

**CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO SOBRE LA GÉNESIS DEL
DEPÓSITO DE SULFUROS MASIVOS 'EL ROBLE'; EL CARMÉN DE ATRATO,
DEPARTAMENTO DE CHOCÓ**

**JAIDITH YESENIA RODRIGUEZ MARTINEZ
JOSE LUIS GONZALEZ TOLOSA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2016

**CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO SOBRE LA GÉNESIS DEL DEPÓSITO
DE SULFUROS MASIVOS 'EL ROBLE'; EL CARMÉN DE ATRATO,
DEPARTAMENTO DE CHOCÓ**

**JADITH YESENIA RODRIGUEZ MARTINEZ
JOSE LUIS GONZALEZ TOLOSA**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Geólogo**

Director

PhD. Luis Carlos Mantilla Figueroa

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2016

Dedicatoria:

Dedico este trabajo primero que todo a mis padres y mi hermana, que me apoyaron para alcanzar este logro, con su amor incondicional, aunque distanciados geográficamente, el calor de su fe en mí, logró mantenerme en pie y avanzar, aun cuando no quería seguir.

A mis nonitos Efraín y Lola (q.p.d), ya que siempre creyeron en mí, me cuidaron y me amaron como una hija. Y a mi familia, cada uno a su manera me dio impulso en momentos muy específicos y decisivos.

A mi Ingeniero Jorge Mario Sanjuanelo, quien fue una pieza fundamental en cada uno de los momentos que me llevaron hasta aquí, con su paciencia, inteligencia y amor, logro convencerme de mis capacidades y me enseñó que rendirse no es una opción.

A mis amigos, que fueron pocos, pero muy importantes, las tardes con Silvana acompañadas de un frappe, o en el gym; por las alegrías con Maya y Kathe en Jaguars UIS, las tertulias Geológicas con Gina, almorzar trucha con Jorge Ivan. Y muchos más momentos que compartí con uds que ratifican que la universidad es la mejor etapa de la vida.

A José Luis por aceptarme como compañera de proyecto y aguantar mi mal genio, de verdad que sé que puedo ser muy fastidiosa, pero tienes una paciencia increíble.

Jaidith Yesenia Rodriguez Martinez

Dedicatoria:

A Dios quien primeramente me ha dado valor, fuerza y afecto en momentos de debilidad, me ha llenado de valores, conocimiento y ha puesto en el camino de mi vida a personas que han cambiado el rumbo de la misma.

A mi familia, especialmente mis padres que me otorgaron la vida y con sacrificio reunieron los recursos necesarios para desarrollarme en los ámbitos académicos y sociales que me ayudaron a la formación del profesional que hoy nace.

A la mujer de mi vida Karen Dayana, quien sin su ayuda no hubiese llegado hasta esta etapa de fin de ciclo, quien me ha apoyado de forma física, psicológica, así como emocional en todos y cada uno de los momentos que quise abandonar todo camino; se convirtió en mi mano amiga y en voz de mi conciencia.

Finalmente, y no menos importante a Jaidith Rodriguez, mi compañera de tesis, quien, sin importar el cansancio, calamidades familiares, o falencias por mi parte, estuvo al frente del presente trabajo y se convirtió en la pieza clave en la realización del mismo. Le deseo lo mejor en su vida tanto a nivel profesional como personal y mil gracias por su apoyo y consejos.

José Luis González Tolosa

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela de Geología y al grupo de investigación de Geología Básica y Aplicada (GIGBA), por auspiciar nuestro proyecto de investigación.

Al Profesor Luis Carlos Mantilla Figueroa, por aceptarnos como pupilos en el campo de investigación de los Yacimientos Minerales, por asesorarnos y guiarnos, y también por regañarnos cuando era necesario.

Al profesor José Antonio Henao y a su equipo de trabajo, en el laboratorio de Rayos X de la Universidad industrial de Santander, por realizar sin costo alguno los análisis de Microdifracción de Rayos X utilizados en este proyecto.

A Luis Eduardo Garrido, quien es el encargado del laboratorio de preparación de muestras geológicas, por su asesoría, interés y excelente compañía durante la preparación de las secciones, e incluso después.

A los compañeros que se interesaron en el tema durante el desarrollo del proyecto, y nos hacían preguntas constantes.

A los profesores Carlos Alberto García y Jesús Hernando Mendoza por sus recomendaciones y por apreciar nuestro trabajo.

Finalmente, a la Universidad Industrial de Santander por hacer posible nuestra formación académica profesional, y por brindarnos experiencias únicas que cambiaron nuestra perspectiva de la vida y nos hicieron crecer de forma integral.

RESUMEN

TITULO: CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO SOBRE LA GÉNESIS DEL DEPÓSITO DE SULFUROS MASIVOS 'EL ROBLE'; EL CARMÉN DE ATRATO, DEPARTAMENTO DE CHOCÓ*

AUTORES: JAIDITH YESENIA RODRIGUEZ MARTINEZ

JOSE LUIS GONZALEZ TOLOSA**

PALABRAS CLAVE: Sulfuros masivos, El Roble, sulfidación.

DESCRIPCIÓN:

El depósito de sulfuros masivos El Roble se encuentra en la vereda El Roble, perteneciente al municipio del Carmen de Atrato en el departamento del Chocó. Es el único yacimiento de Cu (\pm Au) que se encuentra actualmente en explotación en el país.

El estudio mineralógico y paragenético de los sulfuros presentes en los cuerpos mineralizados Maximus y Goliath, aflorantes en el depósito, muestra claramente que estos presentan diferencias significativas desde el punto de vista metalogénico. Por un lado, el cuerpo mineralizado Maximus, se caracteriza por presentar tres eventos de mineralización principales, representados por las siguientes paragénesis: Etapa (I): Pirita-Siderita-Loellingita-Qz; Etapa (II): Magnetita-Tetraedrita-Cuarzo; Etapa (III): Calcopirita-Estannita -Pirrotita. Por otro lado, el cuerpo mineralizado denominado como Goliath se caracteriza por presentar Etapa (1): Pirita-Cuarzo-Siderita; Etapa (2) Calcopirita-Estannita-Pirrotita.

Las paragénesis de Maximus indican que los eventos minealizantes (I) y (III) guardan características mineralógicas muy similares a los VMS de baja sulfidación (Aporte de Cu fundamentalmente) y el otro evento (II) de tipo VMS de sulfidación intermedia-alta(?) (Con aporte de Au). Los datos anteriormente referidos, implican que el Au presente en el cuerpo mineralizado Maximus, estaría relacionado con la circulación de fluidos hidrotermales propios de un sistema magmático-hidrotermal, mientras que el Cu predominante en Goliath (y en menor medida en Maximus), estaría relacionado con circulación de fluidos principalmente de origen marino propios de la formación normal de un VMS.

*Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Ph. D Luis Carlos Mantilla Figueroa.

ABSTRACT

TITLE: CONTRIBUTION TO KNOWLEDGE ABOUT GENESIS FROM MASSIVE SULPHIDE DEPOSIT 'EL ROBLE'; EI CARMEN DE ATRATO VILLAGE, CHOCÓ STATE*

AUTHORS: JAIDITH YESENIA RODRIGUEZ MARTINEZ

JOSE LUIS GONZALEZ TOLOSA**

KEYWORDS: Sulfidation state, Colombia, Chocó, massive sulphides, gold

DESCRIPTION:

In a massive sulphide deposit of the western Colombia region, there is the only copper ± gold deposit known as El Roble which is currently in operation in the country. At El Roble deposit there are two important bodies Goliath and Maximus which ones are mixed.

A paragenetic and mineralogical study in sulfides present in both ore bodies Maximus and Goliath, outcropping in EL Roble deposit, it shows differences from metallogenic point of view. On the one hand, the ore body Maximus, is characterized by three main events of mineralization, represented by the following paragenesis: Step (I): pyrite-siderite-Loellingita- quartz; Step (II): magnetite-quartz-Tetrahedrite; Step (III): Chalcopyrite-stannite -Pirrotita. On the other hand, the ore body known as Goliath is characterized by the following paragenesis. Step (1): pyrite-quartz-siderite; Step (2): Chalcopyrite-stannite-Pyrrhotite.

Maximus' paragenesis suggest mineralizing events (I) and (III) are very similar from VMS of low-sulfidation (contribution of copper mainly) and the other event (II), it shows characteristics type VMS sulfidation intermediate-high (?), (contribution of gold). The above mentioned, data imply that present of gold in the ore body Maximus, would be related to the movement of fluids from a magmatic-hydrothermal system, while the copper in Goliath (and to a lesser extent Maximus), would be related circulating fluid mainly marine from VMS normal.

*Grade proyect.

** Physicochemical Engineering's Faculty. Geology School. Director: Ph. D Luis Carlos Mantilla Figueroa.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	19
1.1 Objetivo General	19
1.1.1 Objetivos Específicos.....	19
1.2 Metodología	20
1.2.1 Fase de laboratorio	20
2. GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO	22
2.1 Localización y Vías de Acceso:.....	22
2.2 Relieve:.....	22
2.3 Clima:.....	23
2.4 Hidrología:.....	24
3. GEOLOGIA-MINERALIZACION	25
3.1 Marco Geológico Regional:.....	25
3.2 Geología Deposito “El Roble”	27
3.2.1 Estratigrafía:.....	28

3.2.2 Geología Estructural:	32
3.2.3 Contenido de metales:	32
3.2.4 Tipo de Depósito:	32
3.3 Mineralización El Roble:	34
3.3.1 Cuerpo mineralizado Maximus.....	34
3.3.2 Cuerpo mineralizado Goliath.....	35
4. PRESENTACION RESULTADOS	36
4.1 Mineralogía de Menas	36
4.1.1 Descripción macroscópica de muestras de mena.....	36
4.1.2 Mineralogía de los sulfuros	37
4.2 Paragénesis Mineral	49
4.2.1 Paragénesis de Maximus.....	50
4.2.2 Paragénesis de Goliath.....	51
4.3 Alteración Hidrotermal	52
4.4 Microdifracción de Rayos-X	56
4.4.1 Cuerpo Mineralizado Maximus.....	56
4.4.2 Cuerpo Mineralizado Goliath.....	56
5. ANALISIS-DISCUSSION.....	57
5.1. Antecedentes y Clasificación de los Depósitos.....	57

5.1.3.1 Clasificación basada en el contenido de metales base.....	63
5.1.3.2 Clasificación basada en el contenido de oro.....	63
5.2.3 Discusión	72
6. CONCLUSIONES	74
7. RECOMENDACIONES.....	75
8. REFERENCIAS CITADAS	76
9. BIBLIOGRAFIA.....	79

LISTA DE TABLAS

	pág.
TABLA 1 Contenido de metales en algunas perforaciones a los lentes mineralizados Maximus y Goliat.	33
TABLA 2 Contextos parageneticos generalizados para el cuerpo mineralizado Maximus.	50
TABLA 3 El contexto paragenético general para el cuerpo mineralizado Goliat	51
TABLA 4 Ambiente tectónico en que se desarrollan los depósitos VMS y los tipos de asociación Litoestratigrafica correspondiente.	68

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1 Localización geográfica Mina 'EL ROBLE'.....	23
Figura 2 A la izquierda se presenta el mapa de terrenos de Cediél, (2003) donde se resalta la ubicación correspondiente a la mina El Roble. A la derecha se presenta el mapa de acreción del terreno Cañas Gordas según Cediél, (2003). ..	26
Figura 3 Mapa que representa los elementos tectónicos mayores en el Pacífico Colombiano.....	27
Figura 4 Diagramas de clasificación geoquímica de las rocas volcánicas del Roble por Ortiz et al., (2003). ..	29
Figura 5 Diagramas de clasificación geoquímica de la Fm. Barroso por Rodríguez y Arango (2013). ..	30
Figura 6 Sección longitudinal y sección transversal de la mina “El Roble”. ..	31
Figura 7 Derecha: Lentes de Sulfuros Masivos en la Mina "El Roble" existentes al 2012. Izquierda: Zoom de los lentes “Maximus” y “Goliat” que serán estudiados en este proyecto.	33
Figura 8 Contacto entre los sulfuros masivos y un dique Latítico, B) Venas de Piritita-Calcopirita y parches de Cuarzo-Clorita del Stockwork en núcleo de perforación.....	34
Figura 9 Microfotografías de Pirititas tomadas en Luz Reflejada Plana Polarizada del cuerpo mineralizado Maximus.....	39
Figura 10 Microfotografías de Calcopirita tomadas en Luz Reflejada Plana Polarizada en el cuerpo mineralizado Maximus.....	41
Figura 11 Microfotografías de Estannita tomadas en Luz Reflejada Plana Polarizada en el cuerpo mineralizado Maximus.....	42

Figura 12 Microfotografía de la Esfalerita tomadas en Luz Reflejada Plana Polarizada presente en el cuerpo mineralizado Maximus.....	43
Figura 13 a) Microfotografía de bornita.....	44
Figura 14 Fotografías muestra de mano en el cuerpo mineralizado Goliat.....	45
Figura 15 Microfotografías Luz Reflejada Plana Polarizada en el cuerpo mineralizado Goliat.	47
Figura 16 Microfotografías Luz Reflejada Plana Polarizada en el cuerpo mineralizado Goliat. Izquierda: Estannita en contacto con pirita de 2 generación. Derecha: Estannita en contacto con calcopirita de 3 generación.....	48
Figura 17 Microfotografías Luz Reflejada Plana Polarizada en el cuerpo mineralizado Goliat.	49
Figura 18 Microfotografías de los minerales de alteración presentes en el depósito.	55
Figura 19 Principales ambientes tectónicos donde se desarrollan los depósitos tipo VMS, y algunos depósitos que pueden desarrollarse.....	58
Figura 20 Diagrama esquemático de los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos.	59
Figura 21 Izquierda Esquema de ascenso de magmas desde el manto hacia la corteza oceánica o litosfera en los centros de expansión. Derecha Esquema de formación de las celdas hidrotermales en un sistema sub-marino.....	60
Figura 22 Esquema de la zonación típica de sulfuros en el montículo de un de un deposito tipo VMS.....	62
Figura 23 Triangulo de clasificación de los depósitos VMS según su contenido de metales base.....	64
Figura 24 Superior: Clasificación de los VMS basados en su contenido de Oro (Modificado de Mercier-Langevin et al. 2010). Inferior: Triangulo de clasificación de Poulsen & Hannington para los VMS según su contenido en oro.....	66
Figura 25 Esquema de algunos depósitos canadienses representando cada tipo de VMS	67
Figura 26 Grafica de Fugacidad de O ₂	70

Figura 27 Solubilidad de metales base70

INTRODUCCIÓN

El depósito de sulfuros masivos El Roble se encuentra en la vereda El Roble, perteneciente al municipio del Carmen de Atrato en el departamento del Chocó. Es el único yacimiento de Cu (\pm Au) que se encuentra actualmente en explotación en el país.

Su ubicación sobre la cordillera Occidental Colombiana lo coloca dentro del terreno Cañas Gordas definido por Cediel (2003) en el que afloran rocas de afinidad marina. Debido a su ubicación y la complejidad geológica de la zona, los estudios realizados sobre este yacimiento, han sido comparativamente muy pocos, por esta razón el entendimiento de su génesis, es fundamental para poder identificar blancos de exploración que ayuden a reconocer nuevas áreas con potencial metalogénico (especialmente en trabajos de exploración tipo *brownfield*, y por supuesto también de tipo *greenfield*). Asimismo, el conocimiento sobre las diferencias y similitudes reconocidas en el marco del presente estudio entre los dos cuerpos mineralizados estudiados, creemos también que son de gran importancia para la etapa de beneficio.

El objetivo principal de éste trabajo, se centró en estudiar la metalogénesis del Cu y el Au, presentes en dos importantes cuerpos mineralizados objetos de explotación: Maximus y Goliath; utilizando un número reducido de muestras colectadas en estos dos cuerpos mineralizados referidos. Se espera que los nuevos datos obtenidos en el marco del presente estudio, contribuyan al conocimiento de la génesis del depósito de sulfuros masivos El Roble.

El contenido de este documento es el resultado de un proyecto de grado 'modalidad investigación', realizado en el depósito de sulfuros masivos El Roble (Carmen de Atrato, Chocó), bajo el auspicio de la Escuela de Geología y el Grupo de Investigación en Geología básica y aplicada (GIGBA; antes MINPETGEO).

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Contribuir al conocimiento de la génesis del depósito de Sulfuros Masivos 'El Roble' (Municipio Carmen de Atrato, Dpto. de Chocó).

1.1.1 Objetivos Específicos

- Con base en la compilación y análisis de la bibliografía existente, contextualizar desde el punto de vista de la geología regional y local el área objeto de estudio.
- Realizar un análisis paragenético preliminar de los cuerpos mineralizados Maximus y Goliath (objetos de explotación en la Mina el Roble) y de sus posibles alteraciones hidrotermales asociadas, con el propósito de caracterizar las diferencias entre cuerpos mineralizados.
- Debatir a la luz de los datos obtenidos y los modelos ya propuestos en la bibliografía sobre el origen y la evolución del depósito El Roble, la metalogénesis del Cu (\pm Au) allí presentes.

1.2 Metodología

Para el logro de los objetivos antes mencionados, se siguió una metodología convencional, compuesta por las siguientes fases: Oficina (búsqueda y análisis de la información existente), Campo (toma de muestras y datos colectados especialmente durante una salida realizada por estudiantes de la asignatura de Yacimientos Minerales correspondiente al primer semestre académico del año 2014. Laboratorio, Interpretación de datos y elaboración del documento técnico final (trabajo de tesis de pregrado). Debido a la importancia en la obtención de nuevos datos, a continuación, se documenta de manera más amplia, lo relacionado con la fase 'Laboratorio'

1.2.1 Fase de laboratorio

Durante ésta fase, se realizó: (a) la descripción macroscópica de las muestras colectadas previamente en la fase campo y elaboración de secciones delgadas y pulidas; (b) los análisis de microscopía óptica y; (c) la identificación de las fases minerales presentes en las muestras de roca, mediante análisis de Microdifracción de Rayos X (MDRX). A continuación, se describen las condiciones en las cuales se realizaron los respectivos análisis de laboratorio, y las características de los equipos analíticos utilizados.

Los análisis de secciones delgadas en escala microscópica se realizaron con el uso de un microscopio LEICA, modelo DM750P. Del mismo modo, para el análisis microscópico de secciones pulidas se empleó un microscopio de luz reflejada NIKON, modelo Optiphot 100. Por otra parte, en la obtención de resultados de micro difracción de rayos-x de las fases cristalinas (análisis cualitativo), se emplearon 3 muestras pulidas. La toma de datos fue realizada por cortesía del laboratorio de rayos x de la Universidad Industrial de Santander usando un

difractómetro de polvo marca BRUCKER, modelo D8 DISCOVER con Geometría DaVinci, bajo las siguientes condiciones:

Voltaje 40 (kV)

Corriente 40 (mA)

Micro rendija de Divergencia 1 mm (diámetro)

Colimador 1 mm (diámetro)

Rango de Medición 40 -60 ° 2theta (en 2 intervalos)

Incremento del intervalo 20 ° 2theta

Rango de integración 24 -79° 2theta con paso de 0,01° 2theta

Radiación CuK α 1

Detector Bidimensional Vantec-500

Uso de dispersor de Aire: No

Tipo de barrido: A pasos

Tiempo de medición 720 segundos

2. GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO

La información presentada en esta sección presenta una descripción general del área objeto de estudio¹.

2.1 Localización y Vías de Acceso:

El proyecto minero El Roble, se encuentra localizado en la Vereda El Roble, jurisdicción del municipio de Carmen de Atrato en el departamento del Chocó (Figura 1), en la cordillera occidental de Colombia, pasando por la quebrada el Roble y a desembocadura del río Atrato a 4km del municipio Carmen de Atrato a 123 km de Medellín (Capital del departamento de Antioquia) y 111 km de Quibdó (Capital del departamento del Chocó), en las coordenadas 5° 54' 40" latitud N y 76° 12' 30" longitud O.

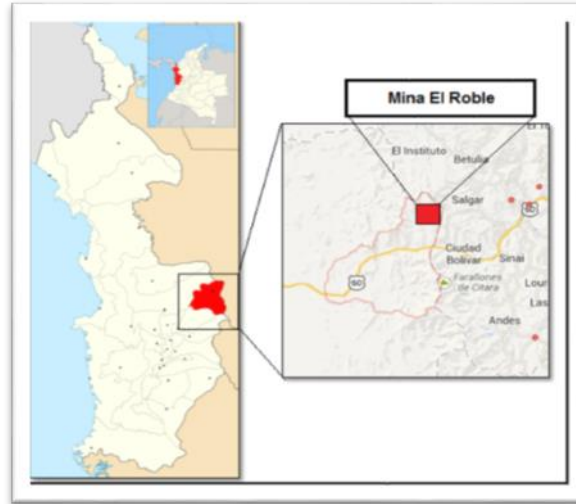
El Carmen de Atrato no cuenta con aeropuerto, por lo cual se debe llegar hasta la ciudad de Medellín (Antioquia) o Quibdó (Chocó) y desplazarse por vías terrestres hasta el municipio.

2.2 Relieve:

El municipio está conformado por tres grandes unidades de paisaje: Montañas, lomerío y valles. La zona montañosa se encuentra en la cordillera occidental, dominada por picos, cerros y profundos valles. Los lomeríos son las lomas y colinas ubicadas en la parte central que se extiende desde el río Atrato a las estribaciones de la cordillera occidental. Y los valles aluviales son las tierras bajas aluviales del río Atrato.

¹ Resumen-Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio El Carmen de Atrato (Chocó). Disponible en http://www.elcarmendeatrato-choco.gov.co/apc-aa-files/63333334663530373664373762363562/Resumen_EOT.pdf

Figura 1 Localización geográfica Mina 'EL ROBLE'.



Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colombia_-_Choc%C3%B3_-_El_Carmen_de_Atrato.svg

El Carmen de Atrato posee una serie de cerros altos y escarpados conocidos por el nombre de “Los Farallones del Citará), el cerro San Fernando y el San Nicolás con alturas de 3810 y 3780 m.s.n.m respectivamente. Y cerros de alta peligrosidad para la navegación aérea como El Plateado y El Toro con 3100 y 2438,4 m.s.n.m respectivamente. La cabecera municipal está ubicada a 1700 m.s.n.m, su punto más bajo se encuentra en los límites con el municipio de Quibdó a 400 m.s.n.m y en los límites con el departamento de Antioquia su punto más alto con 3300 m.s.n.m.

2.3 Clima:

El municipio cuenta con tres tipos de climas de acuerdo con la clasificación climática para Colombia: Frio (2000-3000 m.s.n.m) con una temperatura promedio

anual de 15 °C; templado muy húmedo (1000-2000 m.s.n.m) y cálido muy húmedo (150-1000 m.s.n.m); los climas cálidos presentan un promedio anual de temperatura de 26 °C.

2.4 Hidrología:

Este municipio hace parte de la cuenca del Rio Atrato, el cual nace del cerro El plateado, con un recorrido de 700 km y cuenta con 500km navegables, este rio desemboca al Golfo de Urabá, su caudal esta alimentado por aproximadamente 150 quebradas y 3000 arroyos. Este es considerado como el rio más caudaloso del mundo (con relación a su recorrido), arrastra 4000 metros cúbicos de agua por segundo aproximadamente.

3. GEOLOGIA-MINERALIZACION

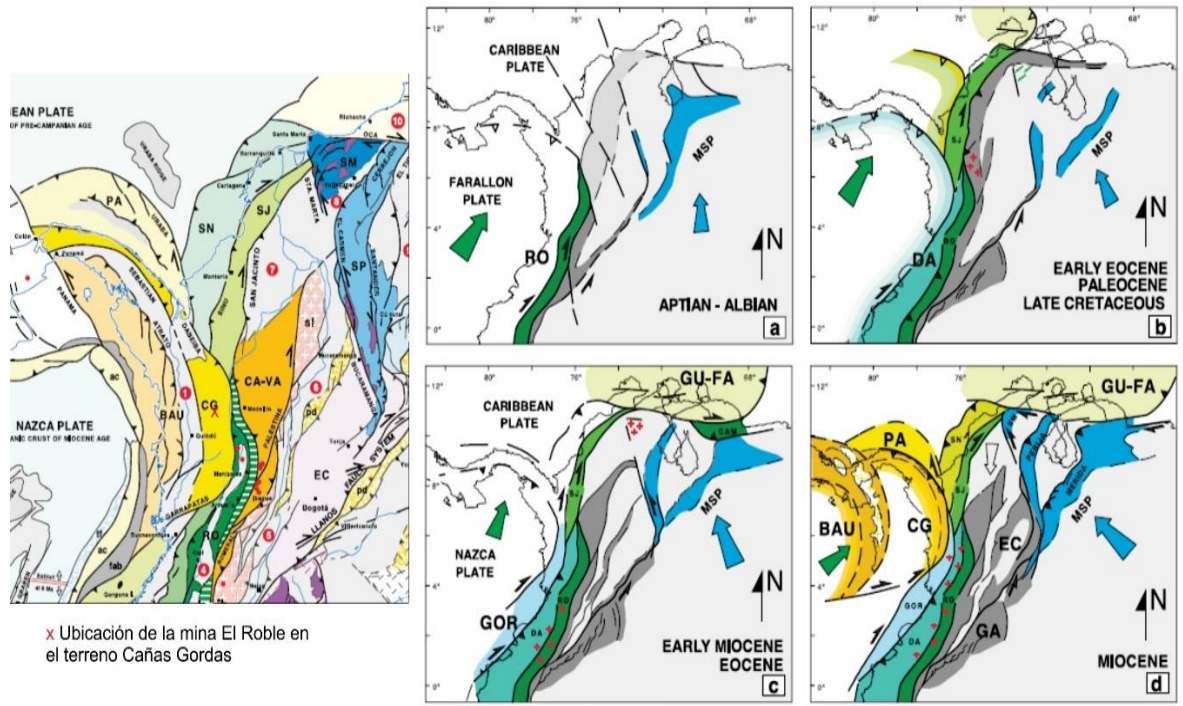
Con el propósito de contextualizar el área de estudio, en el marco de la geología regional y local, a continuación, se presenta un breve resumen sobre éstos aspectos, apoyados en la información disponible en la bibliografía especializada. Finalmente, se presentará adicionalmente un resumen sobre la génesis del depósito El Roble.

3.1 Marco Geológico Regional:

Dentro de la designación de terrenos propuesta por Cediel (2003)² el área de estudio se encuentra ubicada entre los terrenos Cañas Gordas y Baudó (Figura 2 Izquierda), los cuales conforman el llamado “Arco de Chocó” que a su vez es un segmento del Arco de Panamá. El terreno Cañas Gordas es una secuencia volcánico sedimentaria oceánica de edad Cretácica; la porción de rocas basálticas y basalto-andesitas reflejan afinidad de arco volcánico de margen continental, este terreno es intruido por cuerpos que son producto de magmatismo de arco volcánico intra oceánicos. Mientras que el terreno Baudó es dominado por basaltos toléiticos de edad Cretácico - Paleógeno; con algunos estratos siliciclásticos y piroclásticos. La acreción de este terreno al continente se da en el Mioceno debido a la convergencia entre la placa Farallones, la placa Caribe y el continente; aunque su formación inicia desde el Aptiano-Albiano (Figura 2 Derecha)².

² Cediel, F., R. P. Shaw, And C. Caceres, (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block, en C. Bartolini, R. T. Buffler, y J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 815–848

Figura 2 A la izquierda se presenta el mapa de terrenos de Cediel, (2003) donde se resalta la ubicación correspondiente a la mina El Roble. A la derecha se presenta el mapa de acreción del terreno Cañas Gordas según Cediel, (2003).



Fuente: Modificado de *Tectonic assembly of the Northern Andean Block*. (2003)

En la zona del arco de Chocó se puede reconocer los elementos tectónicos principales (Figura 3) (Bedoya et al., 2009)³.

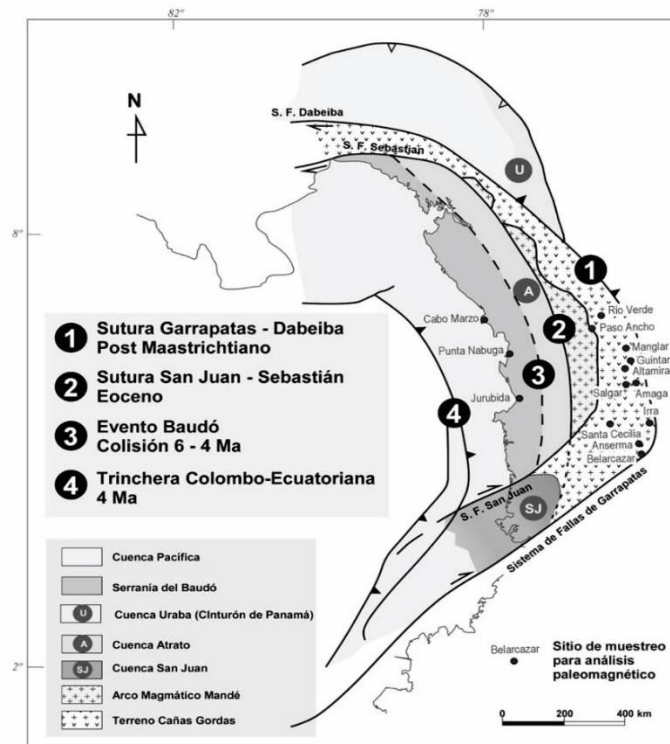
La Sutura Garrapatas-Dabeiba (Edad: Post-Cretácico Tardío) La acreción continental provocada por la colisión del terreno cañas gordas se ve reflejada por la sutura Garrapatas-Dabeiba, de edad post-Maastrichtiano.

La Sutura San Juan-Sebastián (Edad: Eoceno) Es el segundo evento tectónico de importancia regional es la llegada del denominado Terreno El Paso. Durante el proceso de subducción se genera el Arco Magmático de Mandé.

³ Bedoya G., Cediel F., Restrepo-Correa I., Cuartas C., Montenegro G., Marín-Cerón M.I., Mojica J., Cerón R., (2009). Aportes al conocimiento de la evolución geológica de las cuencas Atrato y San Juan dentro del arco Panamá-Chocó: Boletín de Geología Vol. 31, N° 2, p. 2-11.

Arco Baudó (Edad 8-4 Ma) Las edades para este evento son inciertas, los mecanismos que propician la aparición de la Serranía de Baudó no están suficientemente documentados. Sin embargo, son los que conducen a la formación de un margen continental y el cierre de la Cuenca Atrato.

Figura 3 Mapa que representa los elementos tectónicos mayores en el Pacífico Colombiano.



Fuente: Aportes al conocimiento de la evolución geológica de las cuencas Atrato y San Juan dentro del arco Panamá-Chocó (2009).

3.2 Geología Deposito “El Roble”

A continuación, se presenta una descripción del depósito El Roble, basados en la bibliografía disponible.

3.2.1 Estratigrafía:

El depósito se encuentra ubicado en el contacto entre los flujos volcánicos de composición máfica (toleítica) correspondientes a la Fm. Barroso, la cual es supra yacida por sedimentos pelágicos pertenecientes a la Fm. Penderisco que se divide en dos miembros: Urrao (inferior) y Nutibara (superior), e *intrusivos andesíticos y latíticos* (Figura 6). Todas estas unidades rocosas han sufrido procesos de deformación y metamorfismo ocurridos durante el Cretácico superior y el Paleógeno y pertenecen al grupo Cañas Gordas. Los geólogos de Ático Mining Corporation han definido que de forma local la Fm. Barroso incluye basaltos almohadillados, tobas, brechas y aglomerados; también se han reconocido flujos de andesita-dacita-riolita y significativos miembros piroclásticos. Los flujos basálticos a menudo son separados por delgadas láminas negras Chert con pirita y grafito. Rodríguez y Arango (2013)⁴ considera que las rocas volcánicas de la formación son únicamente las que no poseen texturas diabásicas. La Fm. Barroso ha sido estudiada a nivel geoquímico según Ortiz (2003)⁵ quien clasifica estas rocas como toleíticas a calco-alcálicas de afinidad MORB (Figura 4). Mientras que según Rodríguez y Arango (2013)⁴ las rocas corresponden a arco volcánico toleítico con afinidad sub-alcálica (Figura 5). Restrepo y Toussant (1988)⁶ asignan para esta formación una edad de Aptiano-Albiano y hasta el Cenomaniano.

Por otro lado, la formación Penderisco se constituye de Chert, limolitas y en menor proporción calizas. El “Black Chert” (siguiendo la terminología usada por Ático Mining Corporation) con alta concentración de pirita y localmente grafitoso alcanza un espesor de hasta 30 metros y es la roca caja de la mineralización. Este Black Chert se encuentra cubierto por el “Grey Chert” (siguiendo la terminología usada

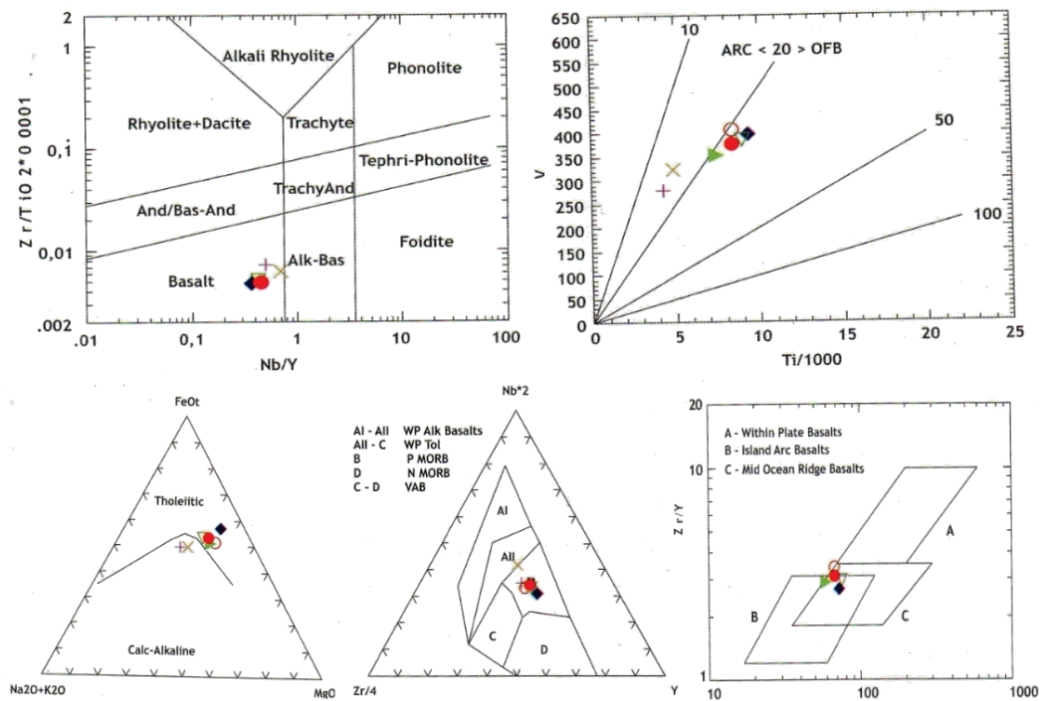
⁴ Rodríguez, G., y Arango, M. A., (2013). Formación barroso: arco volcánico toleítico y diabasas de san José de urama: un prisma acrecionario T-MORB en el segmento norte de la cordillera occidental de Colombia. En Boletín Ciencias de la Tierra, Nro. 33, pp. 17-38.

⁵ Ortiz, F., Gaviria, A.C., Parra, N., Arango, J.C., Ramirez, G., (2003). Guías geológicas para la localización de metales preciosos en las ofiolitas del occidente de Colombia. Complejos ofiolíticos en IBEROAMÉRICA. Proyecto XIII.1 – CYTED (Ciencia y Tecnología para el Desarrollo). p. 186-197.

⁶ Restrepo, J. J. and Toussaint, J. F. (1988). Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. En Episodes, Vol. 11, pp. 189-193.

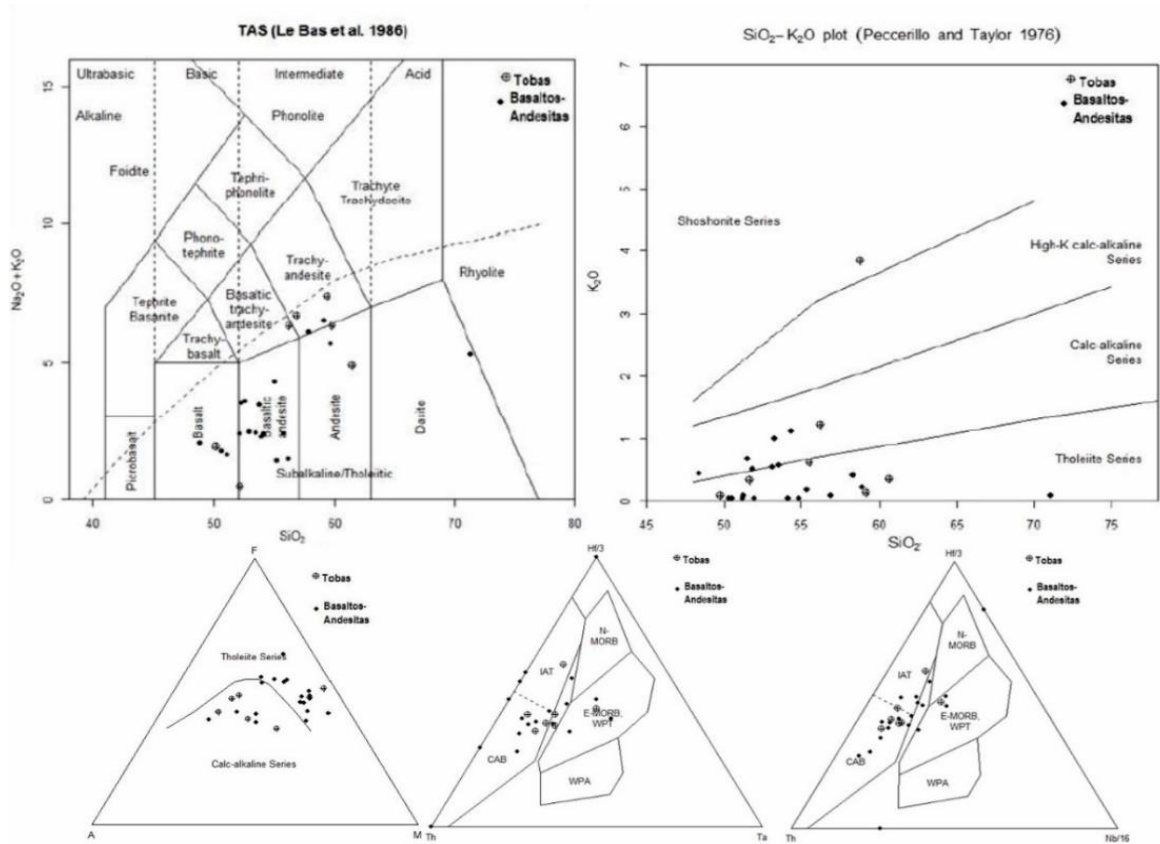
por Ático Mining Corporation) está constituido por tobas silicificadas de grano fino. Estratigráficamente por encima del Grey Chert se encuentra una secuencia de areniscas inmaduras, limolitas y sedimentos pelágicos con grafito y pirita, además de lutitas negras con calizas. La secuencia estratigráfica se encuentra volcada y buzando hacia el E en las cercanías de la mina. Los diques andesíticos y latíticos cortan la roca caja y los sulfuros masivos (Figura 6). Estos diques presentan mineralización localizada, posiblemente como resultado de re-mobilización del Cu.

Figura 4 Diagramas de clasificación geoquímica de las rocas volcánicas del Roble por Ortiz et al., (2003).



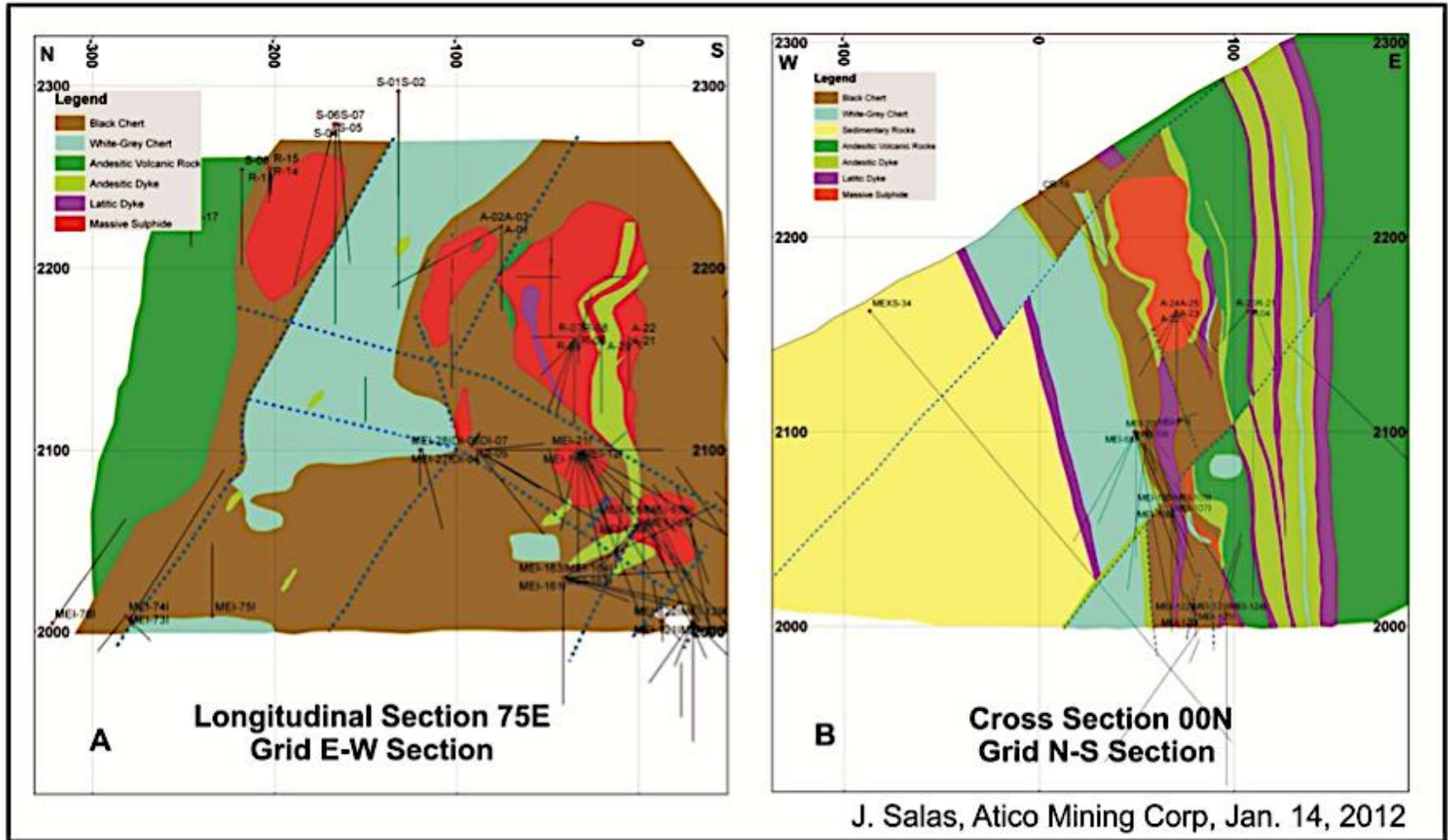
Fuente: Guías geológicas para la localización de metales preciosos en las ofiolitas del occidente de Colombia. Complejos ofiolíticos en IBEROAMÉRICA. (2003).

Figura 5 Diagramas de clasificación geoquímica de la Fm. Barroso por Rodríguez y Arango (2013).



Fuente: Formación barrosa: arco volcánico toleítico y diabasas de san José de urama: un prisma acrecionario T-MORB en el segmento norte de la cordillera occidental de Colombia. (2013).

Figura 6 Sección longitudinal y sección transversal de la mina “El Roble”.



J. Salas, Atico Mining Corp, Jan. 14, 2012

Fuente: Ático Mining Corporation (2012).

3.2.2 Geología Estructural:

La tendencia estructural predominante es un estilo tectónico de bloques con fallas cortas, buzamientos muy inclinados e incluso verticales. En la mina la tendencia estructural es NW a causa de una llamativa falla regional (Falla de Los Paraguas o Rio Blanco), que también es responsable del desmembramiento de los lentes de sulfuros masivos (Ático *Mining Corporation* 2012)⁷. Para esta investigación estudiaremos los lentes de sulfuros nombrados como “Maximus” y “Goliath” (Figura 8).

Otras estructuras regionales que afectan el municipio del Carmen de Atrato son: La Falla del Rio Verde; que define el contacto entre el Grupo Cañas Gordas y el Complejo Santa Cecilia- La Equis y La Falla de Garrapatas, que, aunque no es de gran extensión representa un rasgo tectónico muy marcado en la región (*Municipio El Carmen de Atrato. Chocó 2000*)¹.

3.2.3 Contenido de metales:

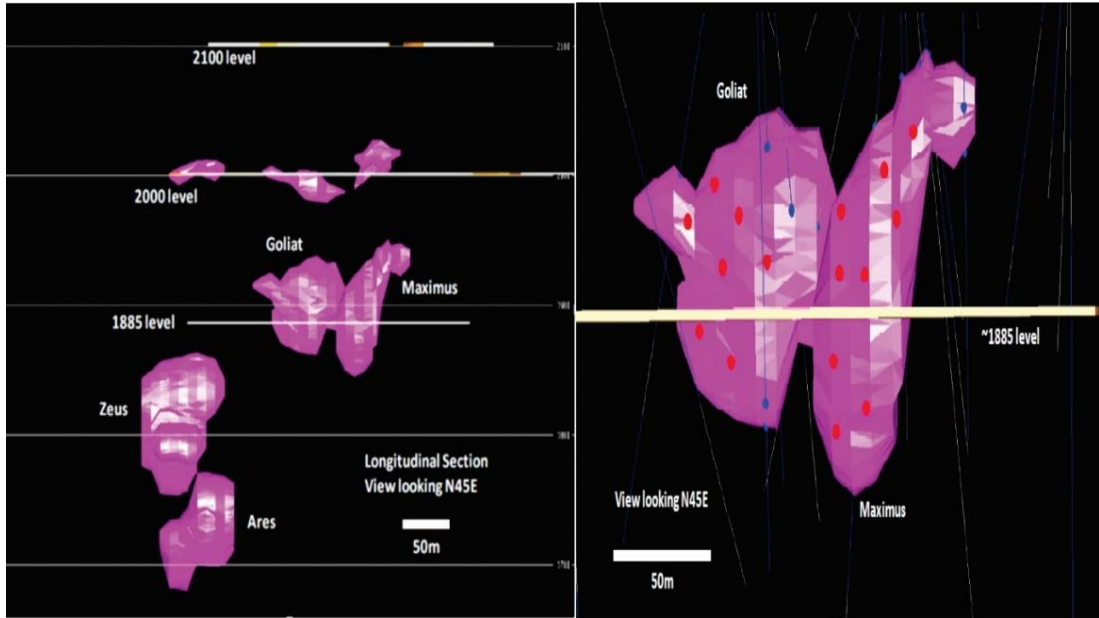
Los cuerpos Maximus y Goliath contienen cantidades importantes de Cu, Au y Ag. En la TABLA 1, se presentan algunos valores de contenido de metales obtenidos durante la exploración de los lentes. Donde se observa claramente la diferencia en contenido de metales de cada cuerpo. Siendo Goliath muy rico en cobre, con escasos oro y plata; y Maximus un cuerpo con gran contenido de oro y plata.

3.2.4 Tipo de Depósito:

Actualmente el depósito se encuentra clasificado como un depósito de *Sulfuros Masivos Volcanogenicos* tipo Máfico o tipo Chipre (Ortiz *et al.*, 2003)⁵. Otros depósitos en Colombia que han sido clasificados del mismo tipo son Guadalupe (Antioquia), La Equis (Chocó), Sábana blanca (Valle del Cauca) (Ático *Mining Corporation*, 2012)⁷.

⁷ Ático Mining Corporation. August 27th, 2012. Technical report on the El Roble project, Chocó Department, Colombia, No 1.

Figura 7 Derecha: Lentes de Sulfuros Masivos en la Mina "El Roble" existentes al 2012. Izquierda: Zoom de los lentes "Maximus" y "Goliat" que serán estudiados en este proyecto.



Fuente: Ático Mining Corporation (2012).

TABLA 1 Contenido de metales en algunas perforaciones a los lentes mineralizados Maximus y Goliat.

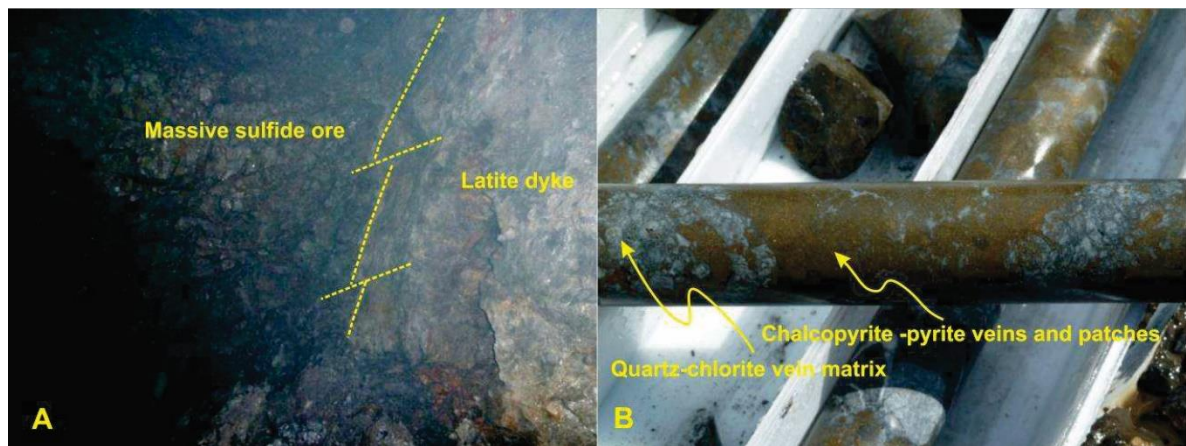
Body	Hole ID	Intercept (m)		Interval (m)	Cu (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)
		From	To				
Goliath	ATDHR-01	109.2	151.0	41.7	6.54	1.82	7.43
	Including	109.2	111.0	1.7	9.00	4.81	22.2
		121.0	123.0	2.0	6.87	10.27	11.4
		125.0	141.0	16.0	7.13	1.00	3.87
		143.0	145.0	2.0	14.85	0.91	15.15
	ATDHR-12	113.9	132.1	18.15	10.30	2.10	6.59
	Including	113.9	118.0	4.10	11.06	6.46	17.57
		120.0	122.0	2.00	15.91	0.78	3.23
122.0		126.0	4.00	17.45	1.06	3.94	
ATDHR-20	128.0	148.4	20.40	5.25	1.28	6.16	
Maximus	ATDHR-04	61.0	102.0	41.0	6.49	17.57	13.26
	Including	75.0	85.0	10.0	3.00	3.59	12.77
		85.0	95.0	10.0	18.40	8.63	19.29
		95.0	97.0	2.0	3.92	250.0	21.2
		97.0	102.0	5.0	6.05	7.21	13.20
	ATDHR-05	70.0	79.0	9.0	2.50	2.31	16.17
	Including	75.5	77.0	1.5	3.81	9.41	145.5
		77.0	78.0	1.0	10.82	1.60	0.00
	ATDHR-17	71.8	160.5	88.70	5.41	2.48	10.83
	Including	71.8	75.2	3.40	11.50	7.22	13.77
		100.3	104.1	3.80	7.17	3.89	18.20
		141.1	149.5	8.45	12.96	1.09	12.70

Fuente: Modificado de <http://www.aticomining.com/i/pdf/presentation/presentation.pdf>.

3.3 Mineralización El Roble:

Los sulfuros masivos se conforman predominantemente de pirita y calcopirita; la calcopirita rellena el espacio entre los granos de pirita junto con Pirrotita menor, esfalerita, magnetita. Se explota recientemente una mineralización de *Stockwork* que consiste básicamente en calcopirita con pirita subordinada en las venas grandes y parches de cuarzo y clorita como ganga (Figura 8 B). En la ganga también se incluye calcita, dolomita, hematita, y magnetita. Las dimensiones descritas para el depósito 325 metros por 250 metros de profundidad, con un máximo de 45 metros de espesor (Ático *Mining Corporation*, 2012)⁷.

Figura 8 Contacto entre los sulfuros masivos y un dique Latítico, B) Venas de Pirita-Calcopirita y parches de Cuarzo-Clorita del Stockwork en núcleo de perforación



Fuente: Ático Mining Corporation (2012).

3.3.1 Cuerpo mineralizado Maximus

Este cuerpo se caracteriza por presentar poco fracturamiento, escasos diques, pequeñas concentraciones de Chert jasper. En el cuerpo Maximus la pirita es el mineral dominante, y como roca caja encontramos principalmente Chert negro (siguiendo la terminología usada en Ático *Mining Corporation*), donde la roca se

presenta sin mineralización, siendo arcilolitas grafitosas y chert gris oscuro, las rocas más comunes, cabe resaltar que algunos sulfuros se encuentran rellenando pequeñas vetillas, donde de las rocas. Por otra parte, se ha reportado tetraedrita y barita para algunas muestras del cuerpo, el cual, cabe destacar se encuentra altamente enriquecido en oro.

3.3.2 Cuerpo mineralizado Goliat

El cuerpo denominado Goliat posee un principal tipo de roca, o roca predominante, sobre la que ocurre la mineralización, denominado chert negro (siguiendo la terminología usada en *Ático Mining Corporation*), el cual localmente presenta plegamiento e intenso fracturamiento. Por otro lado, la alta presencia de diques de composición andesítica se presentan intensamente alterados en contacto con sulfuros masivos los cuales se presentan formando lentes con altos valores de cobre. Como otro apartado la mineralización se presenta de forma masiva pero localmente se aprecian interestratificaciones muy finas entre capas de Chert y los minerales de la mena.

4. PRESENTACION RESULTADOS

4.1 Mineralogía de Menas

El depósito de sulfuros masivos “El Roble” está conformado por múltiples cuerpos mineralizados aparentemente desmembrados debido a la fuerte deformación tectónica de la zona como ya se ha mencionado en anteriores apartados. En éste contexto, se señala que éste trabajo de tesis de pregrado, se focalizó especialmente en estudiar los cuerpos mineralizados Maximus y Goliath.

4.1.1 Descripción macroscópica de muestras de mena

A continuación, se presenta una descripción macroscópica general de las muestras recolectadas para este proyecto, para obtener información preliminar acerca de las características mineralógicas de los cuerpos Maximus y Goliath. Las muestras fueron tomadas desde el interior del túnel. Ver Anexo 1 para la descripción de cada muestra.

Coordenadas: 5°54'40" N - 76°12'30" W

Altitud: 1800- 2200 msnm

4.2.1 Cuerpo mineralizado Maximus

La mineralogía de Maximus se caracteriza principalmente por la gran abundancia de Pirita, siendo este el mineral con mayor presencia en todas las muestras, siempre acompañado de Cuarzo y Calcita, se presenta como masas y también como cristales euhedrales que alcanzan hasta un cm de tamaño y la presencia exclusiva de Chert Jasper y Barita; también se encuentra Calcopirita pero su

abundancia es comparativamente mucho menor a la p, en algunas muestras se observa subhedral (casi cubica), pero la mayor parte Pirita, es de tipo masivo, con patinas de color pardo que se disuelven al contacto con HCl, otros minerales que se observan en muestra de mano son Magnetitas muy pequeñas en el interior de las masas de Cuarzo; Bornita supergena con textura pecho de paloma se encuentra sobre todos los sulfuros, aunque no resulta ser un mineral muy abundante.

También se identificaron minerales de tipo máfico como Piroxenos y Anfiboles provenientes de las rocas ígneas que cortan el túnel, también Plagioclasas en estas mismas rocas, un poco de grafito formando bandas en rocas arcillolíticas del túnel, incluso la presencia de Serpentina estriada (aparentemente como alteración de una roca máfica), también se encuentra dolomita en algunas muestras.

4.2.2) Cuerpo mineralizado Goliath

Los principales minerales presentes en el cuerpo correspondientes al campo sulfuros encontramos minerales como: Pirita, la cual varía desde una pirita masiva dispuesta aleatoriamente sobre el cuerpo a una pirita de clivaje principalmente cubico y una pirita que se presenta rellenando fracturas presentes en el cuerpo, generalmente en contacto con ganga (cuarzo). Por otra parte la Calcopirita, se presenta de forma masiva a pequeños cristales subhedrales, los cuales abarcan gran parte del porcentaje de la muestra. Por otro lado es posible detectar algunos minerales de ganga como lo es el cuarzo.

4.1.2 Mineralogía de los sulfuros

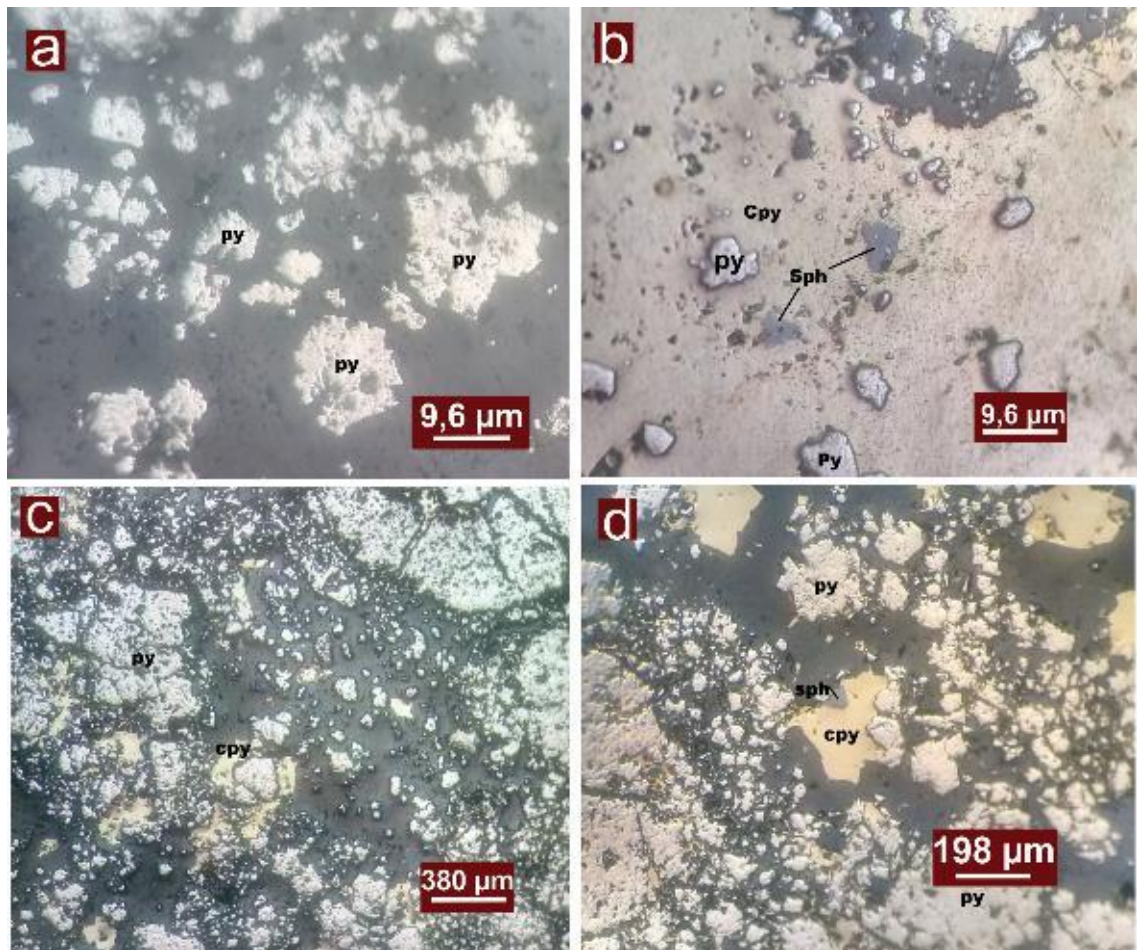
Los sulfuros y que también son conocidos como minerales mena (en algunos casos) se enlistan y describen a continuación:

4.1.2.1 Sulfuros presentes en el cuerpo Maximus:

Pirita; (Figura 9) es el mineral más abundante en este cuerpo, el cual presenta cuatro generaciones formadas en momentos diferentes de la mineralización con características texturales diferentes. Pero en cuanto a propiedades ópticas todas las generaciones exhiben una alta reflectividad, color blanco, sin pleocroísmo, alta dureza de pulido, isotrópico sin reflexiones internas o maclado.

- Primera generación de Pirita (Pirita 1); pre-mineralización de cobre (Cu) y posiblemente pre diagénesis que se encuentran en las rocas que aún conservan la textura original de la roca caja, con formas irregulares incluso círculos u óvalos casi perfectos, algunas framboidales y otras de tipo anhedral. Se observan asociadas en las zonas de Chert Jasper.
- Segunda generación de pirita (Pirita 2); también se consideran pre-mineralización Cu, pero a diferencia de la primera generación estas desarrollan mayores tamaños y en aunque son subhedrales su tendencia es ser más cúbicas. Estas piritas le dan apariencia de brecha a algunas muestras.
- Tercera generación de pirita (Pirita 3); forman parte de un evento post-mineralización Cu, a simple vista en las muestras pulidas se observan como las piritas más plateadas, posteriores a la Calcopirita principal, rellenando fracturas con apariencia masiva.
- Cuarta generación de pirita (Pirita 4); es la pirita más tardía, representada por escasos individuos subhedrales y euhedrales que forman parte del relleno de las fracturas más recientes.

Figura 9 Microfotografías de Piritas tomadas en Luz Reflejada Plana Polarizada del cuerpo mineralizado Maximus. py=pirita, cpy=calcopirita, sph=esfalerita. a) Piritas framboidales de la generación 1 embebidas en cuarzo micro cristalino; b) Piritas anhedrales de la generación dos, rodeadas por calcopirita, también se observa esfalerita y cuarzo (gris oscuro); c) Piritas de la segunda generación, embebidas en calcita y calcopirita; d) Piritas de la segunda generación, calcopirita y esfalerita.

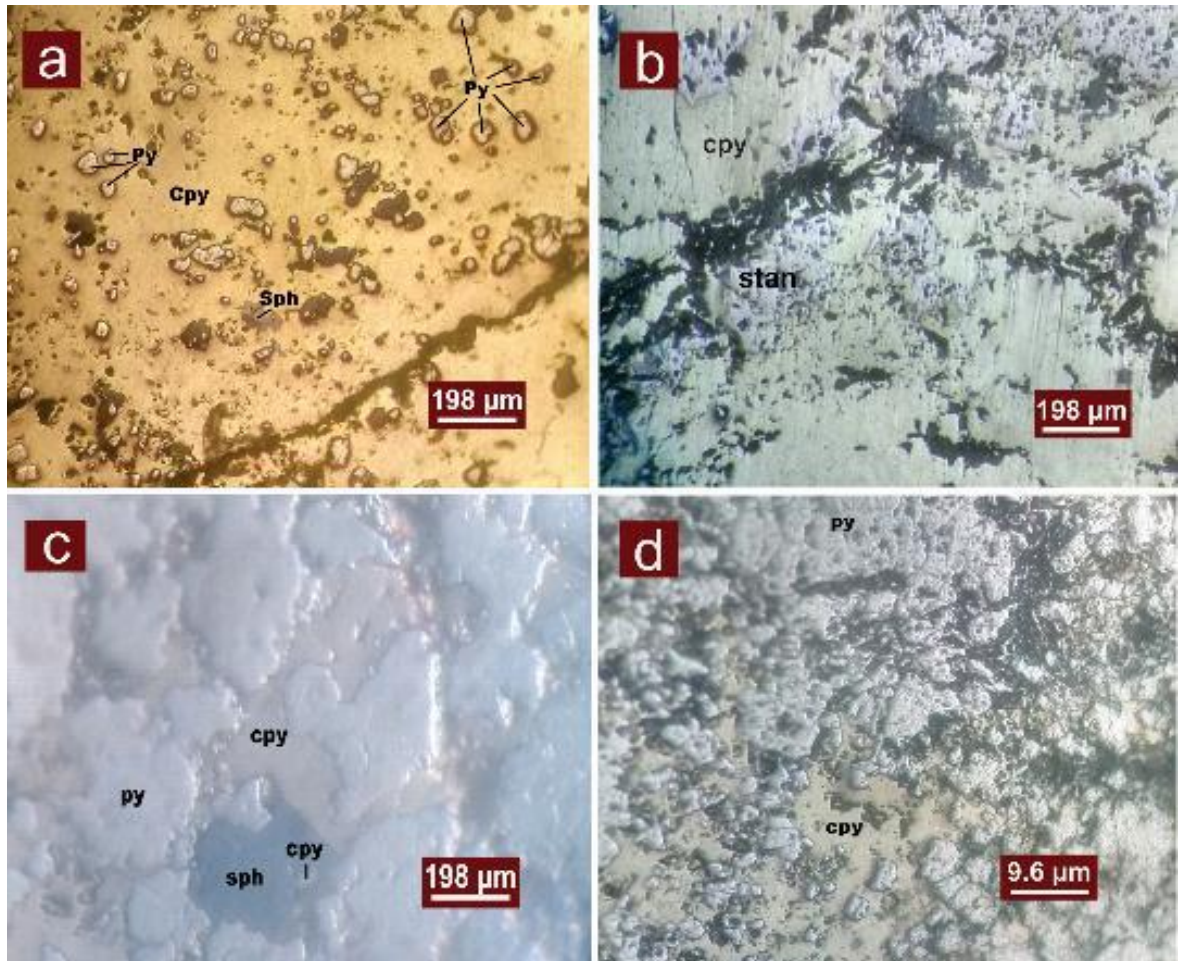


Calcopirita; (Figura 10) El segundo mineral en abundancia, se presenta en 4 generaciones relacionadas temporalmente de formas diferentes, considerado la mena principal de Cu en el depósito, en el túnel Maximus se observa como un mineral tardío que corta el cuerpo mineralizado Maximus. En cuanto a propiedades ópticas las calcopiritas exhiben una reflectividad de media a media-

alta, color amarillo intenso muy característico, sin pleocroísmo, una dureza de pulido intermedia (<pirita), isotrópico, sin reflexiones internas y sin maclado.

- Primera generación de calcopirita (calcopirita 1); se identifica como las casi imperceptibles calcopiritas que se desarrollaron en el interior de la primera generación de esfalerita.
- Segunda generación de calcopirita (calcopirita 2); de la misma forma que la primera generación, esta comprende la calcopirita desarrollada en el interior de la segunda generación de esfalerita.
- Tercera generación de calcopirita (calcopirita 3); siendo esta la más abundante, representa al principal evento mineralizante de Cu, envuelve principalmente a la segunda generación de pirita, a las primeras generaciones de esfalerita y a la Estannita. Se puede apreciar de forma masiva o como grandes cristales subherales que forman brechas en las muestras.
- Cuarta generación de calcopirita (calcopirita 4); es la más tardía, representada por escasos individuos subhedrales y euhedrales que forman parte del relleno de las fracturas más recientes.

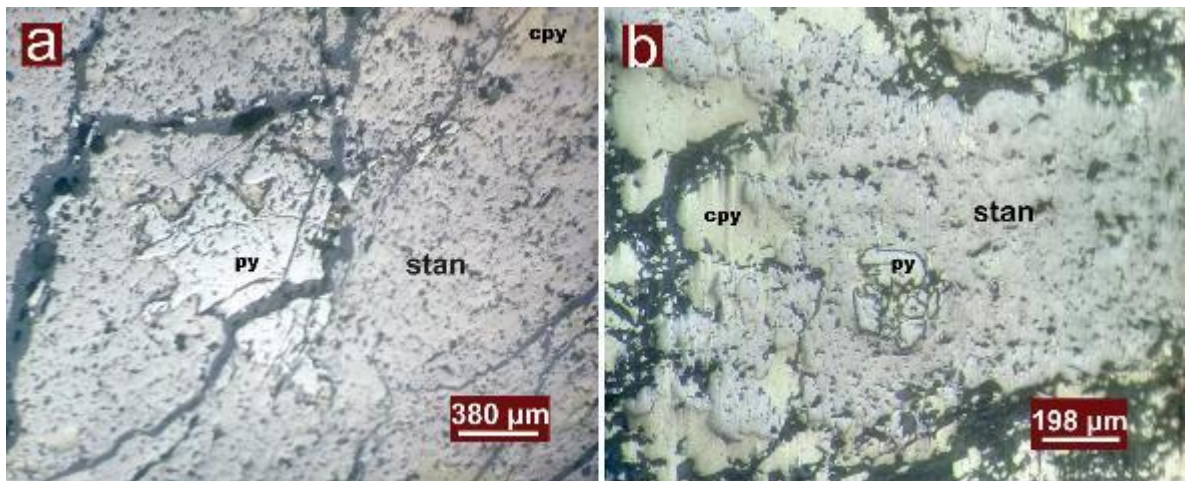
Figura 10 Microfotografías de Calcopirita tomadas en Luz Reflejada Plana Polarizada en el cuerpo mineralizado Maximus. py=pirita, cpy=calcopirita, sph=esfalerita, stan=estannita. a) Calcopirita de la tercera generación, se observa como rodea completamente a las piritas de la segunda generación y a la esfalerita; b) Calcopirita de tercera generación con Estannita; c) Calcopirita de segunda generación en el interior de esfalerita, y calcopirita de tercera generación rodeando pirita y esfalerita de segunda generación; d) Calcopirita de tercera generación en intersticios de pirita de segunda generación.



Estannita: (Figura 11) este mineral es el tercero en abundancia, aunque solo fue identificado en dos muestras (este mineral solo le encuentra en las secciones con gran contenido de calcopirita masiva), su cantidad es mayor que la de las escasas esfaleritas registradas, se presente como masas de color rosado crema,

relacionadas principalmente con la calcopirita 3 y en ocasiones con la pirita 2. Con alta reflectividad, sin pleocroísmo, dureza de pulido media (>calcopirita, <pirita), isotrópico, sin reflexiones internas y sin maclado.

Figura 11 Microfotografías de Estannita tomadas en Luz Reflejada Plana Polarizada en el cuerpo mineralizado Maximus. py=pirita, cpy=calcopirita, stan=estannita. a) Estannita masiva y calcopirita 3 rodeando pirita 2, también se observa la última fractura con relleno donde se identifica pirita 4(izquierda); b) Estannita masiva y calcopirita 3 rodeando pirita 2.

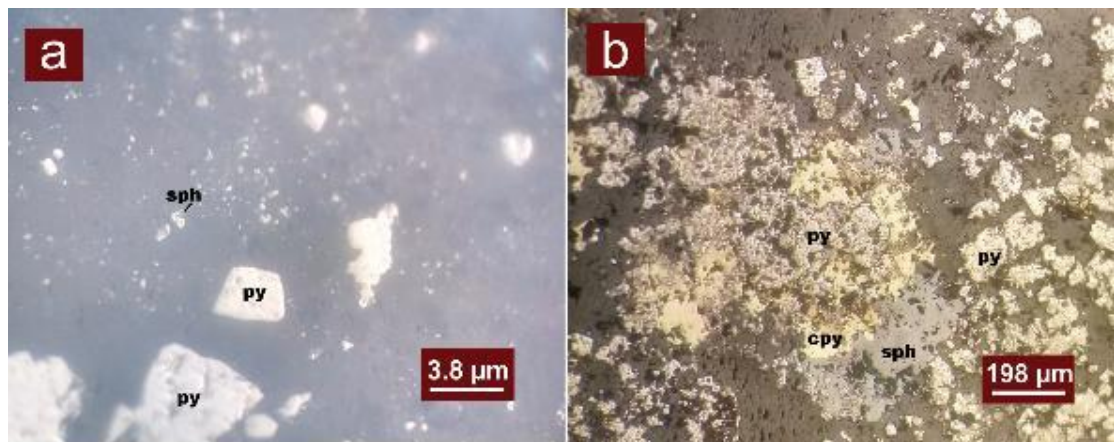


Esfalerita; (Figura 12) cuarto en abundancia, la cantidad es muy reducida en comparación con los sulfuros anteriormente descritos, se identificaron tres generaciones. Al microscopio de luz reflejada se observan cristales de baja reflectividad, color gris claro, sin pleocroísmo, dureza de pulido media (> calcopirita), isotrópico, sin reflexiones internas y sin maclado.

- Primera generación de esfalerita (esfalerita 1); se encuentra como cristales anhedrales en el cuarzo micro cristalino, junto con pirita 1, algunos especímenes contienen calcopirita 1.
- Segunda generación de esfalerita (esfalerita 2); presenta textura relictica en algunos especímenes de gran tamaño (>200 μm), posee calcopiritas en su interior.

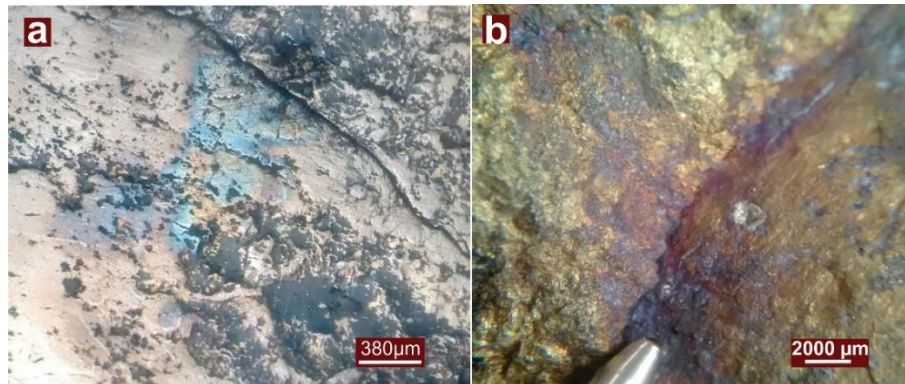
- Tercera generación de esfalerita (esfalerita 3); es la más tardía, representada por escasos individuos subhedrales y euhedrales que forman parte del relleno de las fracturas más recientes

Figura 12 Microfotografía de la Esfalerita tomadas en Luz Reflejada Plana Polarizada presente en el cuerpo mineralizado *Maximus*. py=pirita, cpy=calcopirita, sph=esfalerita. a) Esfalerita de generación 1, embebida en cuarzo micro cristalino con pirita 1; b) Esfalerita de segunda generación con pirita, calcopirita y calcita.



Bornita; (Figura 13) por ultimo este sulfuro formado por las condiciones de exposición, es el más escaso y también el más reciente, se observa como una pátina multicolor sobre la superficie de algunas piritas y calcopiritas.

Figura 13 a) Microfotografía de bornita sobre pirita de tercera generación; b) Bornita en muestra de mano sobre calcopirita.



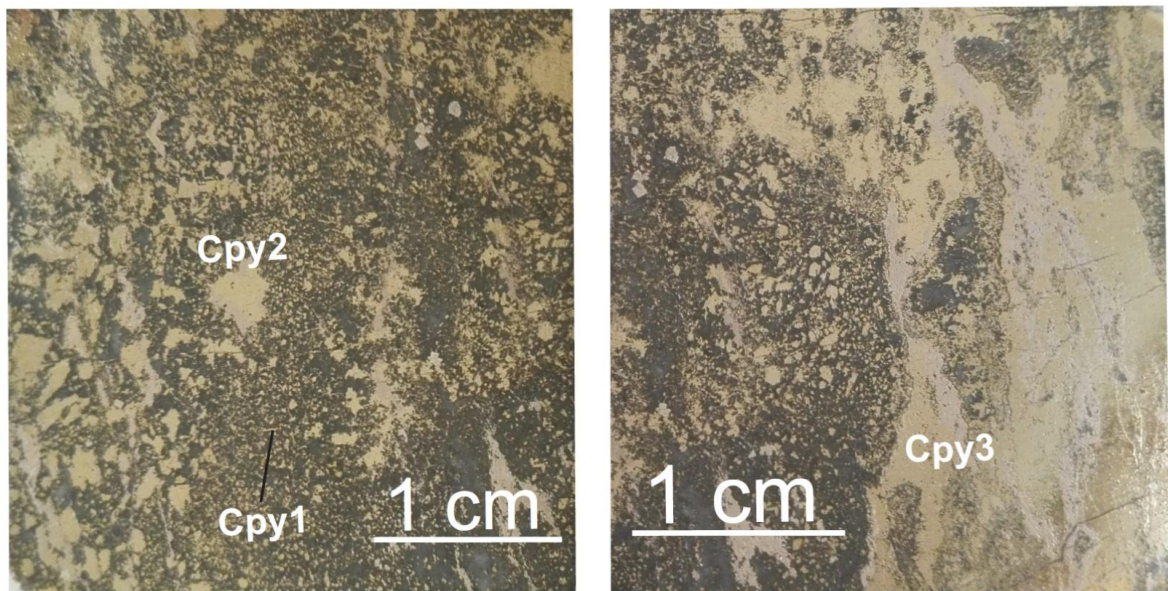
4.1.2.2) Sulfuros presentes en el cuerpo Goliath

Calcopirita; (Figura 14) Es el mineral más abundante en el cuerpo denominado como Goliath, se presentan cuatro generaciones de formación de calcopirita que corresponden a los diferentes estados de fluidos de la mineralización. La presentación de estas generaciones va desde una calcopirita muy fina a calcopiritas masivas, o calcopiritas subhedrales, donde las propiedades ópticas de todas las generaciones exhiben una reflectividad de media a media-alta, color amarillo intenso muy característico, sin pleocroísmo, una dureza de pulido intermedia (<pirita), isotrópico, sin reflexiones internas y sin maclado.

- Primera generación de calcopirita (calcopirita 1); se identifica como las calcopiritas más finas y de cristales anhedrales principalmente, formada después del proceso de diagénesis, pre-mineralización del cuerpo.
- Segunda generación de calcopirita (calcopirita 2); piritas de mayor tamaño que envuelven piritas de primera y segunda generación, se forma durante el proceso de la mineralización con cristales subhedrales anhedrales.

- Tercera generación de calcopirita (calcopirita 3); pirita masiva que envuelve los anteriores eventos de pirita y calcopirita, formada durante el proceso de mineralización.
- Cuarta generación de calcopirita (calcopirita 4); es la más tardía, representada por escasos individuos subhedrales a anhedrales que forman parte del relleno de las fracturas más recientes, de origen supergeno.

Figura 14 Fotografías muestra de mano en el cuerpo mineralizado Goliat donde se resaltan los diferentes eventos de formación de calcopirita, a excepción de la pirita de cuarta generación apreciable solo en vetillas. cpy=calcopirita.

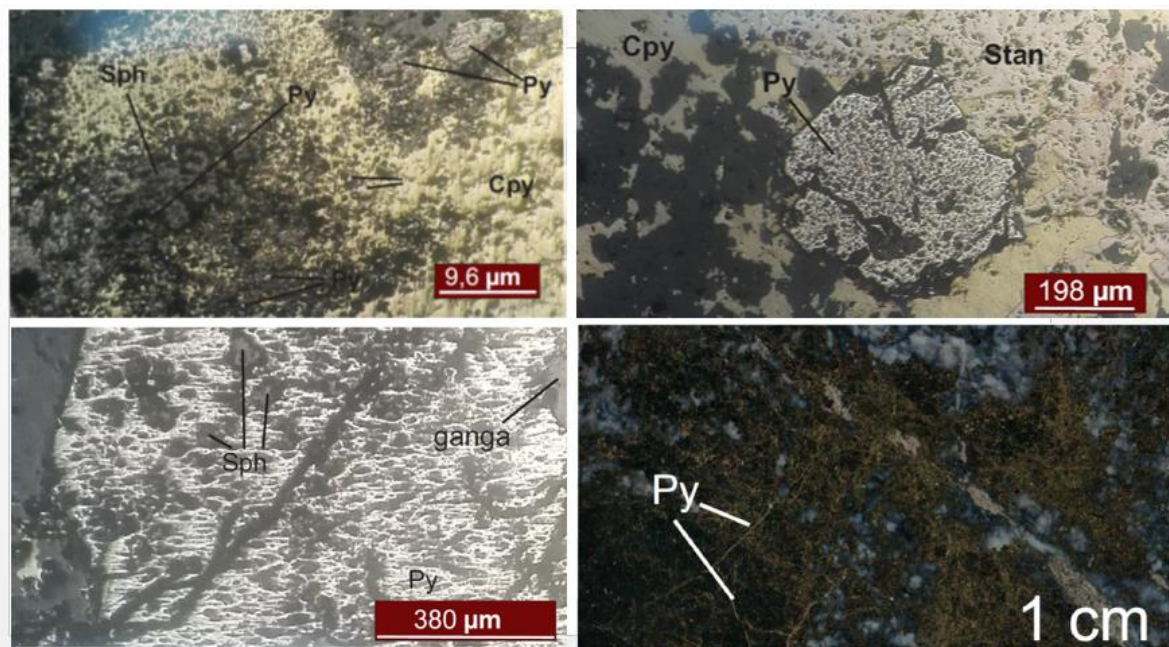


Pirita; (Figura 15) Es el segundo mineral más abundante en el cuerpo denominado como Goliat, se presentan cuatro generaciones de formación de pirita que corresponden a los diferentes estados de fluidos de la mineralización. La presentación de estas generaciones va desde una pirita muy fina a piritas masivas, o piritas subhedrales, donde las propiedades ópticas de todas las

generaciones exhiben una alta reflectividad, color blanco, sin pleocroísmo, alta dureza de pulido, isotrópico sin reflexiones internas o maclado.

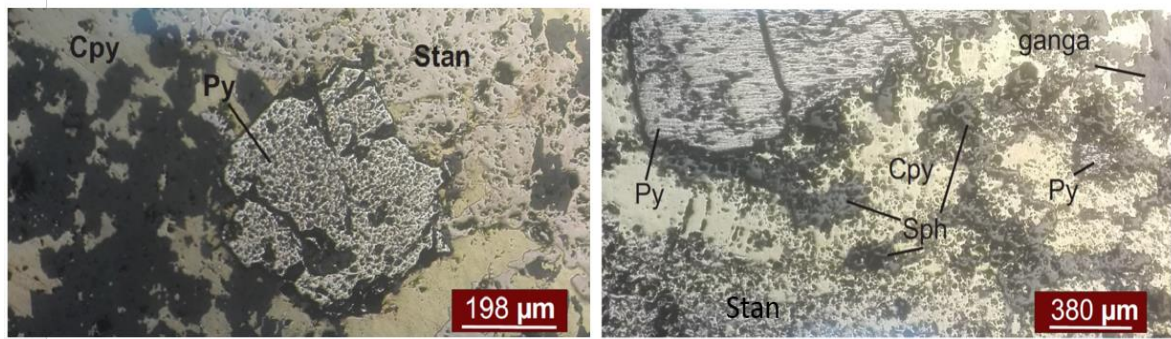
- Primera generación de Pirita (Pirita 1); generada durante el proceso de diagénesis, que se encuentran en las rocas que aún conservan la textura original de la roca caja, con formas anhedrales que van desde círculos a óvalos casi perfectos, (framboidales) y otras de tipo anedral. Se observan asociadas en las zonas de Chert negro (roca caja).
- Segunda generación de pirita (Pirita 2); generada durante el proceso de mineralización, a diferencia de la primera generación estas desarrollan mayores tamaños donde la forma de los cristales es principalmente subhedral a euhedral, con tendencia a formar cristales cúbicos. Estas piritas le dan apariencia de textura brechoide.
- Tercera generación de pirita (Pirita 3); generada durante el proceso de mineralización, se presenta como un agregado con apariencia masiva, presentada en masas de forma aleatoria a lo largo de las muestras.
- Cuarta generación de pirita (Pirita 4); representada por escasos individuos principalmente por cristales subhedrales a anhedrales que forman parte del relleno de las fracturas más recientes.

Figura 15 Microfotografías Luz Reflejada Plana Polarizada en el cuerpo mineralizado Goliat. py=pirita, cpy=calcopirita, sph=esfalerita Stan=Estannita. Y muestra macro. Superior izquierda: 1 generación de pirita embebida en cristales de esfalerita y en calcopirita. Superior derecha: 2 generaciones de pirita (subhedral) embebida en calcopirita. Inferior izquierda: 3 generaciones pirita contiene embebido en cristales de esfalerita. Inferior izquierda: 4 generaciones pirita en una fractura.



Estannita; (Figura 16) este mineral, aunque solo fue identificado en dos muestras, su cantidad es mayor que la de las escasas esfaleritas registradas, se presente como masas de color rosado crema, relacionadas principalmente con la calcopirita y en ocasiones con la pirita. Con alta reflectividad, sin pleocroísmo, dureza de pulido media (>calcopirita, <pirita), isotrópico, sin reflexiones internas y sin maclado.

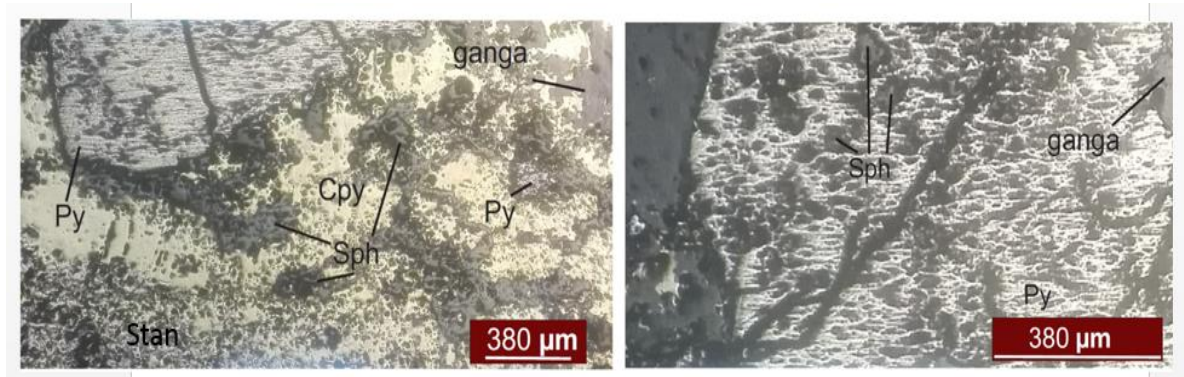
Figura 16 Microfotografías Luz Reflejada Plana Polarizada en el cuerpo mineralizado Goliat. Izquierda: Estannita en contacto con pirita de 2 generación. Derecha: Estannita en contacto con calcopirita de 3 generación.



Esfalerita; (Figura 17) en cantidad es muy reducida en comparación con los sulfuros anteriormente descritos, se identificaron 3 generaciones. Al microscopio de luz reflejada se observan cristales de baja reflectividad, color gris claro, sin pleocroísmo, dureza de pulido media (> calcopirita), isotrópico, sin reflexiones internas y sin maclado.

- Primera generación de esfalerita (esfalerita 1); se encuentra como cristales anhedrales contenida dentro de cristales de pirita de segunda generación.
- Segunda generación de esfalerita (esfalerita 2); se presenta en contacto con pirita de segunda generación.
- Tercera generación de esfalerita (esfalerita 3); es la más tardía, representada por escasos individuos subhedrales y anhedrales que forman parte del relleno de las fracturas más recientes

Figura 17 Microfotografías Luz Reflejada Plana Polarizada en el cuerpo mineralizado Goliat. Izquierda: Esfalerita en contacto con pirita de 2 generación. Derecha: Esfalerita embebida dentro de pirita de 2 generación. Py=Pirita, Cpy= Calcopirita, Sph= Esfalerita, Stan=Estannita.

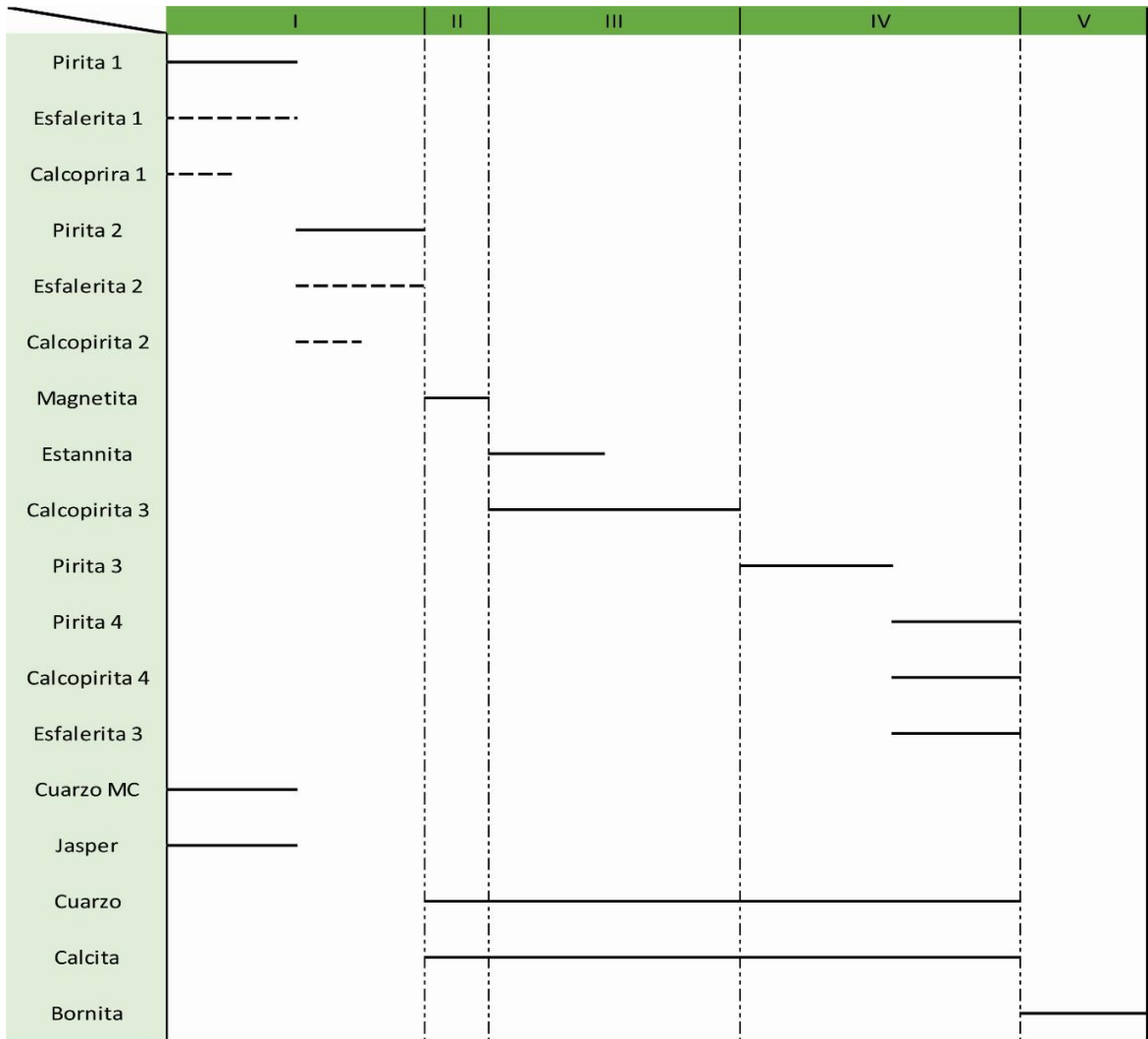


4.2 Paragénesis Mineral

A continuación, se presentan las tablas de paragénesis mineral obtenidas mediante el análisis con microscopia de luz reflejada de las secciones pulidas con el fin de determinar la evolución de los fluidos mineralizantes de los cuerpos Maximus y Goliath. Las tablas paragenéticas de cada muestra se pueden encontrar en el Anexo 2.

4.2.1 Paragénesis de Maximus

TABLA 2 Contextos parageneticos generalizados para el cuerpo mineralizado Maximus. Se observan todas las etapas de la mineralizacion, iniciando con la formacion de las primeras Piritas acompañadas de Esfalerita y Calcopirita (Etapa I), en una matriz de Cuarzo Microsistralino (MC) y Jasper; posteriormente la formacion de Magnetita en escasos cristales (Etapa II); la siguiente generacion de Calcopirita (Etapa III); el Cuarzo y la Calcita en forma de venas se encuentran desde la llegada de la Etapa II hasta la removilizacion de la epata IV; y finalmente la etapa V representada por Bornita.



4.2.2 Paragénesis de Goliath

TABLA 3 El contexto paragenético general para el cuerpo mineralizado Goliath, el cual comienza con una fase inicial de formación de las primeras Piritas que corresponden a la etapa 1; le sigue una fase o etapa 2 en la cual se desarrolla, inicialmente Calcopirita, progresivamente los primeros eventos de Esfalerita; un segundo evento de Pirita (Pirita2), posteriormente se formó Estannita, de forma coetánea (?) Con un evento de Pirita (3) y de Calcopirita (2) y en un evento más tardío la formación de Esfalerita. Finalmente se concluye con la etapa 3 donde incurre o aparece nuevamente calcopirita (3) y muy cercanos en formación la aparición de fracturas. Por otro lado, el cuarzo muestra una aparición en cada una de las fases ya descritas.

	1	2	3
Pirita 1	-----		
Calcopirita1		-----	
Esfalerita		-----	
Pirita 2		-----	
Estannita		-----	
Pirita 3		-----	
Calcopirita2		-----	
Esfalerita		-----	
Calcopirita 3			-----
Fracturas			-----
Cuarzo	-----	-----	-----

4.3 Alteración Hidrotermal

Los minerales y/o rocas identificados en muestra de mano y/o microscopía óptica (Figura 9) que acompañan la mineralización de sulfuros y que a su vez son considerados la ganga del depósito se enlistan y describen a continuación:

Cuarzo Microcristalino (Chert); contiene la mineralización, a nivel macroscópico se observa de color negro, masivo y sin cristales apreciables con excepción de las pirritas en su interior. A nivel microscópico se observan microcristales de cuarzo, también contiene muy escasos cristales de cuarzo angular de tamaño fino. Este material posee múltiples texturas de recristalización y reemplazamiento, aunque no es objetivo de este trabajo caracterizarlas (Figura 18 c, d).

Jasper; localmente se encuentran concentraciones de cuarzo microcristalino color rojo, este se conoce como Chert jasper, en su interior se encuentran Pirritas muy finas. Es importante resaltar que las muestras con Chert Jasper son únicamente del cuerpo Maximus.

Cuarzo Hidrotermal; se encuentra presente en todas las rocas analizadas, rellenando venas cuyo espesor varío de entre 5mm a micras. Algunas de las venas presentan textura masiva, mientras que otras presentan textura de “cresta” o “peineta”, también se evidencian texturas de telaraña (Figura 18.b).

Cuarzo Ígneo; relieve bajo, colores de interferencia gris de primer orden, su tamaño es inferior a 400 μm , aunque también se encuentra formando texturas esqueléticas junto con Calcita. Se observa en pequeñas cantidades dentro de las rocas de origen ígneo que cortan el túnel, asociado a Plagioclasa.

Magnetita; cristales de color negro, aislados a solo algunas muestras, de forma euédrica, con hábito posiblemente octaédrico, siempre asociado al Cuarzo Hidrotermal. Al microscopio de luz reflejada se observa color gris oscuro con formas euédricas prismáticas, sin pleocriosis, y una muy baja dureza de pulido (Figura 18.a).

Calcita; este mineral se presenta de 4 formas, 1) Como cristales anhedrales intercrecidos en los sulfuros o en el cuarzo microcristalino, 2) Como relleno de brechas clasto-soportadas, 3) como parte de la mineralogía de las rocas volcánicas y 4) Como relleno de fracturas (Figura 18.b,c,d,e,f).

Dolomita; escasos cristales que se encuentran asociados a las venas de Calcita. Se identificó gracias a su alto relieve y figura de interferencia biáxica negativa (Figura 18. d).

Serpentina; en muestra de mano color verde oliva, fibrosa con brillo resinoso, presente como alteración posiblemente de alguna de las rocas máficas que cortan los tuneles. Se encontró en contacto con una muestra de Cuarzo Microcristalino sin mineralización.

Grafito; de color negro, con brillo submetálico, formando diminutas bandas alineadas con los planos de fisilidad de la roca, su dureza es baja (marca el papel

Hornblenda; en cristales subhedrales de alrededor de 3 mm, de hábito prismático, color verde pálido, sus colores de interferencia varían entre amarillo y fucsia, con dos direcciones de exfoliación oblicuas entre sí que forman un complejo enrejado, pleocroísmo en tonos verde pálido a pardo pálido, contienen pequeños cristales de Pirita y Albita en su interior (Figura 18.e, f).

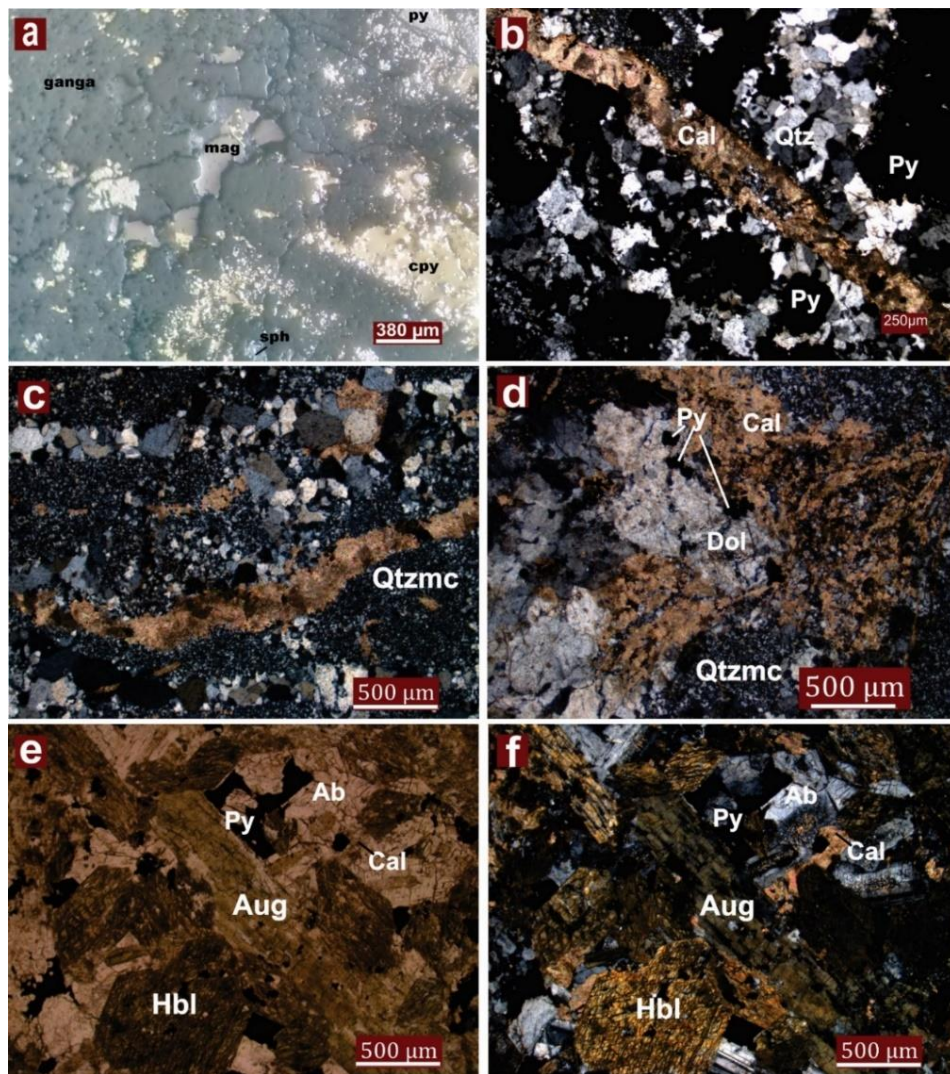
Augita; color verde pálido, relieve medio alto, con ligero pleocroísmo verde a verde pálido, prismáticos cortos, algunos con macla de Carlsbad, colores de interferencia enmascarados por el color verde del mineral, es menos abundante que la Hornblenda, contiene pequeños cristales de Pirita en su interior, siempre se encuentra asociado a la Hornblenda y Albita (Figura 18.e, f).

Albita; cristales euhedrales de tamaño variado, con zonación interna, y macla polisintética (los que no se encuentran zonados), la mayoría presenta alteración a sericita desde el centro del cristal, otros presentan alteración a epidota, los tamaños son muy variados ya que la muestra en si presenta múltiples variaciones

texturales, algunos cristales llegan al orden de los 4mm mientras que otros apenas alcanzan 500 μm (Figura 18.e, f).

Ortoclasa; incoloro, con colores de interferencia gris de primer orden, extinción ondulosa, llegan hasta 400 μm , son muy escasos y se diferencian del cuarzo por su mayor tendencia a la alteración (Caolín?). Siempre relacionados a la Albita y el Cuarzo, no suelen encontrarse donde exista una gran concentración de máficos (en la muestra).

Figura 18 Microfotografías de los minerales de alteración presentes en el depósito. mag=Magnetita; py=Pirita; cpy=Calcopirita; sph=Esfalerita; Cal=Calcita; Qtz=Cuarzo; Qtzmc=Cuarzo micro cristalino; Dol=Dolomita; Ab=Albita; Aug=Augita; Hbl=Hornblenda. a) Magnetita en la ganga, y con Pirita, Calcopirita (en contacto) y Esfalerita. b) Cuarzo en mosaico, cortado por vena de Calcita y Cuarzo, con algunos cristales de pirita subhedral. c) Cuarzo micro cristalino, cortado por venas de Calcita y Cuarzo hidrotermal. d) Calcita, Dolomita y Pirita rodeados por Cuarzo micro cristalino. e) Cristales subhedrales de Augita y hornblenda, junto con Albita, Calcita y Pirita, se puede apreciar la alteración a epidota (verde) en la Albita (Nicoles paralelos). f) Misma fotografía (e) en Nicoles Cruzados, se puede apreciar la alteración a epidota (Amarillos y naranjas) en la Albita.



4.4 Microdifracción de Rayos-X

Se realizó el análisis mediante microdifracción de rayos x, con el fin de confirmar la identificación mineralógica ya descrita e identificar posibles fases minerales que no hayan sido detectadas.

A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos por el laboratorio de rayos x de la Universidad Industrial de Santander, para los detalles ver el informe Anexo 3.

4.4.1 Cuerpo Mineralizado Maximus

Los resultados arrojados por el estudio en las muestras de Maximus, detectaron los siguientes minerales: Pirita, Siderita, Loelingita y Cuarzo en la zona identificada como Jasper; en las zonas con alto contenido de Calcopirita se detectaron las siguientes fases minerales: Calcopirita, Pirita, Marcasita, Tetraedrita, Siderita, Pirrotita y Estannita.

4.4.2 Cuerpo Mineralizado Goliath

Las fases minerales detectadas en la muestra de Goliath analizada fueron las siguientes: Calcopirita, Cuarzo, Pirita, Ankerita, Siderita, Pirrotita y Dolomita.

5. ANALISIS-DISCUSSION

5.1. Antecedentes y Clasificación de los Depósitos

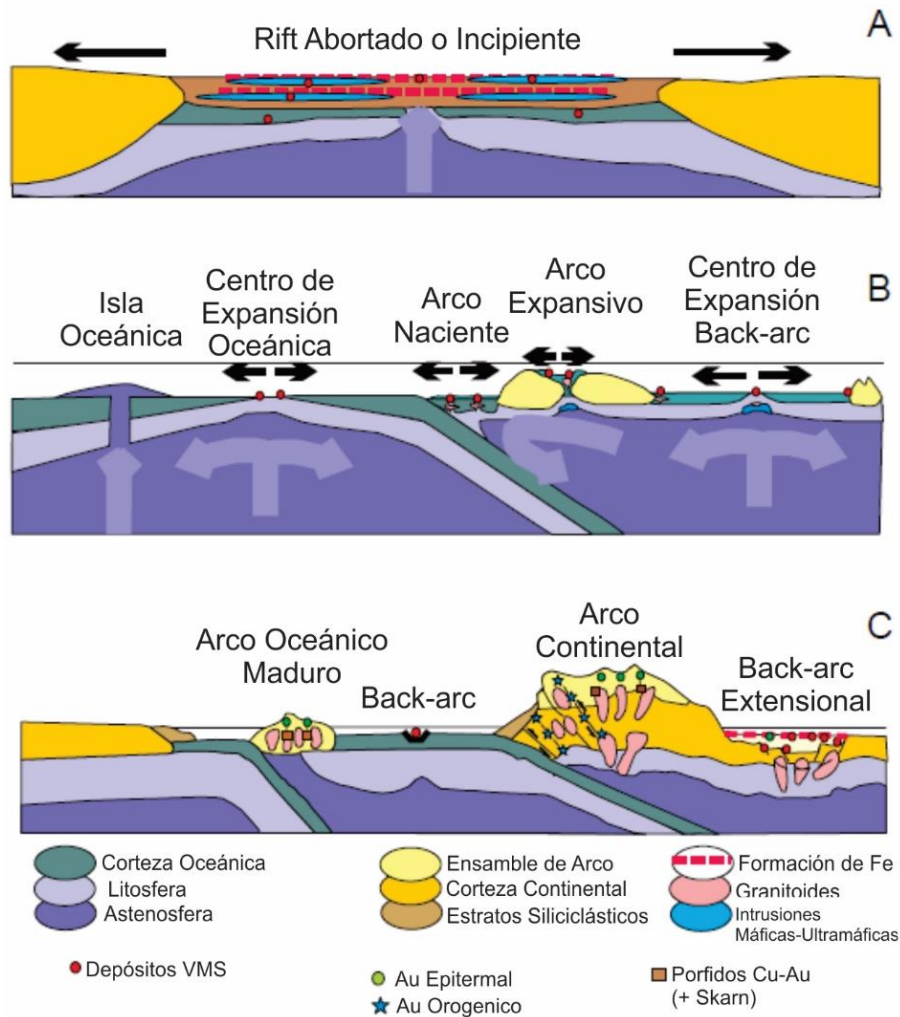
Los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos también son conocidos como depósitos de sulfuros masivos asociados volcánicos, volcánicos hospedados, volcáno-sedimentarios hospedados y/o por sus siglas en ingles VMS/VHMS (*Volcanogenic Massive Sulphide / Volcanic-hosted Massive sulphide*) (Galley *et al* 2007)⁸. Comúnmente ocurren como lentes de sulfuros masivos polimetálicos cuya formación se da en, o cerca del fondo marino a través de la descarga concentrada de fluidos hidrotermales ricos en metales, mezclados con agua de mar en ambientes volcánicos submarinos. Sus rocas hospedadoras inmediatas pueden ser volcánicas o sedimentarias.

Algunas características de los VMS/VHMS reflejan la química del agua de mar y/o los fluidos magmáticos que intervienen en el proceso. Mientras que otras reflejan la actividad tectónica y magmática asociada.

Se consideran *syn*-genéticos, por lo tanto, estos depósitos tienden a formar marcadores horizontales, que representan periodos de calma en el vulcanismo. La característica más común entre todos los tipos de VMS es que son formados en ambientes extensionales incluyendo arcos magmáticos, y expansión de fondo oceánico (Figura 19). Los depósitos VMS que más se han preservado son los formados en arcos nacientes ya sea continentales u oceánicos, aperturas de arco y *back-arc*. Esto se debe a que durante los procesos de subducción la mayoría de la corteza oceánica es consumida dejando solo algunos remanentes de secuencias ofiolíticas.

⁸ Galley, A.G., Hannington, M.D., and Jonasson, I.R., (2007). Volcanogenic massive sulphide deposits. Good fellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 141-161.

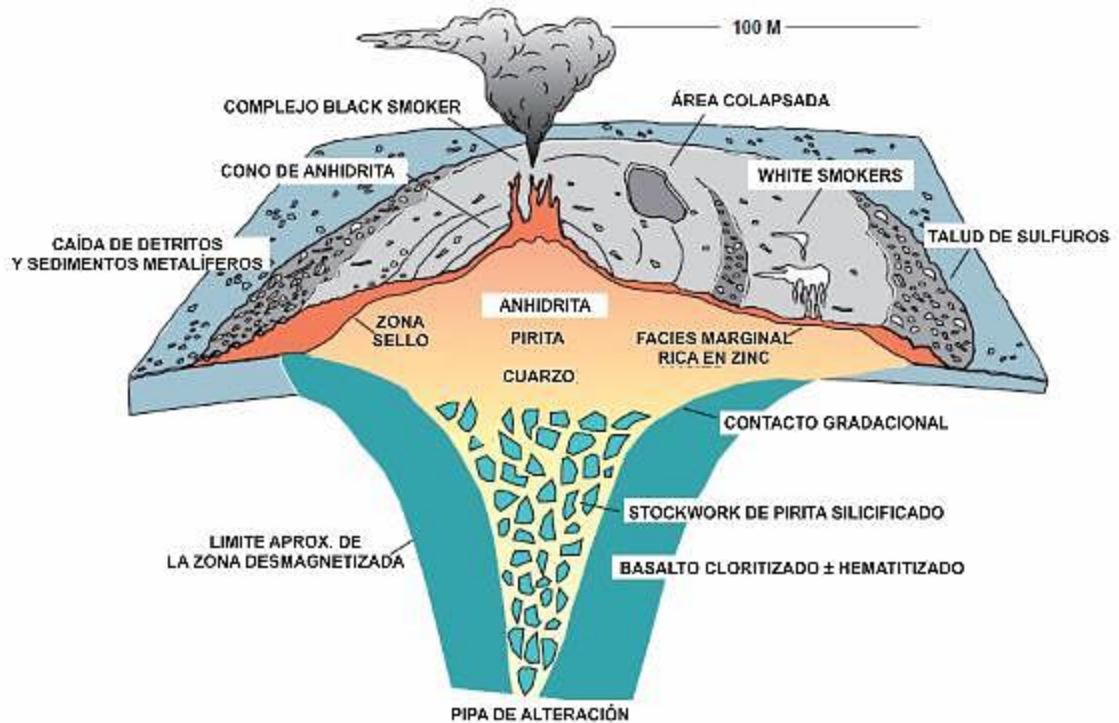
Figura 19 Principales ambientes tectónicos donde se desarrollan los depósitos tipo VMS, y algunos depósitos que pueden desarrollarse.



Fuente: Modificado de *Volcanogenic massive sulphide deposits* (2007).

Normalmente hay una capa tabular compuesta principalmente por sulfuros masivos (>60% de sulfuros), cuarzo, filosilicatos y minerales de óxido de hierro (marcando los horizontes más prospectivos del depósito), además roca silicatada alterada. Estos cuerpos suelen estar subyacidos de forma discordante con venas *Stockwork* (<20% de sulfuros) y sulfuros diseminados (Figura 20) (Galley *et al* 2007)⁸.

Figura 20 Diagrama esquemático de los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos.



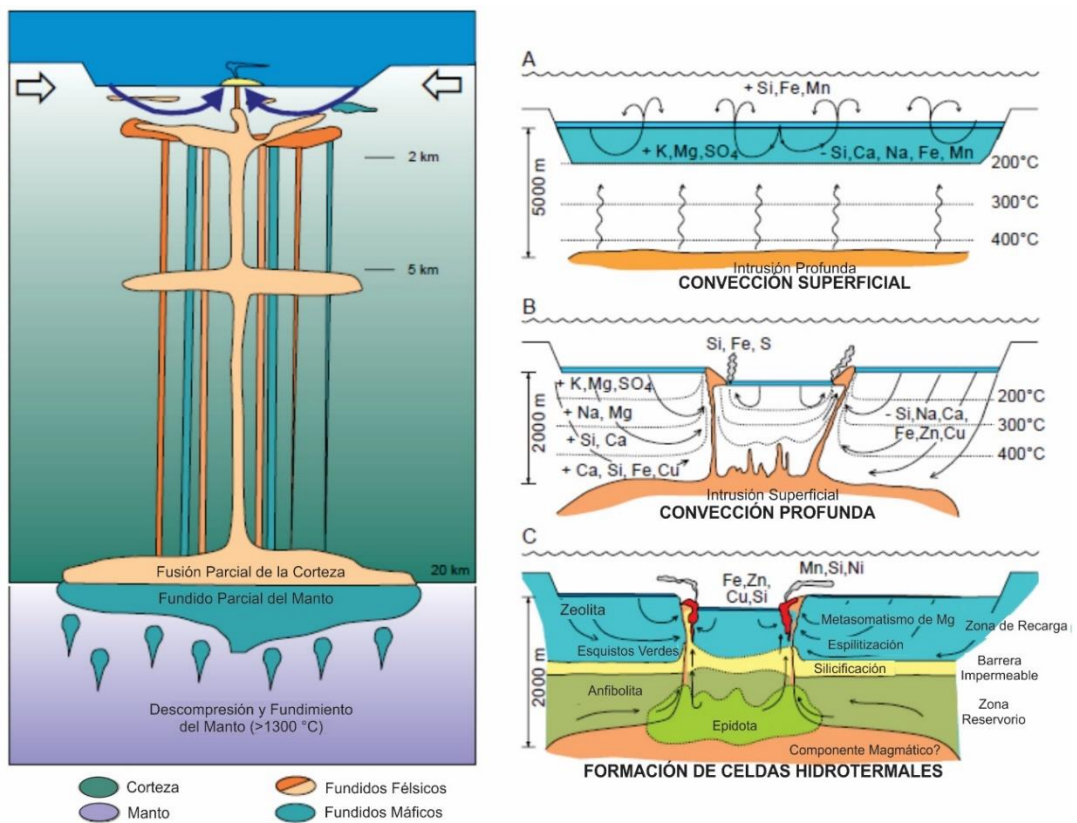
Fuente: Modificado de *Volcanogenic massive sulphide deposits* (2007).

5.1.1 Proceso de formación de un depósito VMS

Los depósitos VMS se forman como consecuencia de actividad de plumas o calderas magmáticas, despresurización del manto y magmatismo de arco (continental u oceánico) subacuático. En zonas de expansión de fondo oceánico los magmas provenientes del manto ascienden en dirección al fondo oceánico miles de metros para formar diques gabroicos tipo *sill* paralelos a los ejes de expansión. En los casos donde encuentre litosfera pre-existente, estos magmas máficos a altas temperaturas (1000-1400°C) pueden producir fusión parcial de la litosfera y general magmas de intermedios a félsicos o bimodales, y estos pueden ascender hasta 2-3 km bajo el fondo oceánico donde se da lugar la expansión (Figura 21 Izquierda). El ascenso de estas intrusiones conlleva al desarrollo de celdas de convección en el sub suelo y la superficie de este. Los fluidos fríos con

un pH casi neutro que se encuentran saturando la porosidad del sub suelo comienzan a calentarse, causando que estos asciendan a través de las fallas *syn*-volcánicas interactuando con la roca caja. A mayor profundidad de inmersión de estas aguas mayor temperatura e interacción química con las rocas circundantes (Figura 21 Derecha).

Figura 21 Izquierda Esquema de ascenso de magmas desde el manto hacia la corteza oceánica o litosfera en los centros de expansión. **Derecha** Esquema de formación de las celdas hidrotermales en un sistema sub-marino.



Fuente: Modificado de *Volcanogenic massive sulphide deposits* (2007).

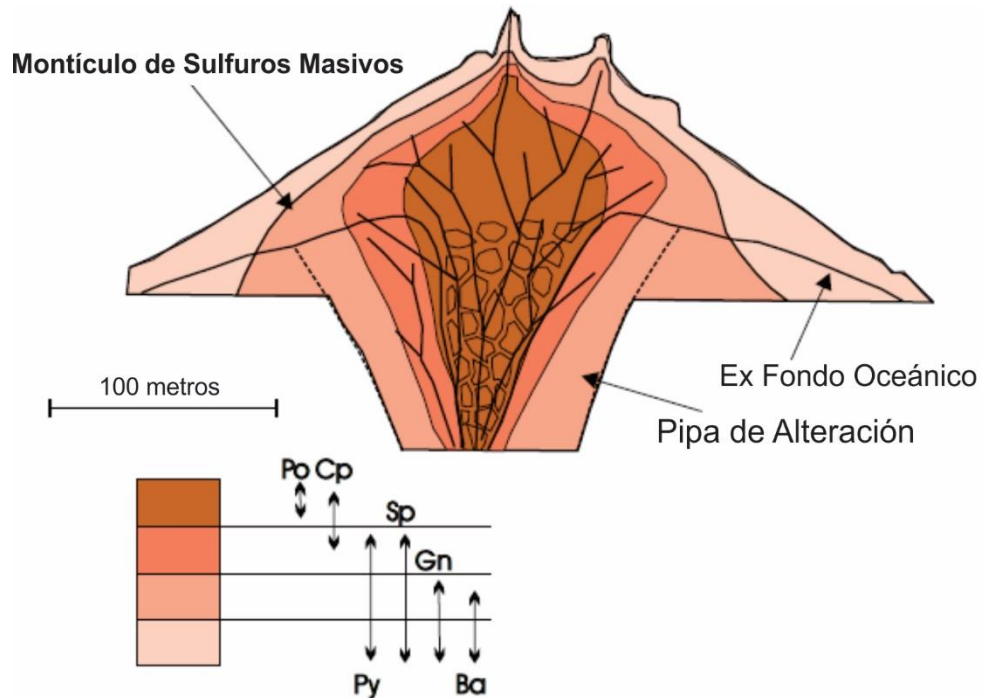
Las observaciones a los sistemas hidrotermales modernos indican que los depósitos comienzan a formarse como una serie de chimeneas de sulfuro-silicato-sulfato, que posteriormente colapsan debido al crecimiento continuo que las vuelve inestables; formando un montículo de brecha. Debido a la continua

circulación de fluidos a través del montículo se obtiene como resultado una textura semi masiva a masiva de sulfuros, y un sellamiento de silica, arcilla y sulfatos que forman una capa que rodea el montículo (Figura 20). Adicionalmente se desarrollan algunos horizontes de exhalatitas ricas en hierro que pueden marcar los horizontes más prospectivos y/o periodos de calma en el sistema hidrotermal.

5.1.2 Mineralogía y alteraciones

La circulación continua del sistema hidrotermal da como resultado un núcleo discordante de pirrotita±calcopirita y el exterior de esfalerita±pirita±galena (Figura 22). Esta configuración denominada pipa de alteración o zona del *stockwork* generalmente sub-yace a los lentes de sulfuros. En algunas ocasiones los sistemas *stockwork* contienen lentes de sulfuros que representan periodos de pausa en la actividad volcánica. Los ensambles minerales en la roca caja son evidencia de la interacción entre fluidos de químicas diferentes; un ensamble mineral de clorita Fe+cuarzo+sulfuros±sericita±talco es común mente asociado al núcleo del *stockwork*, el cual se va enriqueciendo en cuarzo y sulfuros a medida que se acerca al contacto con los lentes de sulfuros supra-yacentes. El núcleo se encuentra rodeado por una extensa zona de clorita Fe-Mg+sericita+prehnita incluso puede encontrarse rodeando también a los lentes de sulfuros masivos inmediato. Y la zona más externa se puede desarrollar un ensamble ±albita±carbonatos±barita.

Figura 22 Esquema de la zonación típica de sulfuros en el montículo de un de un deposito tipo VMS. Po= Pirrotita; Cp= Calcopirita; Sp= Esfalerita; Gn= Galena, Py= Pirita; Ba=Barita.



Fuente: Modificado de *Volcanogenic massive sulphide deposits* (2007).

El sistema de alteraciones semi conforme de un distrito VMS imita la zonación de facies de metamorfismo regional Anfibolita-Esquistos verdes-Sub esquistos verdes. Las isothermas de enfriamiento que se desarrollan en los complejos sills (Figura 21) son generalmente horizontales, lo que da como resultado unas zonas de alteración estratiformes semi-conformes, controladas en extensión por la intrusión que las generó. La Zona más próxima a la fuente de calor puede ser alterada a facies anfibolita, incluyendo anfíbol rico en Fe-Ca, clinozoisita, plagioclasas cálcicas y magnetita. En la zona media se desarrollan facies de esquistos verdes ricos en Na-Ca caracterizados por albita, cuarzo, clorita, actinolita y epidota. Ya en la zona distal a la fuente de calor y generalmente más próxima al fondo oceánico se desarrolla mineralogía asociada a facies de sub

esquistos como esmécticas ricas en K-Mg, clorita, y feldespato potásico (Galley *et al.*, 2007)⁸.

5.1.3 Clasificación de los depósitos VMS

Los depósitos VMS/VHMS han tenido múltiples clasificaciones de acuerdo a diferentes características, ya sea por tonelaje, contenido de metales base, ambiente tectónico de formación, contenido de oro y litología de la roca caja. A continuación, se enlistan y describen algunas de ellas:

5.1.3.1 Clasificación basada en el contenido de metales base

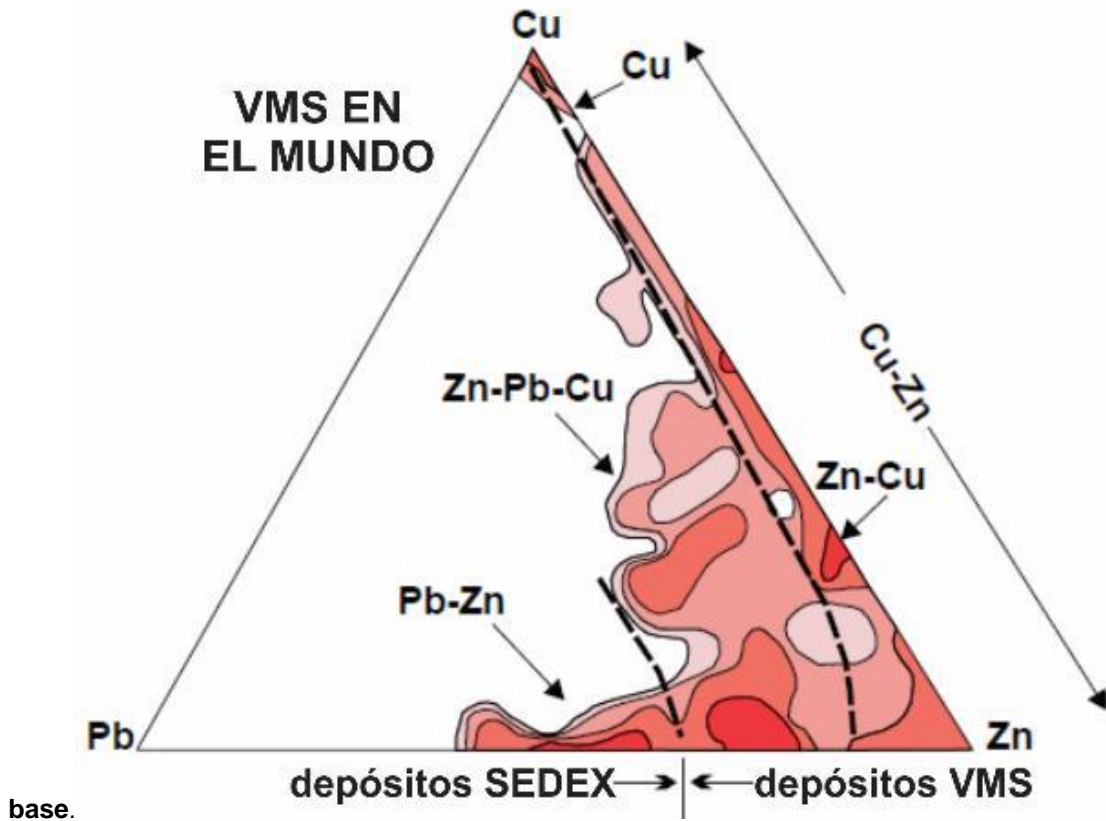
Esta clasificación mencionada en Galley *et al.* (2007)⁸ divide a los VMS en los grupos Cu-Zn, Zn-Cu y Zn-Pb-Cu (Figura 23).

5.1.3.2 Clasificación basada en el contenido de oro

Esta clasificación se describe en Mercier-Langevin *et al.*, (2010)⁹; si un depósito contiene más de 3,46 g/t de Au, este se considera “Aurífero”; los depósitos con 31 t de Au o más son considerados “Anómalos”; y los depósitos con más de 3,46 g/t y 31 t de Au, son considerados “Gold rich-VMS” (Figura 24 Superior). También pueden definirse como “normal” o Au-Rich VMS si la cantidad de oro en ppm es mayor a la suma de los metales base en porcentaje en peso (Cu+Zn+Pb %wt) clasificación de Poulsen & Hannington (Galley *et al.* 2007)⁸ (Figura 24 Inferior).

⁹ Mercier-Langevin, P., Hannington, M.D., Dubé, B., Bécu, V., (2010). The gold content of volcanogenic massive sulfide deposits. *Miner Deposita*, No. 46, p. 509-539.

Figura 23 Triangulo de clasificación de los depósitos VMS según su contenido de metales



Fuente: Fuente: Modificado de *Volcanogenic massive sulphide deposits* (2007).

5.1.3.3 Clasificación basada en la composición de la roca caja

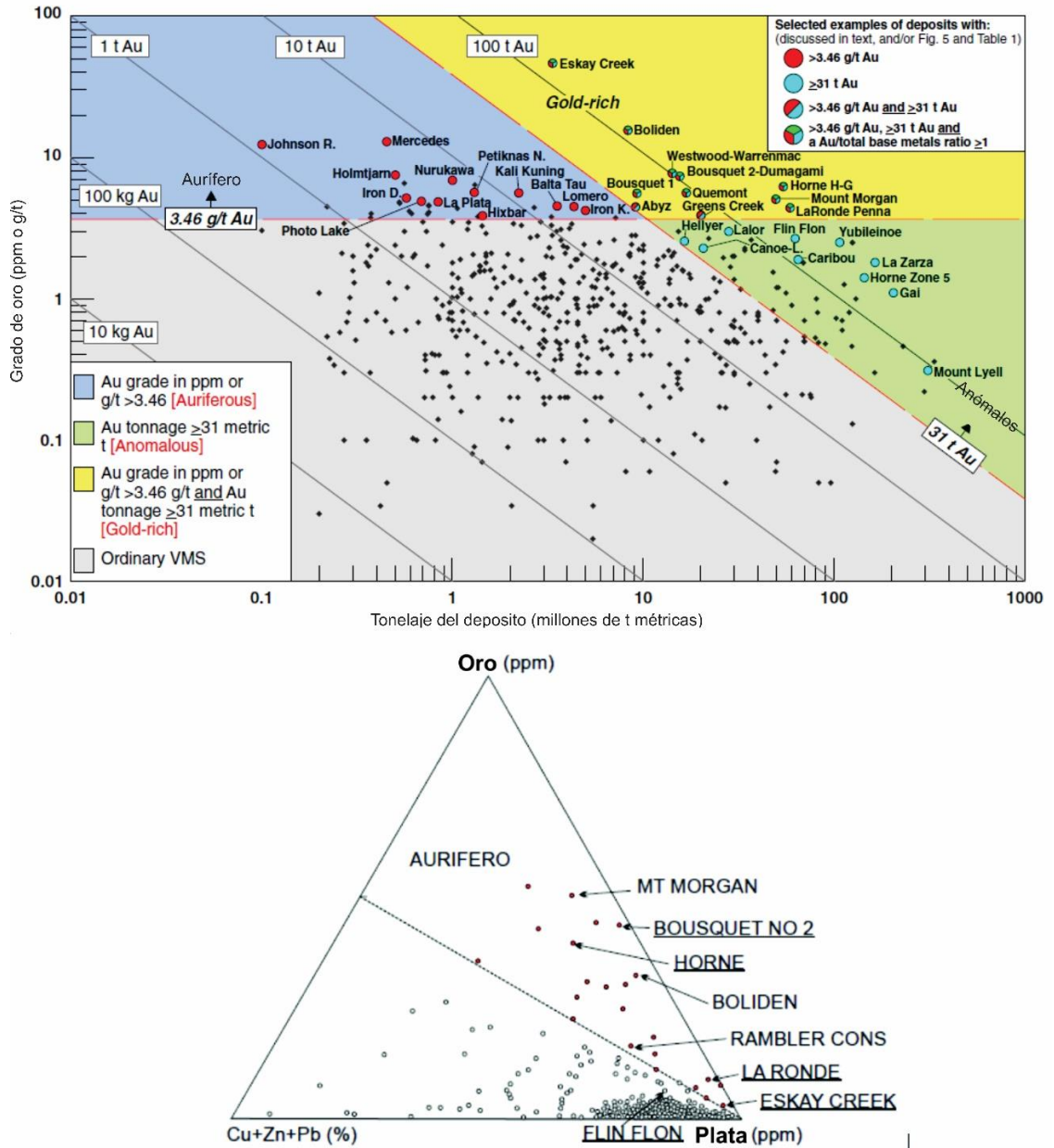
A continuación, se presenta un resumen la clasificación de VMS encontrada en *Galley et al. (2007)*⁸ y *Barrie and Hannington (1999)*¹⁰ (entre paréntesis se indican los nombres de los depósitos tipo que puede ser considerada una variación de la misma clasificación). También existen clasificaciones que se centran en el tipo de ambiente geodinámico en que dichos depósitos se desarrollan, cada tipo de VMS según roca caja está asociado a ciertos ambientes geodinámicos (Figura 25) (TABLA 4).

¹⁰ Barrie, C.T., and Hannington, M.D., (1999), Introduction: Classification of VMS deposits based on host rock composition, *En* Barrie, C.T., and Hannington, M.D., eds., *Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in modern and Ancient Settings: Reviews in Economic Geology*, v. 8, p. 2-10.

- *Tipo Máfico (Chipre) Definido* principalmente por dos criterios: Una sucesión estratigráfica en la que predominen (>75%) rocas volcánicas huésped de composición máfica de series toleítica y boninitica, y escasas o ausentes (<1%) de rocas volcánicas félsicas, pueden tener un componente menor (<10%) de rocas caja ultramáficas o siliciclásticas. El tipo abarca series ofiolíticas. Sus análogos modernos se encuentran en ambientes de dorsal oceánica, rift de back-arc avanzados, y arcos nacientes de supra-subducción. En promedio son depósitos ricos en Cu y pobres en Pb.
- *Tipo Bimodal-Máfico (Noranda) Definido* por tener una sucesión estratigráfica huésped con >50% de rocas máficas y más del 3% de rocas félsicas, y algunas rocas siliciclásticas. Estas rocas reflejan ambientes de arco volcánico o arco primitivo. Las rocas máficas suelen ser toleíticas y/o transicionales a calco-alcalinas. Son el tipo de VMS más común y su contenido de Cu es mayor que en los otros tipos.
- *Tipo Máfico-Siliciclástico (Besshi)* Contiene proporciones casi iguales de rocas intrusivas o volcánicas de carácter máfico y rocas siliciclásticas turbidíticas, las rocas félsicas son escasas o ausentes. Pueden tener cantidades significativas de carbonatos junto con las rocas siliciclásticas.
- *Tipo Bimodal-Félsico (Kuroko)* Contiene una sucesión estratigráfica con >50% de rocas volcánicas félsicas, y <15% de rocas siliciclásticas. Composicionalmente son asociados a arcos volcánicos maduros o rift de arco volcánico. En promedio contienen más Zn y Ag que los demás depósitos. También contienen comúnmente Barita.
- *Tipo Bimodal-Siliciclástico (Bathurst)* Contiene proporciones aproximadamente iguales de rocas volcánicas y siliciclásticas. Generalmente las rocas volcánicas son más abundantes las félsicas. Consistentes con ambientes de arco continental o rift de arco continental. Estos son los depósitos más grandes en tamaño. En promedio con bajo contenido de Cu y los más altos contenidos de Pb.

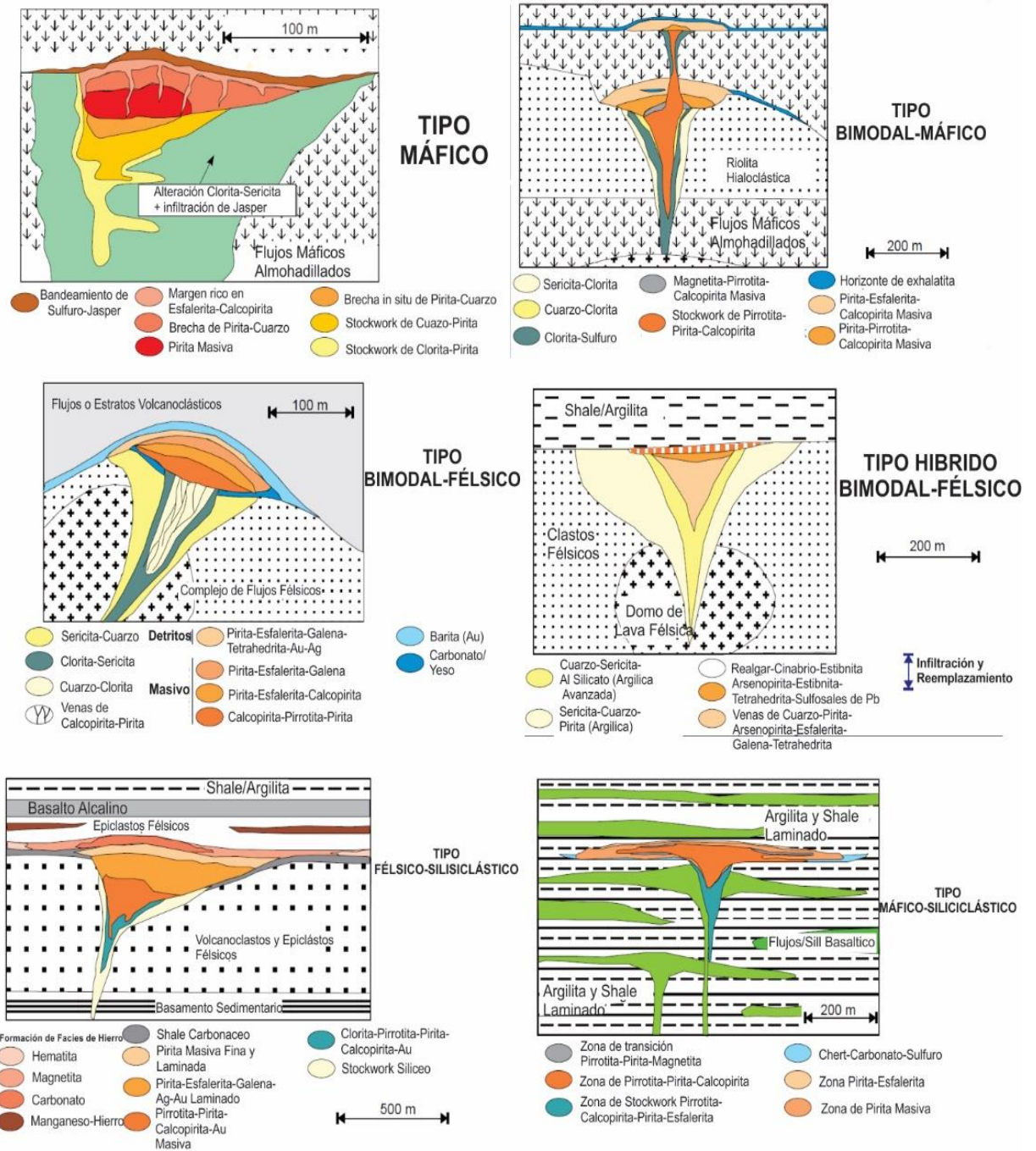
- *Híbrido Bimodal-Félsico (Eskay Creek)* Se refiere a depósitos VMS con mineralización epitermal superficial superpuesta.

Figura 24 Superior: Clasificación de los VMS basados en su contenido de Oro (Modificado de Mercier-Langevin et al. 2010). Inferior: Triángulo de clasificación de Poulsen & Hannington para los VMS según su contenido en oro.



Fuente: *The gold content of volcanogenic massive sulfide deposits (2010).*

Figura 25 Esquema de algunos depósitos canadienses representando cada tipo de VMS mencionado.



Fuente: Modificado de *Volcanogenic massive sulphide deposits* (2007).

TABLA 4 Ambiente tectónico en que se desarrollan los depósitos VMS y los tipos de asociación Litoestratigrafica correspondiente.

Ambiente Tectónico	Asociación Litoestratigrafica
Configuraciones Geodinámicas Divergentes	
Rift Intracontinental	Sulfuros Masivos Clasto-dominantes
Dorsales meso-oceánicas	
Expansión lenta	Máfico, Máfico-Siliciclástico
Velocidad Intermedia	Máfico
Expansión rápida	Máfico
Crestas sedimentarias	Máfico-Siliciclástico
Volcanes fuera del eje	Máfico
Configuraciones Geodinámicas Convergentes	
Arco interoceánico (Rifted)	Máfico-bimodal
Back-arc intraoceanico	Máfico, Máfico-Siliciclástico
Arco intracratonico (Rifted)	Félsico-bimodal
Extensión relacionada con colisión oblicua	Félsico-Siliciclástico
Extensión post-colisional	Félsico-bimodal
Configuraciones Geodinámicas Intraplaca	
Pluma o Punto Caliente	
Volcán intraplaca	Máfico
Plateau Oceánico	Máfico-bimodal

Fuente: *The Geology and Metallogeny of Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposits: Variations through Geologic Time and with Tectonic Setting (2010).*

5.1.4 Condiciones Para El Enriquecimiento De Au Y Cu

Como se ha descrito anteriormente el principal mecanismo de enriquecimiento en metales de los depósitos tipo VMS es, la re movilización de metales a través de la interacción del agua salada del océano con las rocas subyacentes, mediante celdas de convección. Sin embargo, este proceso no explica de forma satisfactoria el enriquecimiento en metales como Au, especialmente cuando se acumula cantidad suficiente como para formar un depósito *Gold-rich* o *Au-rich*. Para lo cual se requiere un proceso de movilización más eficiente, una roca fuente con muy alto contenido de Au, ebullición en el sub-fondo oceánico (causando una

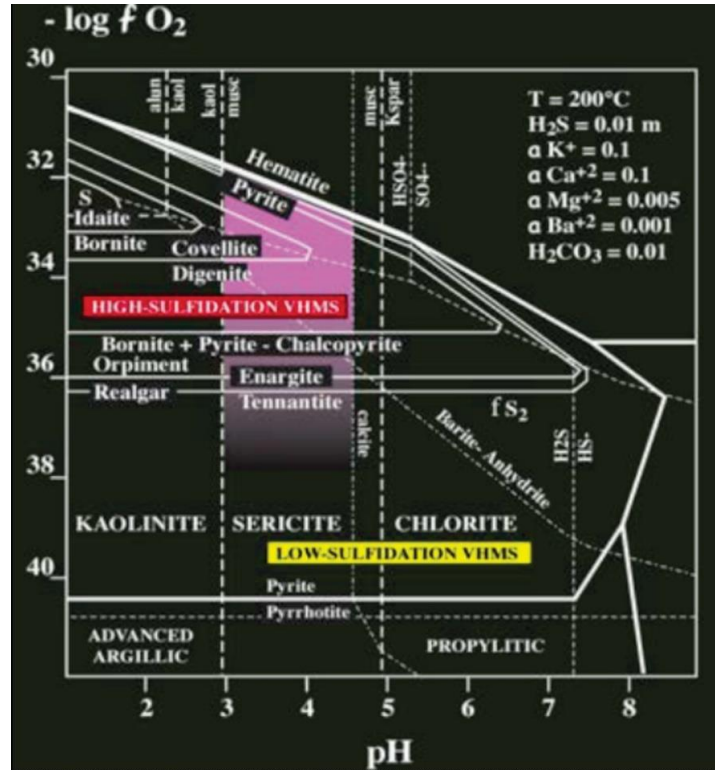
precipitación más eficiente), aporte magmático a los fluidos hidrotermales o sobre impresión de una mineralización posterior (Patten *et al.* 2016)¹¹.

Adicionalmente se requieren ciertas condiciones de temperatura, salinidad, pH, etc. Para llevar a cabo la movilización de metales como el Cu y el Au en un ambiente submarino. Como se muestra en la Figura 26, los cuerpos que han sido formados bajo condiciones de alta sulfidación se caracterizan por la presencia de minerales como Pirita, Hematita, Bornita (primaria), Digenita, Enargita, Tennantita-Tetraedrita y en ocasiones Calcopirita. Por su parte las mineralizaciones de baja sulfidación contienen Pirrotita como principal indicador. En cuanto a la temperatura, el cobre se moviliza como complejo clorurado solo a más 300° C (Figura 27), en consecuencia al trasportarse de esta forma se necesita una alta salinidad para poder movilizar las altas cantidades de cobre de un deposito VMS (Chiaradia., 2014)¹².

¹¹ Patten, C.G.C., Pitcairn, I.K., Teagle, D.A.H., Harris, M., (2016). Mobility of Au and related elements during the hydrothermal alteration of the oceanic crust: Implications for the source of metals in VMS deposits. *Miner Deposita*, No. 51, p. 179-200.

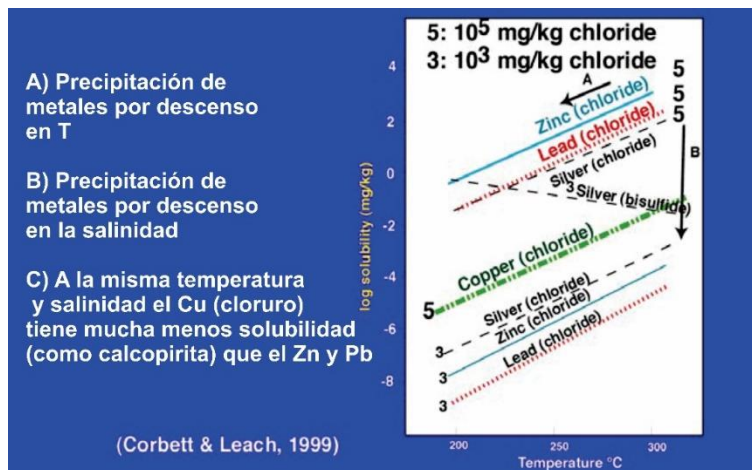
¹² Chiaradia, M., 2014. Volcanic-hosted massive sulfide (VHMS) deposits: general features. XXXII Curso Latino Americano de Metalogenia, UNESCO-SEG-SGA. Quito, Ecuador, 19-16 mayo 2014.

Figura 26 Grafica de Fugacidad de O₂, que muestra las diferencias mineralógicas entre un sistema de alta y baja sulfidación



Fuente: *Volcanic-hosted massive sulfide (VHMS) deposits: general features (2014)*.

Figura 27 Solubilidad de metales base.



Fuente: *Volcanic-hosted massive sulfide (VHMS) deposits: general features (2014)*.

5.1.4.1 Evolución de los fluidos hidrotermales

5.1.4.1.1 Maximus La temperatura de los fluidos mineralizantes aumenta con cada generación mineral iniciando desde pirritas framboidales de origen biogénico de baja temperatura (Piercey, 2015)¹³ que se encuentran en una matriz de Chert Jasper acompañadas de Siderita también de origen biogénico a muy baja temperatura (aprox 14 °C y 0.05-5 %wt NaCl) (Roh *et al.*, 2003)¹⁴, y la presencia de Loellignita indica un ambiente muy reductor de pH neutro (condiciones de baja sulfidación) (Gamarra-Urrunaga *et al.*, 2013¹⁵; Chiaradia, 2014¹²), la temperatura aumenta con la llegada de la segunda generación de pirita que puede ser de mayor temperatura, por su carácter más subhedral, todo lo anterior describe la etapa (I).

La llegada de Au puede estar enlazada a la aparición de Magnetita (fluidos oxidantes) y la Tetraedrita lo cual ubica la etapa (II) un campo de sulfidación intermedia-alta (?) Como se puede apreciar en la Figura 26.

Finalmente, la mineralización de Cu con la asociación Calcopirita-Estannita y Pirrotita, corresponde al pico más alto de temperatura y salinidad (Figura 43), pero también ubica a la etapa (III) en el campo metalogénico de baja sulfidación, específicamente por la presencia de la Pirrotita (Figura 26).

Las siguientes generaciones minerales corresponden a re movilización post diagénesis, debido a que se trata de relleno de fracturas etapa (IV) y Bornita de alteración supergena etapa (V).

¹³ Piercey, S.J., (2015). A semi-permeable interface model for the genesis of sub seafloor Replacement-type volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits. *Economic Geology*, November 2015, v. 110, p. 1655-1660.

¹⁴ Roh, Y., Zhang, C. L., Vali, H., Lauf, R. J., Zhou, J., and Phelps, T. J., (2003). Biogeochemical and Environmental Factors in Fe Biomineralization: Magnetite and Siderite Formation. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 51, No. 1, p. 83-95.

¹⁵ Gamarra-Urrunaga, J. E., Castroviejo, R., and Heinz-Jürgen, B. 2013. Preliminary Mineralogy And Ore Petrology Of The Intermediate-Sulfidation Pallancata Deposit, Ayacucho, Peru. *The Canadian Mineralogist*. Vol. 51 No. 1, p. 67-91.

5.1.4.1.2) Goliath El desarrollo de los eventos mineralizantes en el cuerpo está principalmente relacionado con un aumento de la temperatura, iniciando con el desarrollo de piritas framboidales de origen biogénico y de baja temperatura (Piercey *et al.* 2015)¹³ las cuales se ubican en material de la roca caja o Chert negro (siguiendo la terminología usada por Ático Mining Corporation) donde se encuentran relacionadas con presencia de Siderita, para la cual la presencia de este último es un marcador también de origen biogénico a muy baja temperatura con un rango de salinidad entre 0.05-5 %wt NaCl con temperaturas aproximadas a 14 grados Celsius (Roh *et al.*, 2003)¹⁴,

Para la etapa (2) del cuerpo encontramos que el ensamble de minerales de sulfuro (Calcopirita-Estannita-Pirrotita) donde claramente se muestra un ascenso en la temperatura, la llegada de Pirrotita ubica la mineralización en el campo de baja sulfidación debido a que este se considera un mineral indicador (Figura 26).

Por otro lado, el contenido de oro de presente en Goliath de debe al proceso normal de enriquecimiento de un VMS, así mismo El enriquecimiento de cobre está relacionado principalmente a la presencia de calcopirita ampliamente distribuida en el cuerpo. La temperatura de formación para un tercer evento de calcopirita incluye la presencia de Estannita.

La fase final (etapa 3) de mineralización en los cuerpos puede ser descrito como minerales que corresponden a la re-movilización de sulfuros, caracterizada por minerales que componen el relleno de fracturas. Los minerales como la Ankerita pueden ser producto del metamorfismo de bajo grado en la zona o por influencia de los últimos pulsos hidrotermales del sistema

5.2.3 Discusión

El depósito El Roble ha reportado a diciembre de 2015 unas reservas medidas de 3.8 %wt Cu y 2.61 g/t Au (Ático Updates Mineral Resources 2015)¹⁶, desde un

¹⁶ Ático Updates Mineral Resources 2015. Disponible en http://www.aticomining.com/i/pdf/news/2015-12-15_NR_ATY_j7eUP6.pdf

punto de vista generalizado del depósito parece tratarse de un caso de VMS normal, con un ligero enriquecimiento en Au. Pero si miramos de cerca, cada uno de los cuerpos mineralizados posee diferentes concentraciones de metales, lo llamativo del caso, es que las variaciones son muy marcadas como se observa en la TABLA 1, Maximus posee hasta 17.5 g/t de Au y solo 6.49 %wt de Cu, mientras Goliath tiene 2.10 g/t de Au y 10.30 %wt de Cu. Además, que como se menciona en el apartado anterior las diferencias mineralógicas señalan dos tipos de fluidos mineralizantes muy diferentes anterior Maximus corresponde a un cuerpo de sulfidación intermedia-alta(?) y Goliath a un cuerpo de baja sulfidación.

Tal como se menciona en las consideraciones preliminares, se requiere de un proceso adicional y más eficiente a la simple convección de convección generada en el fondo oceánico para llegar a un enriquecimiento de oro como el observado en Maximus, a pesar de que se encuentra en contacto directo con Goliath, ya hemos determinado que ambos cuerpos han sido formados bajo características metalogénicas diferentes. Por lo tanto, podemos afirmar se desarrolló otro proceso que enriqueció altamente a Maximus en oro. La opción más probable sería un aporte de tipo magmático-hidrotermal (Patten *et al.* 2016)¹¹. Aunque es hasta ahora una hipótesis que requiere estudios más profundos y a mayor escala.

Como consecuencia de estas diferencias tanto mineralógicas como de contenido de metales, y que se ha demostrado que cada cuerpo posee una historia metalogénica diferente, lo más recomendable para el proceso de extracción es tratar a cada uno como lo que es; una mineralización independiente. Ya que al mezclar los sulfuros de Maximus con los de Goliath se estaría bajando la ley de oro de Maximus y la de cobre de Goliath, perdiendo eficiencia en el proceso.

6. CONCLUSIONES

El estudio mineralógico y paragenético de los sulfuros presentes en los cuerpos mineralizados de Maximus y Goliath, aflorantes en el depósito El Roble, muestra claramente que estos cuerpos presentan diferencias significativas desde el punto de vista metalogénico.

Por un lado, el cuerpo mineralizado Maximus, se caracteriza por presentar tres eventos de mineralización, representados por las siguientes paragénesis: (1) Etapa (I): Pirita, Siderita, Lolingita y Qz; (2) Etapa (II): Magnetita-Tetraedrita-Cuarzo; (3) Etapa (III): Calcopirita-Estannita-Pirita-Pirrotita. Por otro lado, el cuerpo mineralizado denominado como Goliath se caracteriza por presentar Etapa (1): Pirita-Siderita-Cuarzo; Etapa (2) Calcopirita-Estannita-Pirrotita;

Las paragénesis anteriormente referidas en el cuerpo mineralizado Maximus, indican que éste se formó mediante tres eventos mineralizantes, dos de los cuales guardan características muy similares a las reportadas en la bibliografía como VMS- de baja sulfidación (el cual aporta Cu fundamentalmente) y otro de tipo VMS de sulfidación intermedia-alta(?) (Con aporte de Au fundamentalmente).

Los datos anteriormente referidos, implican que el Au presente en el cuerpo mineralizado Maximus, estaría relacionado con la circulación de fluidos hidrotermales propios de un sistema magmático-hidrotermal, mientras que el Cu predominante en Goliath (y en menor medida en Maximus), es el resultado de circulación de fluidos principalmente de origen marino propios de la formación normal de un VMS.

7. RECOMENDACIONES

Realizar estudios de isotopos de azufre (S2) y oxigeno (O2), a fin de corroborar el aporte de fluidos magmáticos-hidrotermales.

Realizar estudios de inclusiones fluidas a fin de determinar las condiciones termo-barométricas de formación de los fluidos.

Analizar la composición química de las Esfaleritas, presentes en cada cuerpo mineralizado con el propósito de determinar la ubicación de los cuerpos dentro sistema hidrotermal.

Realizar un análisis sedimentológico a las rocas sedimentarias de la formación Penderisco que hospedan la mineralización; y nuevos estudios geoquímicos en basaltos de la formación Barroso aflorantes en el depósito.

8. REFERENCIAS CITADAS

¹ Resumen-Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio El Carmen de Atrato (Chocó). Disponible en http://www.elcarmendeatrato-choco.gov.co/apc-aa-files/63333334663530373664373762363562/Resumen_EOT.pdf

² Cediel, F., R. P. Shaw, And C. Caceres, (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block, en C. Bartolini, R. T. Buffler, y J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 815–848

³ Bedoya G., Cediel F., Restrepo-Correa I., Cuartas C., Montenegro G., Marín-Cerón M.I., Mojica J., Cerón R., (2009). Aportes al conocimiento de la evolución geológica de las cuencas Atrato y San Juan dentro del arco Panamá-Chocó: Boletín de Geología Vol. 31, N° 2, p. 2-11.

⁴ Rodriguez, G., y Arango, M. A., (2013). Formación barroso: arco volcánico toleitico y diabasas de san José de urama: un prisma acrecionario T-MORB en el segmento norte de la cordillera occidental de Colombia. En Boletín Ciencias de la Tierra, Nro. 33, pp. 17-38.

⁵ Ortiz, F., Gaviria, A.C., Parra, N., Arango, J.C., Ramirez, G., (2003). Guías geológicas para la localización de metals preciosos en las ofiolitas del occidente

de Colombia. Complejos ofiolíticos en IBEROAMÉRICA. Proyecto XIII.1 – CYTED (Ciencia y Tecnología para el Desarrollo). p. 186-197.

⁶ Restrepo, J. J. and Toussaint, J. F. (1988). Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. En *Episodes*, Vol. 11, pp. 189-193.

⁷ Ático Mining Corporation. August 27th, 2012. Technical report on the El Roble project, Chocó Department, Colombia, No 1.

⁸ Galley, A.G., Hannington, M.D., and Jonasson, I.R., (2007). Volcanogenic massive sulphide deposits. Good fellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5*, p. 141-161.

⁹ Mercier-Langevin, P., Hannington, M.D., Dubé, B., Bécu, V., (2010). The gold content of volcanogenic massive sulfide deposits. *Miner Deposita*, No. 46, p. 509-539.

¹⁰ Barrie, C.T., and Hannington, M.D., (1999), Introduction: Classification of VMS deposits based on host rock composition, *En* Barrie, C.T., and Hannington, M.D., eds., *Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in modern and Ancient Settings: Reviews in Economic Geology*, v. 8, p. 2-10.

¹¹ Patten, C.G.C., Pitcairn, I.K., Teagle, D.A.H., Harris, M., (2016). Mobility of Au and related elements during the hydrothermal alteration of the oceanic crust: Implications for the source of metals in VMS deposits. *Miner Deposita*, No. 51, p. 179-200.

¹² Chiaradia, M., 2014. Volcanic-hosted massive sulfide (VHMS) deposits: general features. XXXII Curso Latino Americano de Metalogenia, UNESCO-SEG-SGA. Quito, Ecuador, 19-16 mayo 2014.

¹³ Piercey, S.J., (2015). A semi-permeable interface model for the genesis of sub seafloor Replacement-type volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits. *Economic Geology*, November 2015, v. 110, p. 1655-1660.

¹⁴ Roh, Y., Zhang, C. L., Vali, H., Lauf, R. J., Zhou, J., and Phelps, T. J., (2003). Biogeochemical and Environmental Factors in Fe Biomineralization: Magnetite and Siderite Formation. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 51, No. 1, p. 83-95.

¹⁵ Gamarra-Urrunaga, J. E., Castroviejo, R., and Heinz-Jürgen, B. 2013. Preliminary Mineralogy And Ore Petrology Of The Intermediate-Sulfidation Pallancata Deposit, Ayacucho, Peru. *The Canadian Mineralogist*. Vol. 51 No. 1 , p. 67-91.

¹⁶ Ático Updates Mineral Resources 2015. Disponible en http://www.aticomining.com/i/pdf/news/2015-12-15_NR_ATY_j7eUP6.pdf

9. BIBLIOGRAFIA

Ático Mining Corporation. August 27th, 2013. Technical report on the El Roble project, Chocó Department, Colombia, No 1.

Ático Mining Corporation. February 15th, 2012. Amended Technical Report El Roble Copper-Gold Project, Chocó Department, Colombia, No 2.

Galley, A.G., Hannington, M.D., and Jonasson, I.R., 2007. Volcanogenic massive sulphide deposits. Good fellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 141-161.

Ortiz, F., Gaviria, A.C., Parra, N., Arango, J.C., Ramirez, G., 2003. Guías geológicas para la localización de metals preciosos en las ofiolitas del occidente de Colombia. Complejos ofiolíticos en IBEROAMÉRICA. Proyecto XIII.1 – CYTED (Ciencia y Tecnología para el Desarrollo). p. 186-197.

Referencias Electronicas

Esquema de Ordenamiento Territorial, Municipio El Carmen de Atrato. Chocó. 1999-2000. Disponible en http://www.elcarmendeatrato-choco.gov.co/apc-aa-files/63333334663530373664373762363562/Resumen_EOT.pdf . 14/11/2015.