdenita en la que el Re puede reemplazar sitios del Molibdeno en la estructura cristalina. De hecho, el Re es uno de los elementos más escasos en la tierra con un promedio de 1 ppb en la corteza, pero ocurre de 0,001 a 0,2% en Molibdenita.

	Ag	Al	As	Bi	Cu	Fe	Ga	Ge	K	Li	Mo	Pb	Rb	Re	S	Sb	Sc	Se	Th	Tl	U	V	Zn	
Ag	1																							
Al	-0,033	1																						
As	0,655	0,017	1																					
Bi	0,714	-0,117	0,424	1																				
Cu	0,843	-0,116	0,552	0,724	1																			
Fe	0,211	0,084	0,155	0,369	0,159	1																		
Ga	0,127	0,946	0,191	-0,030	-0,017	0,096	1																	
Ge	0,251	0,578	0,311	0,230	0,134	0,511	0,622	1																
K	-0,072	0,855	-0,122	-0,163	-0,119	-0,084	0,801	0,325	1															
Li	-0,038	0,778	0,046	-0,185	-0,224	0,056	0,802	0,535	0,594	1														
Mo	0,408	0,009	0,211	0,348	0,423	-0,070	0,082	0,040	0,107	-0,064	1													
Pb	0,247	0,501	0,225	0,040	0,099	-0,043	0,561	0,338	0,502	0,480	0,200	1												
Rb	-0,182	0,769	-0,270	-0,239	-0,197	-0,140	0,677	0,190	0,951	0,531	0,085	0,459	1											
Re	0,444	-0,071	0,112	0,407	0,572	-0,035	-0,034	-0,053	0,055	-0,153	0,664	0,076	0,052	1										
S	0,545	-0,066	0,327	0,551	0,601	0,385	-0,018	0,149	-0,089	-0,191	0,017	0,109	-0,161	0,368	1									
Sb	0,655	0,217	0,831	0,407	0,542	0,158	0,378	0,444	0,059	0,203	0,232	0,316	-0,098	0,143	0,312	1								
Sc	-0,214	0,915	-0,179	-0,254	-0,307	0,091	0,846	0,493	0,818	0,767	-0,065	0,442	0,790	-0,146	-0,213	0,015	1							
Se	0,528	0,055	0,442	0,521	0,547	0,417	0,091	0,455	-0,139	-0,035	0,251	0,101	-0,217	0,194	0,412	0,480	-0,085	1						
Th	-0,168	0,735	-0,219	-0,166	-0,192	-0,098	0,644	0,284	0,661	0,556	-0,012	0,474	0,666	-0,086	-0,066	-0,070	0,691	-0,061	1					
Tl	-0,044	0,702	-0,117	-0,097	-0,069	-0,043	0,637	0,296	0,865	0,499	0,137	0,478	0,875	0,153	-0,073	0,039	0,705	-0,102	0,535	1				
U	0,157	0,545	0,245	0,067	0,106	0,046	0,584	0,381	0,502	0,412	0,212	0,467	0,436	0,029	0,041	0,341	0,474	0,144	0,472	0,448	1			
V	-0,097	0,908	-0,027	-0,183	-0,227	0,151	0,890	0,594	0,757	0,800	0,015	0,494	0,692	-0,147	-0,195	0,170	0,931	0,023	0,655	0,625	0,543	1		
Zn	-0,127	0,071	-0,288	-0,053	-0,135	-0,059	0,010	-0,038	0,205	0,169	0,011	0,386	0,286	0,144	0,002	-0,263	0,157	-0,147	0,243	0,360	0,068	0,085	1	

CORRELACIÓN <= -0,2: >= 0,2 y < 0,5  
 CORRELACIÓN >= 0,5 y < 0,6  
 CORRELACIÓN >= 0,6 y < 0,7  
 CORRELACIÓN >= 0,7 y < 1

Figura 24. Matriz de correlación entre elementos químicos de la base de datos ICP en MMH central

### 3.4.2 ANÁLISIS MULTIVARIABLE POR COMPONENTES PRINCIPALES

Para correlacionar entre sí los elementos químicos que participan en este estudio, se utilizó la técnica de Componentes Principales (CP; ver Anexo). Este procedimiento tiene por objetivo simplificar el estudio de correlaciones multivariantes creando, mediante combinaciones lineales de las variables originales un conjunto de nuevas variables, denominadas Componentes Principales o Factores, donde cada una de ellas va capturando la mayor cantidad posible de variabilidad de los datos, sin que se correlacionen entre sí y que sucesivamente expliquen parte de la varianza que no se logró explicar con la componente anterior; estas componentes principales se obtienen en orden decreciente respecto a la cantidad de variabilidad total que obtengan de la muestra.

El determinar cuántas de estas Componentes Principales se seleccionarán para el análisis, si bien es en parte arbitrario y queda a juicio del investigador, se puede hacer bajo alguno de los siguientes criterios:

1. *Varianza explicada.* Seleccionar una cantidad de factores tal, que la suma de la varianza explicada por todos ellos alcance, aproximadamente, el 70 %.

2. Utilizando un *gráfico de sedimentación*, donde está representado el valor propio vs el factor o componente principal; reteniéndose aquellas componentes que están antes de la inflexión donde el descenso de la curva se estabiliza.
3. *Valor propio o Método de Kaiser*. Se eligen sólo aquellos factores o componentes principales cuyo valor propio asociado es mayor o igual a uno.

Los datos de mediciones de análisis químicos de los elementos medidos por AAS e ICP se procesaron con el software *STATISCA 8.1*, en valores transformados a su Ln y sin datos *extremos*, con ello se optimiza el proceso al trabajar con datos de distribuciones estadísticas próximas a una distribución normal.

El resultado del procesamiento multivariable entregó las Componentes Principales o Factores a los que luego, para facilitar su análisis se les aplicó, a las dos bases de datos, un método de rotación ortogonal de ejes denominado Varimax. El objetivo de esta rotación es obtener un patrón de cargas factoriales más simples para interpretar la estructura de datos que las obtenidas por Componentes Principales.

Finalmente, para la base de datos por AAS, Tabla 8 se muestran las correlaciones de los elementos químicos con las Componentes Principales o Factores sin rotar y en Tabla 9, se indica el porcentaje de varianza retenida por cada factor.

Tabla 8. Factores o componentes principales y su correlación con los elementos químicos de MMH central. (Base de datos AAS).

Elemento Químico	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7	Factor 8	Factor 9
Au	-0,789299	-0,021618	0,341317	-0,000197	0,075709	-0,257990	-0,430784	-0,039933	0,024127
Ag	-0,867178	-0,147896	0,100907	0,162628	0,155571	-0,126535	0,160677	0,321255	-0,142349
As	-0,843943	0,047729	-0,333302	0,009711	-0,161171	0,218984	-0,013533	0,121149	0,292418
Cu	-0,836108	-0,099649	0,228296	0,173569	0,021579	-0,199282	0,297153	-0,274497	0,070147
Fe	-0,432146	0,262720	0,454792	-0,577045	0,205254	0,397580	0,052478	-0,023115	-0,030416
Mo	0,167414	-0,568229	0,504787	0,473975	-0,142082	0,383276	-0,049757	0,004834	0,006243
Pb	-0,199587	-0,689522	-0,491110	-0,080099	0,453009	0,134323	-0,062313	-0,096143	-0,027066
Sb	-0,773131	0,131293	-0,360196	0,048682	-0,372499	0,202684	-0,069739	-0,114965	-0,234528
Zn	0,022550	-0,700822	0,089935	-0,571025	-0,372555	-0,177995	0,044466	0,041188	0,005466

Tabla 9. Valores propios y varianza explicada por las componentes principales o factores en MMH central. (Base de datos AAS).

Componente Principal o Factor	Valor propio	Porcentaje de varianza explicada	Valor Propio acumulado	Porcentaje acumulado de varianza explicada
1	3,64	40,44	3,64	40
2	1,41	15,67	5,05	56
3	1,13	12,56	6,18	69
4	0,95	10,55	7,13	79
5	0,60	6,68	7,73	86
6	0,57	6,29	8,30	92
7	0,32	3,51	8,61	96
8	0,22	2,44	8,83	98
9	0,17	1,87	9,00	100

En la Tabla 10 se muestran los tres primeros factores que se seleccionaron luego de la rotación Varimax de Las Componentes Principales y que en este caso explican un 69 % de la variabilidad de los datos; se han coloreado los datos con valores con asociaciones mayores a  $|0,5|$ .

Tabla 10. Factores rotados por método Varimax. (Base de base de datos AAS).

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Au	0,847766	-0,126738	0,072032
Ag	0,874358	0,137882	-0,023244
As	0,732384	0,292271	-0,451441
Cu	0,871517	0,012264	0,037856
Fe	0,508561	-0,450382	0,033593
Mo	0,002232	0,042851	0,777097
Pb	0,125522	0,855425	0,094648
Sb	0,651171	0,242425	-0,511777
Zn	0,051925	0,439385	0,551355

Los elementos cuya carga factorial es superior  $|0,5|$  para cada Factor son:

Factor 1: Oro, Plata, Arsénico, Cobre, Antimonio y Fierro

Factor 2: Plomo

### Factor 3: Molibdeno y Cinc

Los tres Factores, representarían elementos químicos formadores de minerales de mena e *impurezas*.

Oro, Plata, Cobre y Arsénico tienen una alta correlación con el Factor 1 y se asocian con fluidos de alta sulfidización que depositaron importantes cantidades de minerales de mena e *impurezas* en MMH. El Hierro y Antimonio probablemente también participarían en la formación de minerales, pero no se encuentran en esta base de datos aquellos elementos químicos con los cuales asociarlos para asegurar tal deducción. El Plomo, único de correlación importante con el Factor 2 estaría asociado a la formación de Galena. Finalmente Molibdeno y Cinc, asociados al Factor 3 participarían en la formación de minerales pero de modo independiente (no hay correlación entre ellos), habiendo alcanzado la Molibdenita por probable *telescopeo* las zonas superiores donde se le puede encontrar junto a minerales de Cinc (Esfalerita) (Zúñiga, 2012).

A continuación, en Figura 25, se representan los diagramas *caja* y *bigote* con los factores o componentes principales con los valores que toman en cada alteración dominante.

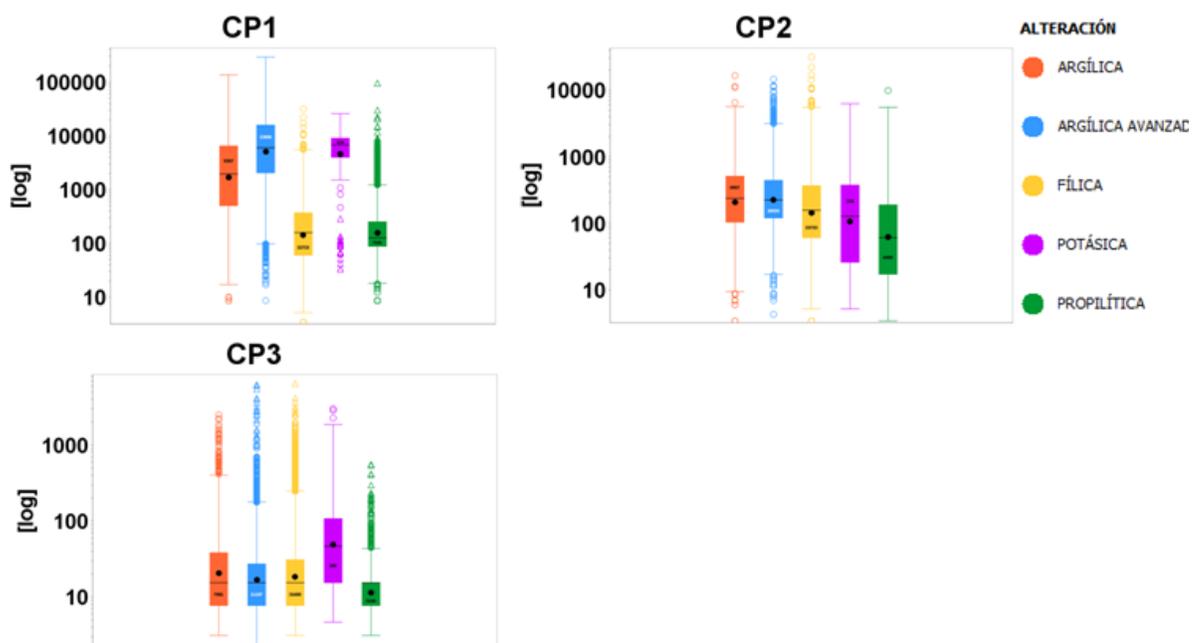


Figura 25. Diagramas *caja* y *bigote* de puntuaciones tipificadas de Componentes Principales en Alteraciones Dominantes de base de datos AAS.

Las Componentes Principales de la Figura 25 fueron tipificadas:

$$CP1 = [Au] * 0,84 + [Ag] * 0,87 + [As] * 0,73 + [Cu] * 0,87 + [Fe] * 0,51 + [Sb] * 0,65$$

$$CP2 = [Pb] * 0,86$$

$$CP3 = [Mo] * 0,78 + [Zn] * 0,55$$

La cantidad de datos con que se construyeron los diagramas CP1, CP2 y CP3 (Figura 25) son, 74.997, 16.084 y 67.286, respectivamente. En los tres factores o componentes, las alteraciones que predominan son Fílica y Argílica Avanzada con un 47% y un 31% de los datos respectivamente, La CP1 presenta, respecto a las otras Componentes, la mayor dispersión de datos. Las mayores y menores concentraciones medias se observan en las CP1 y CP3, respectivamente. En CP1 la mayor concentración de alteración media corresponde a la Argílica Avanzada la cual se asociaría a fluidos de alta sulfidización que aportó la mineralización económica de mayor ley en MMH.

La CP2, podría vincularse a eventos relacionados con las alteraciones Fílica y Argílica Avanzada debido a que estas tienen un 50% de sus datos centrales por sobre las restantes alteraciones. Lo anterior podría explicar la presencia del Plomo con una carga factorial alta en esta componente, indicando que se asociaría a un evento de alta sulfidización.

El diagrama de la CP3, muestra que las alteraciones Fílica y Argílica Avanzada serían las más representativas (Argílica y Potásica tienen muy pocos datos), siendo esta última la que por estar asociada con eventos de alta sulfidización explicaría la presencia de Molibdeno en los sectores más altos del yacimiento donde por probable *telescopeo* se le encuentra en la zona de Cinc (Zúñiga, 2012).

Luego, en Figura 26, se representan los diagramas *caja y bigote* con Factores o Componentes Principales (CP) en las litologías principales.

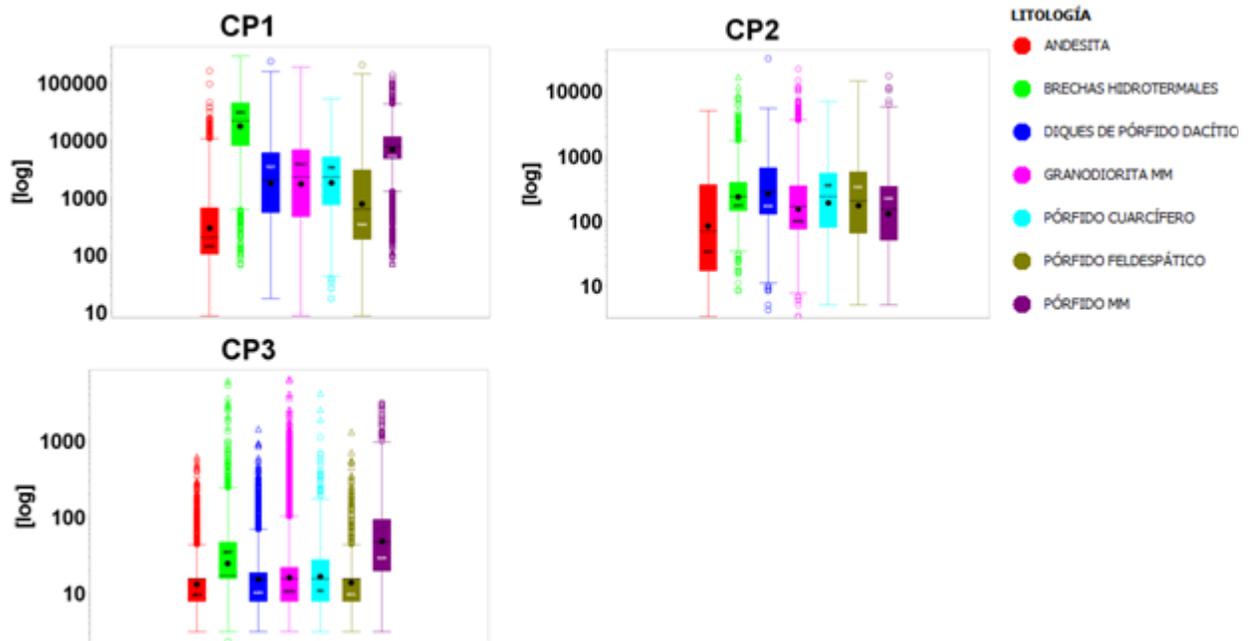


Figura 26. Diagramas de *caja y bigote* de puntuaciones tipificadas de Componentes Principales en Litologías Principales de base de datos ASS.

La CP1 (Figura 26) presenta, en general, la mayor dispersión en cada una de las litologías y también a nivel de agrupación con respecto a lo que se observa en las restantes componentes, lo contrario sucede con la CP3 que tiene la menor dispersión de datos y en rangos de valores más bajos.

En las tres componentes la mayor cantidad de datos los tiene Granodiorita MM (unas 40 mil observaciones que corresponde al 60% de todos los datos), superando en un 90 %, aproximadamente, a la cantidad de datos de las restantes litologías, exceptuando el Pórfido Cuarcífero que tiene el menor número con un 1 %, aproximadamente, de los que tiene Granodiorita MM.

A continuación en la Figura27, se presenta un esquema tridimensional con las asociaciones de elementos químicos correspondientes a cada Factor o Componente Principal:

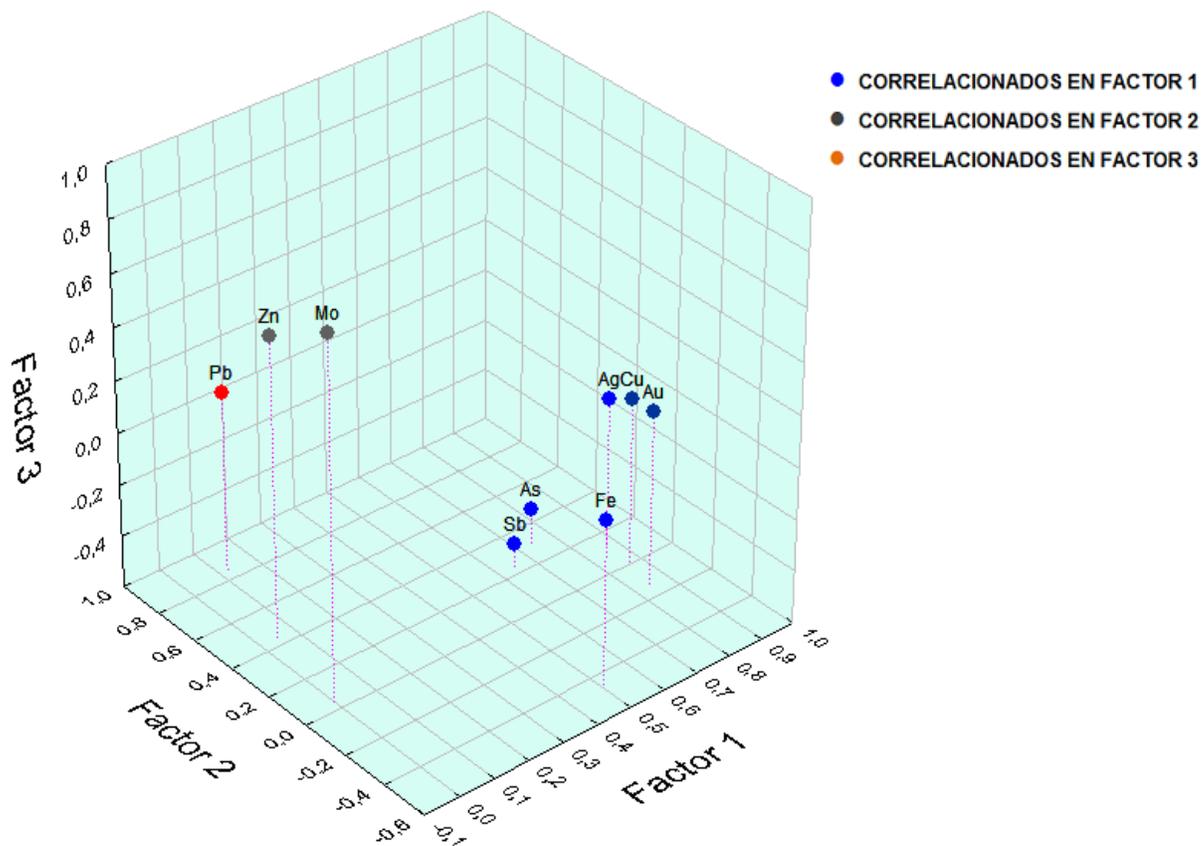


Figura 27. Diagrama 3D de los elementos químicos asociados a los tres primeros factores o componentes principales rotados con Varimax obtenidos de la base de datos AAS.

Luego se procede de la misma forma anterior, con la base de datos ICP. En tablas 11y 12, se representan las cargas factoriales de los elementos químicos en las Componentes Principales o Factores obtenidos sin aplicar el método de rotación de ejes:

Tabla 11. Las diez primeras componentes principales o factores obtenidos para los elementos químicos en MMH central de base de datos ICP.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7	Factor 8	Factor 9	Factor 10
Ag	0,084552	-0,892023	-0,121067	-0,081125	0,081797	0,083306	-0,106780	0,087258	0,008066	0,170583
Al	-0,954050	-0,078614	0,109296	0,003732	-0,112554	0,099132	-0,006478	0,104664	-0,010643	-0,012254
As	0,048922	-0,752278	0,258415	-0,418227	0,211724	0,031708	-0,121060	-0,139855	0,000171	-0,051235
Bi	0,187367	-0,776100	-0,116981	0,258543	-0,061597	0,034692	0,036049	0,023591	0,011863	0,453135
Cu	0,195078	-0,855446	-0,257601	-0,002790	-0,039090	0,181510	0,006729	0,080895	-0,063005	0,082346
Fe	-0,031413	-0,382814	0,445302	0,647771	-0,159758	-0,133553	-0,074402	-0,274177	0,153781	-0,033880
Ga	-0,919431	-0,223723	0,146760	-0,112585	-0,060140	0,064617	-0,065045	0,094440	0,077360	0,006306
Ge	-0,540026	-0,454649	0,455443	0,217514	-0,079098	-0,253202	-0,073713	0,006275	-0,028109	-0,038160
K	-0,901529	0,039568	-0,240303	-0,009361	-0,106578	0,216991	-0,079100	-0,110027	-0,105237	0,000054
Li	-0,809063	-0,003576	0,2275836	-0,067453	0,0947096	-0,166969	-0,201750	0,235758	0,180312	0,074951
Mo	-0,043559	-0,454512	-0,561329	-0,236397	-0,35974	-0,443921	0,082233	-0,023175	0,068919	-0,037664
Pb	-0,612371	-0,272527	-0,196235	-0,081426	0,5306966	-0,16549	0,032240	0,057472	-0,006114	-0,120592
Rb	-0,850962	0,178451	-0,337383	0,0423092	-0,099388	0,1969592	-0,050259	-0,122670	-0,147127	0,009569
Re	0,0728624	-0,474535	-0,700681	0,0734536	-0,269886	-0,090315	-0,135110	0,102155	0,199855	-0,223598
S	0,1447198	-0,630265	-0,077009	0,4394849	0,1829914	0,4450392	0,058530	0,059414	0,178688	-0,259600
Sb	-0,151887	-0,772918	0,2501275	-0,394136	0,1454377	0,0348054	-0,132319	-0,072720	-0,044429	-0,073672
Sc	-0,936054	0,1330118	0,1051409	0,0851012	-0,132014	0,0009121	-0,049430	0,039678	0,016366	0,008276
Se	0,0382947	-0,713128	0,2140247	0,2046197	-0,100289	-0,198966	0,251193	0,128865	-0,451053	-0,167012
Th	-0,766765	0,1194505	-0,104565	0,095946	0,0761166	0,0992349	0,399990	0,305649	0,032561	0,052815
Tl	-0,797962	0,0102033	-0,352298	0,0922809	-0,031456	0,1113125	-0,178564	-0,268417	-0,209479	0,009962
U	-0,61347	-0,287046	-0,019831	-0,188569	0,0917779	-0,038116	0,499905	-0,388006	0,201600	0,036722
V	-0,926179	-0,007552	0,1994379	0,0016604	-0,118409	-0,100075	-0,018117	0,045667	0,063475	0,004220
Zn	-0,226033	0,1722356	-0,470489	0,4150898	0,5653974	-0,330889	-0,107369	-0,051461	-0,047640	0,068164

Tabla 12. Los trece restantes factores o componentes principales obtenidos para los elementos químicos en MMH central de base de datos ICP.

	Factor 13	Factor 14	Factor 15	Factor 16	Factor 17	Factor 18	Factor 19	Factor 20	Factor 21	Factor 22	Factor 23
Ag	-0,050924	0,163277	-0,053392	-0,093219	0,030930	-0,186509	-0,057672	-0,004746	0,013254	0,015286	0,001766
Al	0,038423	-0,029022	0,055632	-0,035402	-0,043516	0,028433	-0,030740	0,102749	0,046378	0,112416	0,027493
As	0,164593	0,020459	-0,035802	0,053319	-0,235407	-0,023040	-0,005517	-0,042278	-0,000463	0,001196	0,000177
Bi	0,006987	-0,223603	0,020275	0,072929	0,004503	0,007371	-0,011519	-0,013999	-0,005050	0,001047	0,000426
Cu	-0,073738	0,179521	0,098302	0,011073	-0,057085	0,185885	0,095251	0,012319	-0,003872	-0,010204	-0,003639
Fe	0,157850	0,133620	0,011693	0,059548	0,032475	0,034076	-0,037832	0,021448	0,002548	-0,000901	-0,001722
Ga	0,012121	-0,047664	0,026357	-0,066582	-0,035254	0,003540	-0,063252	0,141574	-0,021734	-0,094439	0,034025
Ge	-0,323984	0,062264	-0,039209	-0,050008	-0,023019	0,005325	-0,010631	-0,042324	0,006134	-0,001002	0,004496
K	-0,002696	-0,015578	-0,030441	-0,079877	-0,013893	0,058441	-0,118332	-0,017191	-0,031326	0,002823	-0,100785
Li	0,060261	-0,025814	-0,225918	0,079764	0,042031	0,082036	0,015935	-0,032222	0,000968	0,005152	-0,010303
Mo	0,081576	-0,017256	-0,099508	-0,145669	0,004057	0,032689	0,074889	0,007656	0,017770	0,002221	0,001125
Pb	-0,130760	-0,057580	0,039292	0,114253	0,005836	0,028613	-0,009622	0,010445	0,008007	0,005634	-0,002322
Rb	0,026465	0,018151	-0,042735	-0,014199	0,014166	0,054208	-0,073671	-0,128917	0,004207	-0,008664	0,086726
Re	-0,025746	-0,013324	0,087878	0,159843	-0,003430	-0,049190	-0,088691	-0,012905	-0,008832	0,001040	-0,001574
S	0,001381	-0,125755	-0,096041	-0,114198	0,001265	-0,010621	0,075938	-0,019126	-0,001645	0,000724	0,002974
Sb	0,099050	-0,015846	0,103337	-0,023893	0,260581	0,028925	0,006356	-0,019670	0,010152	0,000377	-0,001978
Sc	0,032993	-0,048342	0,133711	-0,007479	-0,042816	-0,060550	0,081797	-0,067695	0,141397	-0,034524	-0,027890
Se	0,077763	-0,080961	-0,039508	0,030375	-0,008155	-0,018193	-0,034563	0,002956	-0,005931	-0,008693	-0,003747
Th	0,123544	0,184218	-0,022232	0,065356	0,034560	-0,036122	0,008023	-0,016770	-0,008797	-0,011650	-0,010570
Tl	-0,027835	0,029244	-0,106284	0,125474	0,036351	-0,082892	0,141712	0,080929	-0,012922	-0,002376	-0,002148
U	-0,073917	-0,018751	-0,014498	0,013699	0,007890	-0,003365	-0,022726	0,003112	0,009039	0,003521	0,000415
V	0,027924	-0,038998	0,143548	-0,040433	-0,027406	-0,062042	0,095766	-0,061666	-0,143936	0,019375	0,002059
Zn	0,101246	0,024505	0,066391	-0,122370	-0,026471	0,009377	-0,015561	0,009209	-0,001078	-0,001556	0,002862

En Tabla 13, se muestran todos los Factores obtenidos del análisis multivariable por Componentes Principales sin aplicar rotación de ejes para las mediciones por ICP. Se indican, el valor propio, el porcentaje de varianza explicada y sus respectivos valores acumulados en porcentaje:

Tabla 13. Valores propios y varianza explicada para las componentes principales o factores en MMH central de la base de datos ICP.

Factor o Componente Principal	Valor propio	Porcentaje de varianza explicada	Valor Propio acumulado	Porcentaje acumulado de varianza explicada
1	8,136154	35,37458	8,13615	35,3746
2	5,292064	23,00898	13,42822	58,3836
3	2,190535	9,52406	15,61875	67,9076
4	1,425478	6,19773	17,04423	74,1053
5	1,050026	4,56533	18,09426	78,6707
6	0,866464	3,76724	18,96072	82,4379
7	0,658300	2,86218	19,61902	85,3001
8	0,574121	2,49618	20,19314	87,7963
9	0,474178	2,06164	20,66732	89,8579
10	0,427978	1,86077	21,09530	91,7187
11	0,374381	1,62774	21,46968	93,3464
12	0,259832	1,12970	21,72951	94,4761
13	0,244911	1,06483	21,97442	95,5410
14	0,201400	0,87565	22,17582	96,4166
15	0,168987	0,73473	22,34481	97,1513
16	0,152877	0,66468	22,49769	97,8160
17	0,140429	0,61056	22,63812	98,4266
18	0,106397	0,46259	22,74451	98,8892
19	0,096072	0,41770	22,84058	99,3069
20	0,069369	0,30161	22,90995	99,6085
21	0,045521	0,19792	22,95547	99,8064
22	0,023845	0,10368	22,97932	99,9101
23	0,020681	0,08992	23,00000	100,0000

En Tabla 14 se presentan las tres primeras Componentes Principales o Factores obtenidos por rotación Varimax, de la base de datos por ICP, explicando un 68%, aproximadamente, de la varianza del total de observaciones y donde se han coloreado aquellos valores de asociación mayor a  $|0,5|$  de las variables con los ejes.

Tabla 14. Primeros tres factores seleccionados rotados con Varimax obtenidas de la base de datos ICP.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Ag	-0,021826	0,883003	0,193240
Al	0,958798	0,017241	-0,093517
As	0,009444	0,772366	-0,196101
Bi	-0,132660	0,775630	0,178669
Cu	-0,136782	0,843622	0,325261
Fe	0,065770	0,414449	-0,411987
Ga	0,935316	0,167059	-0,119239
Ge	0,578336	0,449470	-0,411419
K	0,892536	-0,124834	0,244668
Li	0,810606	-0,037116	-0,218929
Mo	0,067625	0,402925	0,597199
Pb	0,627356	0,210127	0,223717
Rb	0,830599	-0,267083	0,329516
Re	-0,049171	0,420007	0,736629
S	-0,100037	0,630803	0,127237
Sb	0,211068	0,777518	-0,184263
Sc	0,925520	-0,192136	-0,106953
Se	0,016537	0,729062	-0,154984
Th	0,754457	-0,183334	0,101562
Tl	0,789652	-0,097181	0,357724
U	0,632203	0,238831	0,049123
V	0,927259	-0,044022	-0,189456
Zn	0,205780	-0,226018	0,456822

Los elementos cuya carga factorial es superior  $|0,5|$  para cada Factor son:

Factor 1: Aluminio, Galio, Germanio, Potasio, Litio, Plomo, Rubidio, Escandio, Torio, Talio, Uranio y Vanadio

Factor 2: Plata, Arsénico, Bismuto, Cobre, Azufre, Antimonio, Selenio

Factor 3: Molibdeno y Renio.

El Factor 1 representaría a los elementos químicos formadores de roca, con Aluminio y Potasio como elementos mayores. El Aluminio se acompañaría de los elementos traza Galio, Litio, Germanio, Escandio, Uranio y Vanadio. El Potasio lo haría con Rubidio, Escandio, Torio y Talio. El método Varimax asocia al Plomo al Factor 1 con carga factorial baja, lo que no descartaría que este elemento químico tuviese participación en la formación de minerales de mena.

El Factor 2 se asociaría con elementos químicos formadores de minerales de mena. Azufre como elemento mayor formador de mena, se correlaciona con Cobre, Plata, Bismuto y en menor grado con Selenio, Antimonio y Arsénico.

El Factor 3 también se asocia también con elementos químicos formadores de minerales de mena, con el Molibdeno como elemento mayor y Renio como elemento traza asociado (alta correlación entre ellos).

A continuación, en Figura 28, se representan los diagramas *caja y bigote* con las puntuaciones tipificadas de las tres primeras Componentes Principales obtenidas por Varimax en las alteraciones dominantes, de la base de datos ICP:

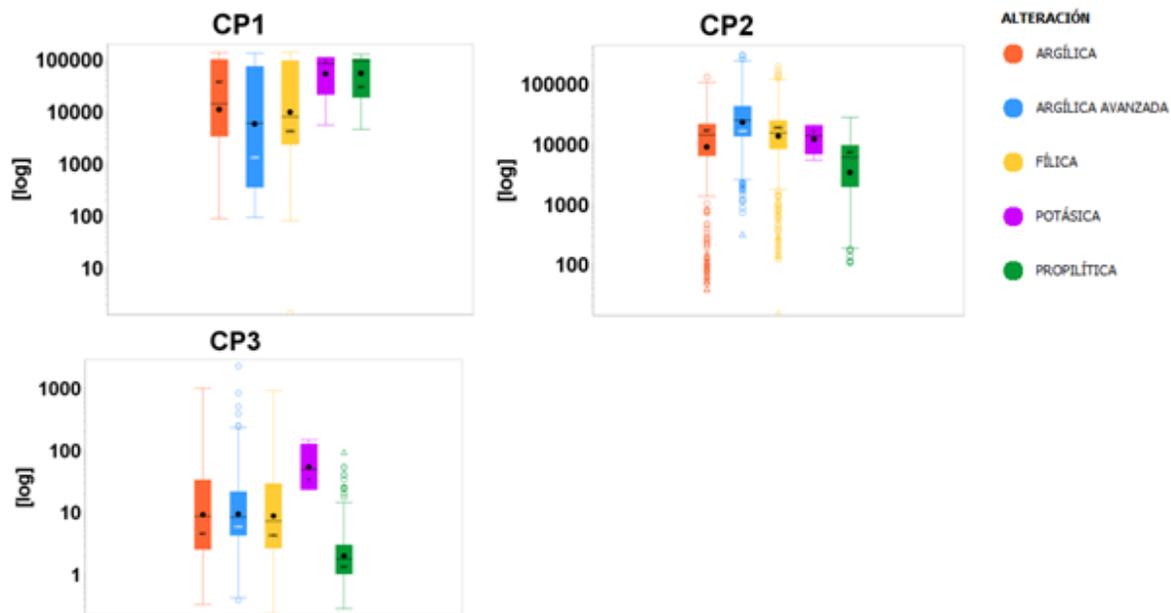


Figura 28. Diagramas de *caja y bigote* con puntuaciones tipificadas de Componentes Principales en Alteraciones Dominantes de base de datos ICP.

Las componentes principales fueron calculadas:

$$CP1 = [Al] * 0,96 + [Ga] * 0,94 + [Ge] * 0,58 + [K] * 0,89 + [Li] * 0,81 + [Pb] * 0,6 + [Rb] * 0,83 + [Sc] * 0,93 + [Th] * 0,75 + [Tl] * 0,79 + [U] * 0,63 + [V] * 0,93$$

$$CP2 = [Ag] * 0,88 + [As] * 0,77 + [Bi] * 0,78 + [Cu] * 0,84 + [S] * 0,63 + [Sb] * 0,78 + [Se] * 0,73$$

$$CP3 = [Mo] * 0,60 + [Re] * 0,74$$

La Figura 28, muestra una alta representatividad de la alteración Argílica Avanzada en la CP2, lo que explicaría la agrupación de elementos comúnmente asociados a eventos de alta sulfidización, como Plata, Arsénico, Bismuto, Cobre, Azufre, Antimonio y Selenio, que poseen una alta carga factorial.

En la CP3, aún cuando la alteración Potásica debe tomarse con restricciones por su baja cantidad de datos, el que sus observaciones tengan valores por sobre las otras alteraciones podría explicar el origen del Molibdeno y del Renio, como productos de la alteración hidrotermal temprana (Alteración Potásica) cuyos vestigios aún permanecen en las zonas más profundas del yacimiento MMH central.

A continuación, en Figura29, se representan los diagramas *caja y bigote* con Factores o Componentes principales rotados con Varimax en las litologías principales:

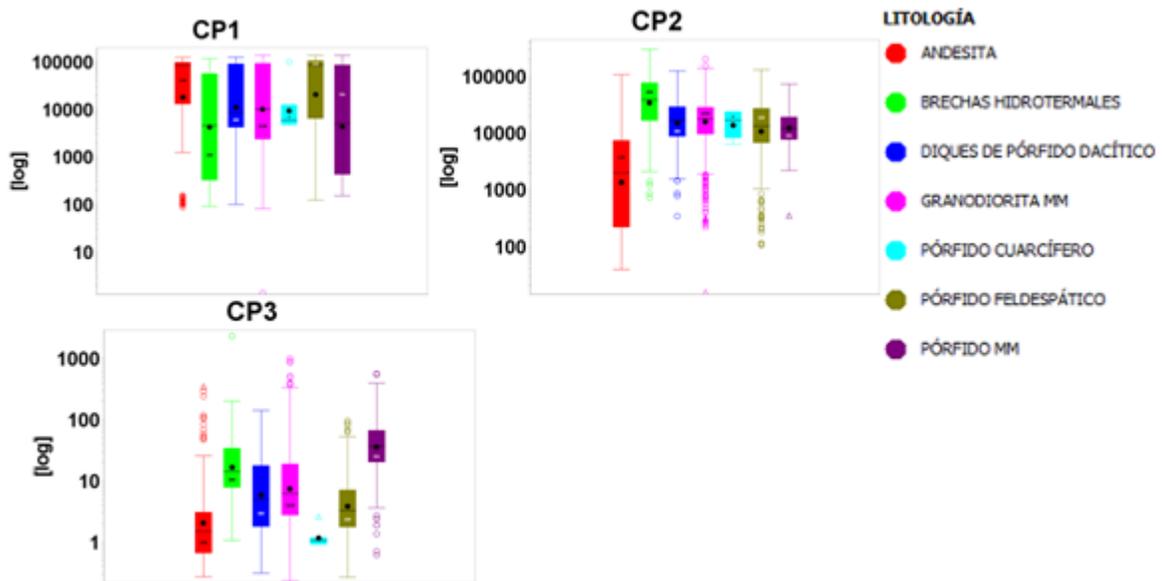


Figura 29. Diagramas de *caja y bigote* con puntuaciones tipificadas de Componentes Principales en Litologías Principales de la base de datos ICP.

En Figura 29, que el diagrama de la CP1 muestre valores altos para la Granodiorita MM, Diques de Pórfido Dacítico y Pórfido Fel despático, indicaría que tanto el Aluminio como el Potasio y sus elementos traza y menores asociados, estarían vinculados a la formación de estas litologías.

En el diagrama de la CP2 asociada a elementos químicos formadores de minerales, el que la Brecha Hidrotermal, aún con una cantidad de observaciones relativamente bajas, muestre valores mayores que las restantes litologías indicaría que esta unidad litológica se habría originado por fluidos de alta sulfidación que contienen a los elementos químicos asociados a esta componente.

Para la CP3, el diagrama muestra para el Pórfido MM valores mayores que para las demás litologías, lo que indicaría que su intrusión podría estar asociada al evento temprano de alteración-mineralización que aportó el Molibdeno y el Renio.

En Figura30 se presenta un esquema tridimensional con las asociaciones de elementos químicos correspondientes a cada Factor o Componente Principal:

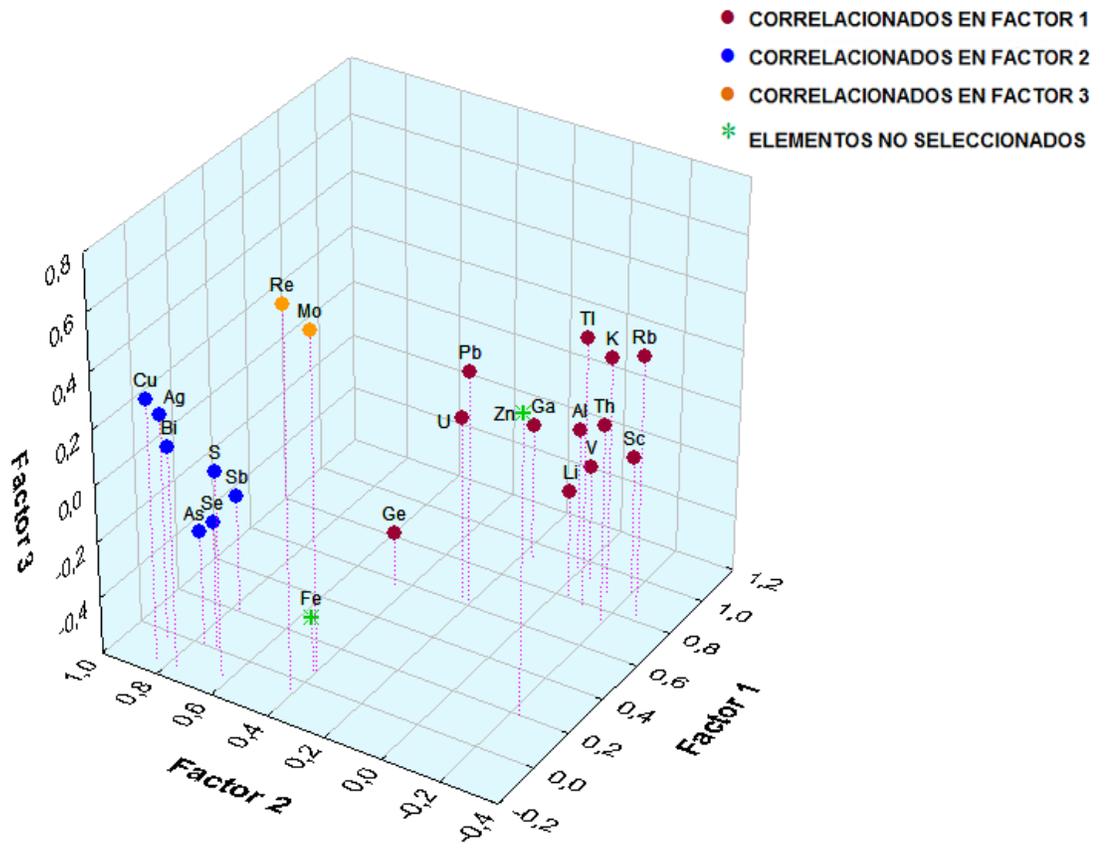


Figura 30. Diagrama 3D de los elementos químicos asociados a los factores o componentes principales rotados con Varimax obtenidos de la base de datos ICP.

## IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Oro, Plata, Cobre y Arsénico se asocian con fluidos de alta sulfidización que depositaron importantes cantidades de minerales de mena e impurezas en el yacimiento. El Plomo como elemento formador de mineral de mena estaría asociado a la formación de Galena. El Molibdeno y el Cinc, participarían en la formación de minerales pero de modo independiente (no hay correlación entre ellos), interpretándose que la Molibdenita que se encuentra en las partes altas del depósito, en zonas de Cinc, habría sido transportado hasta allí por probable *telescopeo*.

De analizar la relación entre los elementos de valor económico con las alteraciones dominantes y las litologías principales se concluye que el Cobre, la Plata y el Oro, se encuentran asociados principalmente a la Alteración Argílica Avanzada de alta sulfidización y en Brechas Hidrotermales, el Molibdeno, en cambio se encontraría asociado a la Alteración Potásica y al Pórfido MM.

Aluminio y Potasio como elementos químicos formadores de roca con sus elementos traza asociados, probablemente están vinculados a las unidades litológicas Granodiorita MM, Diques de Pórfido Dacítico y Pórfido Feldespático. El Aluminio se acompañaría de los elementos traza Galio, Litio, Germanio, Escandio, Uranio y Vanadio y el Potasio con Rubidio, Escandio, Torio y Talio.

Cobre, Plata, Arsénico, Bismuto, Azufre, Selenio y Antimonio tienen un alto grado de correlación, lo que se explicaría por la ocurrencia de minerales como Enargita y de la serie Tenantita-Tetraedrita que se asocian con la etapa de alta sulfidización que originó las Brechas Hidrotermales en Mina Ministro Hales Central.

El Plomo no muestra asociación con otros elementos según se desprende de los resultados de las Componentes Principales rotadas para los datos de AAS, probablemente porque estuvo presente en todas las etapas de mineralización/alteración del yacimiento, particularmente en Argilización Avanzada de alta sulfidización.

Calcosina con distribución de valores de mapeo similar a la Enargita, puede tener dos orígenes, uno por alteración supérgena y otro por eventos de alta sulfidización.

De acuerdo a los resultados obtenidos entre los porcentajes relativos de minerales y las alteraciones dominantes, Bornita y Calcopirita presentan altas concentraciones en la Alteración Potásica.

El conjunto de datos químicos de MMH central evidencia claramente la sobreimposición del evento tardío de Alteración Argílica Avanzada y mineralización de alta sulfidización asociada al mismo. Esta sobreimposición oscurece gran parte de la mineralización introducida en etapas previas. Sin embargo, el análisis estadístico indicaría la independencia de la mineralización de Mo (con Re asociado) probablemente acompañado de Cu más tempranamente y la de Pb-Zn. Asimismo, se revela que las rocas del depósito muestran valores bajos de un conjunto de elementos, inferior al *Clarke*, los cuales probablemente fueron lixiviados por los procesos hidrotermales que afectaron al yacimiento durante su formación.

Se recomienda realizar un estudio similar al realizado en esta tesis, en la zona profunda del sector central de Mina Ministro Hales, bajo la cota 1.800 m, con información proveniente de nuevas muestras, representativas de esa zona, en cantidad y densidad de distribución adecuadas, con análisis químicos y descripciones geológicas principalmente del núcleo potásico, para precisar los eventos de alteración mineralización que ahí se generaron así como la evolución de las litologías de aquellos sectores que serán explotados por minería subterránea.

Se recomienda generar un modelo de distribución espacial de los elementos (económicos e impurezas) y su relación con minerales de alteración para MMH central, que propenda a generar un modelo geometalúrgico, aportando en la optimización de los procesos a los que es sometido el material extraído, para obtener un producto final de mayor calidad y atenuar los efectos de impacto ambiental asociados a los mismos

## V. BIBLIOGRAFÍA

**Alcota, H., Anguita, P., Vargas J., Ahumada, C., Blanco, N., Canales, A., Cepeda, A, Fajardo, J., Lucero, A., Munster, H., Piquer, J., Urrutia, C, Wettke, E., 2009.** Marco Geológico Escala 1:50.000, Geoquímica, Geofísica y Potencial de Exploración del Distrito Chuquicamata, Distrito Codelco Norte, Región de Antofagasta. Informe resultados del programa de Mapeo y exploración, escala 1:50.000. Informe inédito interno Exploraciones Mineras Andinas S.A. Calama, Chile. 14 Mapas, 19 Secciones, 5 Anexos. 153 p

**Ambrus, J. 1979.** Emplazamiento de los Pórfidos Cupríferos de Chile. Ph. D. Tesis Doctor de Ciencias, Departamento de Cristalografía y Mineralogía. Universidad de Salamanca, España, 314 p.

**Audétat, A., Pettke, T., Heinrich, C.A. and Bodnar, R.J.2008.** The composition of magmatic-hydrothermal fluids in barren and mineralized intrusions: *Economic Geology*, v.103, p.877–908.

**Barra, F., Alcota, H., Rivera, S., Valencia, V., Munizaga, F., and Maksaev, V., 2013.** Timing and formation of porphyry Cu-Mo mineralization in the Chuquicamata district, northern Chile: new constraints from the Toki cluster: *Mineralium Deposita*, v. 48, no. 5, p. 629-651.

**Barra, F., Ruiz, J., Mathur, R., Titley, S. 2003.** A Re-Os study of sulfide minerals from the Bagdad porphyry Cu-Mo deposit, northern Arizona, USA. *Mineralium Deposita*, 2003, v 38, p. 585-596.

**Ballard, J. R., Palin, J. M., Williams, I. S. and Campbell, I. H. 2001.** Two ages of porphyry intrusion resolved for super – giant Chuquicamata copper deposit of northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP. *Geology*, p. 29-386.

**Beane, R.1994.** A graphic view of hydrothermal mineral stabilities. *Alteration Processes Associated with Ore-Forming Systems: Geological Association of Canada, Short Course Notes*, v.11, p.1-30.

**Becerra H., Contreras R. 2006.** Proyecto MMH Informe Control de Calidad. Resultados Control de Calidad Impurezas y Subproductos Sondajes 2000, 2001, 2003, 2004, y 2005. Informe interno. Gerencia Geología Codelco Norte. 13 p

**Becerra, H., 2009.** Procedimiento de mapeo MMH. Dirección Geología de Desarrollo Distrital Codelco Norte. Informe interno. 38 p.

**Becerra, H., Díaz, J., Herrera, R. 2009.** Patrones estructurales asociados al pórfido cuprífero MMH. Codelco Norte. XII Congreso Geológico Chileno, 2009.

**Díaz J. 2009.** Informe Modelo Geológico MMH Central Junio 2009. Informe Interno, Dirección Geología Distrital y Desarrollo, Codelco Norte, 96 p.

**Díaz, J. 2010.** Actualización de la Geología del Depósito Mina Ministro Hales (MMH). Informe interno, Dirección Geología Distrital y Desarrollo, Codelco Norte, 96 p.

**Einaudi, M., Hedenquist, J., Inan, E. 2003.** Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. Society of Economic Geologists, Special Publication 10, p.285-313.

**Fournier, R. O.1999.** Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic to brittle rock in the magmatic-epithermal environment. Economic Geology, v. 94, p.1193–1211.

**Ginzburg, A. L. 1964.** Features of the concentration and dispersion of rare elements during endogene processes. Edition A.P. Vinogradov, USSR. Vol. II. Chemistry of the Earth's Crust, p 202-210.

**Gustafson, L. B. 1963.** Phase equilibria in the system Cu-Fe-As-S. Economic Geology, v.58, p.667-701.

**Heinrich, C. A. 2005.** The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition. A thermodynamic study. Mineralium Deposita, v.39, p.864–889.

**Hedenquist, J.W y Richards, J.P. 1998.** The influence of Geochemical Techniques on the development of Genetic Models for Porphyry Copper Deposits. Reviews in Economic Geology de la Society of Economic Geologist. v.10, 22p.

**Krausköpfung, K. and Bird, D. 1995.** Introduction to Geochemistry. Mc Graw Hill, 3° Ed.

**Lacourly, N. 2012.** Estadística Multivariada. J. C. SÁEZ editor, 1 Ed, 195 p.

**Levinson, A. 1980.** Introduction to Exploration Geochemistry. Applied Publishing. 924 p.

**Lira, G. 1989.** Geología del área pre-andina de Calama, con énfasis en la estratigrafía y paleogeografía del Mesozoico, 22° a 22°40' latitud sur, región de Antofagasta. Santiago. Universidad de Chile.

**Lowell, D. 1993.** Mansa Mina. Lowell Mineral Exploration. Nota Interna a Superintendente de Geología. Informe Interno MM (MM-GLGL-1392).

**Maksaev, V., Tomlinson, A. y Blanco, N. 1994.** Estudio geológico de la franja longitudinal comprendida entre Quebrada Blanca y Chuquicamata. Sernageomin. 54p.

**Maksaev, V. 2001.** Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina.

Obtenido de [www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/METALOGENESIS%20DE%20CHILE.pdf](http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/METALOGENESIS%20DE%20CHILE.pdf)

**Maksaev, V. 2001.** Evolución del conocimiento sobre la génesis de los pórfidos cupríferos. Obtenido de [www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/porfidos.html](http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/porfidos.html)

**Maksaev, V., Munizaga, F., and Tassinari, C., 2014.** Timing of the magmatism of the paleo-Pacific border of Gondwana: U-Pb geochronology of Late Paleozoic to Early Mesozoic igneous rocks of the north Chilean Andes between 20 degrees and 31 degrees S. *Andean Geology*, v. 41, no. 3, p. 447-506.

**Marinovic, N., Lashen, A. 1984.** Hoja Calama, Región de Antofagasta. Sernageomin, Carta Geológica de Chile N°58, mapa escala 1:250.000. Santiago.

**Müller, G., Quiroga, J. 2000.** Evaluación Geológica y Estimación de Recursos. Proyecto MM. Sector Central y Norte. Codelco Chile. Informe inédito.

**Müller, G., Quiroga, J. 2003.** Geology of the MM Copper Deposit, Chuquicamata District—An Update. Codelco Chile. X Congreso Geológico Chileno 2003, Universidad de Concepción.

**Ortega, H., Sandoval, A. y Araya V. 2006.** Caracterización Geológica, Geotécnica y Geometalúrgica 2005-2009, CBV, Mina Radomiro Tomic, Modelo Geológico-Febrero 2006. Codelco Norte, 94 p., (Informe Inédito).

**Ossandón, G., Fréaut, R., Gustafson, L. B., Lindsay, D. D., Zentilli, M. 2001.** Geology of the Chuquicamata mine: A progress report: *Economic Geology*, Vol. 96, p. 249-270.

**Pardo y Rivera. 1999.** Exploración básica de seguimiento en distrito Chuquicamata II región. Informe Inédito.

**Pokrovski, G. S., Roux, J. and Harrichoury, J. C. 2005.** Fluid density control on vapor-liquid partitioning of metals in hydrothermal systems. *Geology*, v.33, p.657–660.

**Pokrovski, G. S., Tagirov, B. R., Schott, J., Hazemann, J. L. and Proux, A. 2009.** A new view on gold speciation in sulfur-bearing hydrothermal fluids from *in situ* X-ray absorption spectroscopy and quantum-chemical modeling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.73, p.5406–5427.

**Proffett, J. 2008.** Geologic review of the MM Deposit, Chuquicamata District, Chile.

**Renzetti, B. 1957.** Geology and petrogénesis at Chuquicamata, Chile. Ph. D. Thesis, Indiana University, USA, 71 p.

**Rivera, S. 1995.** Proyecto MM:Programa de Revaluación Geológica. Informe Final. Codelco.

**Rojas, R. 2005.** Proyecto MM. Un pórfido cuprífero clásico y un sistema tardío de alta sulfuración sobreimpuesta. Informe inédito, 42 p.

**Sillitoe, R. 2010.** Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*. v. 105, p.3–41.

**Sillitoe, R., Marquardt, J., Ramírez, F., Becerra, H., Gómez, M. 1996.** Geology of the Concealed MM Porphyry Copper Deposit, Chuquicamata District, Northern Chile. *Society of Economic Geologists, Special Publication N°5*, p.59-70.

**Simon, A. C., Pettke, T., Candela, P. A., Piccoli, P. M. and Heinrich, C. A. 2007.** The partitioning behavior of As and Au in S-free and S-bearing magmatic assemblages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.71, p. 1764–1782.

**Tukey, J. 1977.** Exploratory data analysis. *Addison-Wesly, Reading*.

**Tobey, E. 2005.** Interim Report on Mineralogy and Geochemistry at Mansa Mina. Informe Interno, Codelco Norte, 115 P.

**Tomlinson, A., Blanco, N., Makshev, V., Dilles J.H., Grunder, A., Ladino, M., 2001.** Geología de la precordillera andina de Quebrada Blanca-Chuquicamata, Regiones I y II (20°30'-22°30'). Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEMIN), Sanatiago, Chile. Informe registro IR-08-35, 5 mapas escala 1:50.000

**Thomas, A. 1978.** Geología de la zona Inca. Archivo Técnico. Calama. 16p.

**Wilkinson, J. J., Wilkinson, C. C., Vry, V. H., Rusk, B. G., Séguel, J., Zentilli, M. and Jeffries, T. E. 2008.** Ore fluid chemistry in super-giant porphyry copper deposits [ext. abs.] Pacrim Congress 2008, Gold Coast, Queensland, 2008, Extended Abstracts: Melbourne, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 295–299.

**Williams-Jones, A. E. and Heinrich, C. A. 2005.** Vapor transport of metal sand the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, v.100, p. 1287–1312.

**Zuñiga, V. 2012.** Ocurrencia y distribución de Molibdenita, Esfalerita y Galena en el sistema pórfido cuprífero del yacimiento Mina Ministro Hales. Memoria de Titulo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 132 p.

ANEXO.

ANÁLISIS MULTIVARIANTE POR COMPONENTES PRINCIPALES.

Análisis de Componentes Principales, es una técnica estadística cuya finalidad es reducir la cantidad de variables observables de un grupo de individuos, a un menor número de nuevas variables tratando de mantener la mayor cantidad posible de información. Estas nuevas variables, denominadas Componentes Principales (CP) o Factores, son combinaciones lineales de las originales, no se correlacionan entre sí y se obtienen en orden decreciente de importancia, según la proporción que recojan de la variabilidad original.

El concepto intuitivo de este método es ir encontrando, en el espacio n-dimensional que vincula individuos con variables, aquellas direcciones referenciales (Componentes Principales) que mejor representen las similitudes y diferencias entre los individuos, de modo tal que cada componente, entregue, en forma secuencial, la mayor variabilidad posible de los datos observados de aquella que aún no hayan explicado las anteriores.

Puesto que cada componente principal es una combinación lineal de todas las variables iniciales, las coordenadas de n individuos en la componente principal s se pueden expresar matricialmente del siguiente modo:

$$\begin{bmatrix} y_{1s} \\ \vdots \\ y_{ns} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nt} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} v_{1s} \\ \vdots \\ v_{ts} \end{bmatrix}$$

O de modo más resumido,

$$y_s = \mathbf{X} \mathbf{v}_s$$

Donde:

$y_s$  es el vector que contiene las coordenadas de los  $n$  individuos en la componente principal  $s$   
 $\mathbf{X}$  es la matriz de datos, donde las filas se identifican con los individuos y las columnas con las variables ( $n$  individuos,  $t$  variables originales)

$\mathbf{v}_s$  es el vector de coeficientes para los  $n$  individuos en la componente principal  $s$  (ponderadores de la combinación lineal de las  $t$  variables que representan a los individuos en la CP  $s$ ).

Generalizando lo anterior a todo el conjunto de datos, la representación matricial es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \cdots & y_{nt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{t1} & \cdots & v_{ts} \end{pmatrix}$$

En la cual,

$Y$  es la matriz de valores de cada individuo contenidos en las  $s$  distintas componentes principales  
 $X$  es la matriz de los  $t$  datos observados para cada uno de los  $n$  individuos  
 $V$  es la matriz cuyas columnas son los coeficientes (pesos) de las combinaciones lineales, de la  $t$  variables, que representan a cada una de las  $s$  componentes principales

Para encontrar las Componentes Principales o Factores, se “estandariza” la matriz de datos, restando la media en cada columna a cada uno de los valores que la conforman y luego dividiéndolos por su desviación estándar; lo anterior facilita los cálculos situando el nuevo origen en el “centro de gravedad” de la nube de puntos e independiza las variables de sus unidades de medición (por un escalamiento en desviaciones estándar).

Para hallar la primera componente principal ( $Y_1 = Xv_1$ ) se debe maximizar la siguiente expresión:

$$\text{Var}(Y_1) = \frac{1}{n} y_1' y_1 = v_1' X' X v_1 = v_1' S v_1$$

$v_1'$  vector de coeficientes traspuesto  
 $S$  matriz de covarianzas  
 $v_1$  vector de coeficientes

Puesto que al maximizar se hallaran infinitas posibles soluciones, según sea como varíe el módulo del vector  $v_1$ , se aplica la restricción de que este último sea el vector unitario en la dirección de la primera componente principal, es decir debe cumplirse lo siguiente:

$$v_1' v_1 = 1, \text{ o bien,}$$

$$V' V = I.$$

Lo anterior queda representado por la siguiente función:

$$L(v_1) = v_1' S v_1, \text{ con la restricción de que } v_1' v_1 = 1.$$

Para maximizar esta función aplicando el método de los *multiplicadores de Lagrange*, se llega a la siguiente expresión:

$$L(v_1) = v_1' S v_1 - \lambda(v_1' v_1 - 1)$$

Luego, derivando parcialmente con respecto a  $v_1$  e igualando a cero, se obtiene:

$$S v_1 = \lambda v_1$$

De este modo se ha encontrado, para la matriz de covarianzas, el primer valor propio  $\lambda$  con su vector propio asociado  $\mathbf{v}_1$ .

Ahora, puesto que:

$$\text{Var}(\mathbf{X}\mathbf{v}_1) = \mathbf{v}_1' \mathbf{S} \mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_1 \lambda \mathbf{v}_1' = \lambda$$

$\lambda$  debe corresponder a  $\lambda_1$ , el mayor valor propio de  $\mathbf{S}$ , es decir a la varianza de la muestra en la primera componente principal y el vector propio asociado  $\mathbf{v}_1$  que apunta en la dirección de máxima variabilidad de “la nube” de observaciones, centrada.

Para obtener la segunda componente principal ( $\mathbf{Y}_2 = \mathbf{X}\mathbf{v}_2$ ), también se maximiza la varianza, pero ahora con dos restricciones: una, que el vector  $\mathbf{v}_2$  debe ser unitario y la otra, de que ambas componentes principales, la primera y la segunda, sean perpendiculares entre sí (variables no correlacionadas); lo que se expresa como:

$$\mathbf{v}_2' \mathbf{v}_2 = 1$$

$$\mathbf{v}_2' \mathbf{v}_1 = 0$$

Nuevamente para maximizar se aplican multiplicadores de Lagrange, quedando lo siguiente:

$$L(\mathbf{v}_2) = \mathbf{v}_2' \mathbf{S} \mathbf{v}_2 - \lambda(\mathbf{v}_2' \mathbf{v}_2 - 1) - \delta \mathbf{v}_2' \mathbf{v}_1$$

Derivando parcialmente respecto a  $\mathbf{v}_2$  e igualando a cero, se obtiene:

$$2 \mathbf{S} \mathbf{v}_2 - 2 \lambda \mathbf{v}_2 - \delta \mathbf{v}_1 = 0$$

Expresión que multiplicada por  $\mathbf{v}_1'$ , queda:

$$2 \mathbf{v}_1' \mathbf{S} \mathbf{v}_2 - \lambda \mathbf{v}_1' \mathbf{v}_2 - \delta \mathbf{v}_1' \mathbf{v}_1 = 0$$

es decir,

$$2 \mathbf{v}_1' \mathbf{S} \mathbf{v}_2 - \delta = 0$$

Pero  $\mathbf{v}_1' \mathbf{S} \mathbf{v}_2 = 0$ , luego  $\delta = 0$  en el punto crítico, de modo que:

$$\mathbf{S} \mathbf{v}_2 = \lambda \mathbf{v}_2$$

De este modo se ha obtenido el segundo valor propio con su vector propio asociado, que dan cuenta de la variabilidad y de los factores, respectivamente, sobre la segunda componente principal.

Si se continúa aplicando, de modo similar, este mismo procedimiento, se obtendrán, a partir de la descomposición de la matriz de covarianza (S) en valores y vectores propios, todas las otras componentes principales que faltan por determinar.

Una vez determinadas las componentes principales se puede determinar la cantidad de información (de varianza) recogida por cada una de ellas, lo que se denomina *bondad del ajuste*. Para ello es necesario considerar que la varianza total de las componentes es igual a la suma de los valores propios, la que a su vez coincide con la varianza total. Así, la cantidad de varianza contenida en una determinada componente principal, sobre un total de  $s$  componentes principales, se obtiene dividiendo el valor propio asociado ( $\lambda_r$ ) a esta componente por la suma total de los valores propios:

$$\frac{\lambda_r}{\sum_{i=1}^s \lambda_i}$$

Finalmente, se hace necesario seleccionar, de todas las componentes (factores) que determinen la solución final, la menor cantidad de ellas pero que a la vez entreguen una proporción alta de variancia (i.e. que conserven la mayor parte de la información). Para realizar esta selección, habitualmente se recurre al denominado *gráfico de sedimentación (screeplot)*, donde están representados en *abcisas* el número de la componente principal o factor y en *ordenadas*, los valores propios, en orden decreciente, asociados a cada uno de estos factores; de todos ellos se escogen sólo aquellos que estén antes del punto de inflexión que marca un cambio hacia la estabilización de los valores.

Finalmente, cuando la estructura de datos es difícil de interpretar mediante los resultados que entregan las Componentes Principales, se recurre a métodos de rotación de ejes. La rotación se puede realizar por distintos métodos, de los cuales uno de los más utilizados es la denominada rotación ortogonal *Varimax*. Esta técnica transforma la matriz factorial inicial, en otra más simple, sólo redistribuyendo la varianza explicada entre los factores lo que acentúa la relación que se establece entre los factores y las variables, facilitando así la interpretación de la estructura de los datos.