



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evolución del yacimiento de
Sabinas Sombrerete Zacatecas,
con base en trabajo de campo y
laboratorio**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Roberto Carlos Reyes Ramírez

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Alfredo Victoria Morales



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos

A Minera Sabinas S.A de C.V, Industrias Peñoles, S.A.B. de C.V. y Grupo BAL, por toda la información proporcionada para la realización del presente trabajo y permitirme ser parte de este importante Grupo Minero.

A mi madre Ana María Reyes Ramírez por ser la mujer más valiente que he conocido, que me demostró que la adversidad no es un límite, sino una área de oportunidad que se debe enfrentar.

A Lily, Cami y Beto por ser mi motivación diaria.

A toda mi familia y amigos por su apoyo incondicional.

A mis profesores, mentores que me han enseñado y orientaron durante el tiempo que ha durado este proceso.

A Dios por darme la oportunidad de seguir adelante.

Roberto Carlos Reyes Ramírez.

Índice.

Agradecimientos.....	1
Resumen.....	4
1. Introducción.....	6
1.1 Justificación.	
1.2 Antecedentes.	
1.3 Objetivo.	
2. Metodología.....	10
3. Generalidades.....	10
3.1 Localización geográfica.	
3.2 Clima y vegetación.	
3.3 Hidrografía.	
3.4 Fisiografía y geomorfología.	
4. Geología Regional.....	14
4.1 Estratigrafía.	
4.2 Intrusivos.	
4.3 Geología Estructural.	
5. Geología Local.....	15
5.1 Rocas Sedimentarias.	
5.2 Rocas Ígneas.	
5.3 Rocas Metamórficas.	
5.4 Geología estructural.	
5.5 Yacimiento de Sabinas.	
5.6 Recursos y Reservas.	
6. Metodología.....	21
6.1 Ubicación de las Muestras.	
6.2 Preparación y Análisis.	
7. Caracterización Roca Encajonante.....	23
7.1 Niveles Hornfelsicos.	
7.2 Niveles de Skarn Cálculo.	
7.3 Texturas y Mineralogía de los Niveles de Skarn Cálculo.	
7.4 Intrusivo Granítico-Cuarzomonzonítico.	
7.5 Texturas y Mineralogía del Intrusivo.	

8. Caracterización Elemental MEB.....	56
8.1 Sulfuros.	
8.2 Sulfosales.	
8.3 Óxidos.	
8.4 Silicatos.	
9. Difracción de Rayos X.....	76
10. Caracterización Estructural.....	87
11. Paragénesis.....	92
12. Evolución del Yacimiento.....	95
13. Conclusiones.....	104
14. Referencias.....	109

Resumen.

La Mina de Sabinas se localiza en la parte noroeste del Estado de Zacatecas, en el municipio de Sombrerete, aproximadamente a 185 Km. de la Ciudad Capital Zacatecas. Actualmente es propiedad de Industrias Peñoles y esta operado por Minera Sabinas S.A. de C.V.

Este yacimiento tiene 467 años de historia y ha sido reportado desde diferentes puntos de vista geológico-minero durante los últimos 50 años, predominantemente sobre la clasificación de las rocas sedimentarias que encajonan la mineralización. Algunos autores, la correlacionan con la Fm. Cuesta del Cura, Indidura o bien Caracol; Un autor le adjudica el nombre informal Fm. Papantón.

Dada la alteración de los intrusivos, han sido clasificados como cuarzomonzonita, datado en 44.0 ± 0.2 Ma. El halo del intrusivo lo describen como un skarn con mineralización de zinc y plomo, sin llegar a la descripción de la mineralogía.

El trabajo de campo y laboratorio muestra que las rocas encajonantes se componen de una secuencia rítmica de hornfels pseudoestratificado, con delgadas intercalaciones de pedernal y niveles de skarn cálcico de granate, skarn de actinolita-tremolita, skarn de wollastonita y menor hedenbergita. El intrusivo principal es de composición general cuarzomonzonítico con algunas derivaciones graníticas; está fuertemente argilizado y silicificado, enmascarando de manera generalizada algunos de los minerales primarios.

La actividad tectónica que han sufrido las diferentes rocas del yacimiento de Sabinas ha jugado un papel importante en el estilo de mineralización, principalmente desarrollando con dos tipos de deformación: dúctil compresivo de edad Laramídica y que se ve reflejada en un plegamiento, formando sigmoides microscópicos que en ocasiones se encuentran rellenos de calcita de recristalización (marmorización), así como fallamiento direccional o de cizalla y, fracturamiento frágil extensivo del Terciario, que en las muestras se ve reflejado por un fracturamiento con relleno generalmente por calcita y mineralización metálica.

Las muestras se enviaron al Laboratorio y cuyos resultados arrojaron tres estilos de mineralización:

Mineralización de Reemplazamiento representada por pirrotita/magnetita reemplazando niveles de hornfels ricos en materia orgánica y arcillas, donde se aprecia pirrotita en conversión a marcasita y pirita.

Mineralización Cogenética al skarn representada por arsenopirita con alteración a lollingita y con textura de reemplazamiento de calcosilicatos aciculares principalmente asociada a esfalerita y galena.

Mineralización Epitermal, la cual está representada por abundantes sulfuros de plomo, cobre y hierro, así como una gran variedad de sulfosales de cobre y plata; se observa un enriquecimiento supergénico con alteración de sulfuros de cobre (covelita, digenita), así como

de plata nativa (se detectó oro nativo). Los minerales característicos son, galena con tendencia a ser de tipo argentífera, calcopirita, bornita, calcopirita, casiterita, sulfosales complejas de plomo con selenio de plata/selenio e indio, sulfosales de cobre como (tetraedrita que deriva en freibergita, roquesita, estromeyerita, naumannita, mckinstryita, miharaita; así como gudmundita). Esta mineralización rica en Cu, Ag y Pb encuentra su mejor depósito en los niveles ricos en pirrotita/magnetita.

Abstract.

The Sabinas Mine is located in the northwestern part of the State of Zacatecas, in the municipality of Sombrerete, approximately 185 km from the Capital City of Zacatecas, it is currently owned by Industrias Peñoles and is operated by Minera Sabinas S.A. de C.V.

This deposit with 467 years of history has been reported from different geological-mining points of view in the last 50 years, on the classification of the sedimentary rocks that encase the mineralization. Some authors compare it with the Fm. Cuesta del Cura, Indidura or Caracol; A stratigraphic author gives it the informal name Fm. Papanton. Given the alteration of the intrusives, they have classified it as quartzomonzonite and have dated it at 44.0 ± 0.2 ma. While the intrusive halo is described as a skarn with zinc and lead mineralization, without reaching the description of the mineralogy.

Field and laboratory work show that the encasing rocks are composed of a rhythmic sequence of pseudostrata of hornfels, with thin intercalations of flint and levels of garnet calcium skarn, actinolite-tremolite skarn, wollastonite skarn and minor hedenbergite. The presence of a generally quartz-monzonitic intrusive with some granite derivations; strongly argillized and silicified, it masks in a generalized way some of the primary minerals.

The tectonic activity suffered by the different rocks of the Sabinas Deposit has played an important role, mainly present in two types of deformation: Laramide compressive ductile, which is reflected in a microscopic folding, forming sigmoids that are sometimes filled with calcite. of recrystallization (marmorization), as well as directional or shear faulting; the other type of fracturing is Tertiary extensive brittle, which in the samples is reflected by a fracturing filled generally by calcite and metallic mineralization.

The samples that were sent to the Laboratory showed three types of mineralization:

Replacement mineralization represented by pyrrhotite / magnetite replacing levels of hornfels rich in organic matter and clays, where pyrrhotite is seen in conversion to marcasite and pyrite.

Cogenetic mineralization to skarn represented by arsenopyrite with alteration to lollingite and with replacement texture of acicular calcosilicates mainly associated with sphalerite and galena.

Epithermal mineralization, which is represented by abundant lead, copper and iron sulfides, as well as a great variety of copper and silver sulfosalts; where a supergenic enrichment of copper sulphides (covellite, digenite), as well as native silver (native gold was detected) is observed. The characteristic minerals are galena which has the tendency to be silver-like, chalcopyrite, bornite, chalcopyrite, complex sulfosalts of lead with selenium silver / selenium and indium, sulfosalts of copper such as tetrahedrite derived from freibergite, roquesite, stromeyerite, naumannite, mckinstryite, miharaite; as well as gudmundite and cassiterite. This mineralization which is rich in copper, silver and lead finds its best deposit at the pyrrhotite / magnetite rich levels.

1. Introducción.

1.1 Justificación.

El yacimiento de Sabinas ha sido históricamente explotado a lo largo de diferentes tipos de estructuras mineralizadas. Los primeros trabajos extractivos fueron sobre vetas, destacando vetas de La Noria y San Luis; posteriormente y debido a la cercanía con la Mina de San Martín, se explotó el cuerpo de Skarn, asociado a la intrusión cuarzomonzonítica principal. Conforme se fue desarrollando la infraestructura de la mina y con los trabajos de exploración, en interior y superficie, se logró identificar otros cuerpos mineralizados que resultan ser diferentes con respecto a su origen, por lo que resulta necesario realizar un modelo actualizado del yacimiento, que permita explicar la evolución de la zona mineralizada de Sabinas. Este será soportado por las observaciones realizadas en trabajo de campo y gabinete derivado de los resultados analíticos de las muestras enviadas a laboratorio. La interpretación preliminar de los datos de geoquímica permitirá que el personal operativo alcance un mejor entendimiento del estilo de mineralización, pudiendo en consecuencia enfocar manera óptima los futuros trabajos de exploración para la generación, extracción de nuevo mineral y abastecer eficientemente las operaciones de beneficio.

1.2 Antecedentes.

Sombrerete es uno de los distritos mineros más famoso por su riqueza. Se fundó el 6 de junio de 1555, bajo la administración del denominado “nuevo mundo” por el Capitán Don Juan de Tolosa, quien descubrió las minas que tanta fama y gloria le dio.

Las minas fueron localizadas en tres áreas: Pabellón, Veta Negra y Cañada. Estas fueron adquiridas en 1815 por los hermanos Pedro y Narcizo Anitúa. Después de su separación por intereses de negocios, las minas fueron operadas solamente por el Sr. Narcizo Anitúa. En 1821, transfirió las Minas de la Cañada a Guadalupe Chávez y Manuel Mena, quienes las operaron hasta 1825 dejándolas abandonadas. En 1829 se asociaron Guadalupe Chávez, José María

Bracho y Salvador Morillo y trabajaron de nuevo las minas hasta 1832. En abril de 1833, Narcizo Anitúa formó otra compañía, la cual suspendió operaciones en agosto del mismo año.

En junio de 1841 la empresa fue abandonada por completo, en ese punto, las minas fueron adquiridas por un grupo de ciudadanos de Sombrerete. Nueve meses después, sin embargo, las minas fueron abandonadas nuevamente por disturbios de tipo social.

En 1851, continuaron esporádicamente trabajos en las áreas de Pabellón y Veta Negra pero el área de la Cañada estuvo completamente abandonada.

En el año de 1925, la Compañía Inversiones del Oro, S.A. reinició los trabajos de explotación en la Noria de San Pantaleón (Figuras 1.1 y 1.2), mineral que se encuentra a 1.5 kilómetros de la Mina Sabinas, dicho mineral llegó a beneficiar hasta 500 toneladas por día.

Esta compañía de origen inglés también tomó participación en la explotación de algunas de las vetas de la Mina San Martín.

En el año de 1938, la Compañía Inversiones del Oro, S.A. se retiró, dejando la mina en manos de una cooperativa de trabajadores, la cual, al parecer por falta de administración adecuada, fracasó; enseguida fue entregada a una segunda cooperativa en el año de 1942, la cual llegó a beneficiar hasta 800 toneladas por día, explotando la mina sin técnicas adecuadas ya que se extrajeron los pilares que la ingeniería de desarrollo de la Compañía Inversiones del Oro, S.A. dejó al trabajar sus vetas por medio de sistema de bordos provocando así el derrumbe de la mina por lo que actualmente se encuentra fuera de servicio.



Figura 1.1 Tiro La Noria. Fotografía tomada de los Archivos de Minera Sabinas S.A. de C.V.



Figura 1.2 Depósito de Jales La Noria. Fotografía tomada de los Archivos de Minera Sabinas S.A. de C.V.

En el año de 1953 la Cooperativa vendió los derechos de la Noria a los señores Alfredo Anhart, Ernesto Anhart y Jesús Guzmán; posteriormente el Sr. Guzmán vendió su parte al Sr. Leopoldo Anhart y a la Compañía Minera Fresnillo, surgiendo la Compañía Minera La Cumbre. A partir de ese año (1953), y hasta el año 1995, fue propiedad de la Compañía Minera Sabinas, S.A. de C.V. perteneciente a la Compañía Minera Fresnillo y al Ing. Ernesto Leopoldo Anhart, como socio mayoritario. Durante este periodo, Minera Sabinas fue considerada como una de las mejores empresas del país en el ramo minero, gracias a su buena planeación y administración con las que se contó durante los últimos años de ese periodo. Los sistemas de explotación utilizados en ese mismo periodo fueron:

Corte y relleno hidráulico en la zona del Skarn y bancos descendentes sin relleno para la zona de vetas. Grupo Peñoles, pasó a formar parte como socio único de Minera Sabinas en el año de 1995 (Figura 1.3); fue a partir de esa fecha cuando esta Unidad empezó a adoptar tanto las políticas como la forma de administración correspondiente.



Figura 1.3 Minera Sabinas en la actualidad. Fotografía tomada de los Archivos de Minera Sabinas S.A. de C.V.

Con respecto a los yacimientos de la región, existe abundante bibliografía, sin embargo, adolece del análisis de texturas que permita confirmar las relaciones genéticas de la mineralización. En general, dicha bibliografía, coincide que el yacimiento presenta leyes, a través del tiempo, que varían en promedio de 100 a 300 g/t Ag, con valores de Zn que pueden rebasar el 5% y de 3 a 4% en Cu y Pb.

Como eje de las descripciones de la litología de la región se enfocan a un stock ácido conocido como Intrusivo la Gloria que genera un skarn e intrusiona en apariencia a la Fm. Cuesta del Cura, la cual es descrita como una secuencia de más de 500 metros de caliza con capas delgadas de caliza e intercalaciones de delgadas capas de lutita y pedernal.

Según los diferentes autores el stock va de granítico a granodiorítico estando conformado por múltiples eventos intrusivos. Damon et al. (1981, 1983) le adjudica por medio de isotopía K/Ar una edad de 46.2 ± 1 Ma. Así mismo, describen presencia de múltiples diques de composición ácida. Con respecto a la mineralogía del yacimiento, Aranda, (1978) indica que en la Mina San Martín el zoneamiento del skarn del exterior del cuerpo hacia el centro consistente de: cuarzo sacaroide; piroxeno-granate; tremolita-granate. Con respecto a la morfología, se describen chimeneas de sulfuros, mantos y vetas. En términos generales se identifican en la mina varios cuerpos mineralizados separados de forma irregular y siguiendo una tendencia alargada de rumbo NW-SE. Por su parte Rubin y Kyle (1988) determinan que el granate es de composición andradítica-grosularítica y el piroxeno como hedenbergítico, mientras que en la etapa retrógrada de metamorfismo se caracteriza por la presencia de wollastonita, vesuvianita, epidota, clorita, fluorita, calcita y cuarzo. Como minerales metálicos identificaron calcopirita, esfalerita, galena, pirita, pirrotita, arsenopirita, molibdenita, sulfosales de plata y cobre, así como plata nativa; el zoneamiento metálico del intrusivo hacia el exterior es de Cu a Zn.

1.3 Objetivo.

El principal objetivo de este trabajo es poder establecer un modelo geológico, para mostrar las diferentes etapas de mineralización en el yacimiento de la Mina Sabinas, lo que permita a los geólogos de mina dirigir la exploración de una manera óptima, acorde a cada uno de los tipos de mineralización y con ello generar nuevos recursos minerales para extender e incrementar la vida operativa de la Mina de Sabinas.

2. Metodología.

La metodología para llevar a cabo este trabajo se definió de acuerdo con las necesidades actuales de exploración que tiene la Mina de Sabinas, por lo que fue necesario hacer una revisión de la información que existe en los archivos de esta y hacer algunas adecuaciones para poder alcanzar el objetivo planteado inicialmente.

Se recopilaron los mapas geológicos de superficie y mina que están dentro de los acervos de las mineras del Distrito Minero de Sabinas, la finalidad fue poder reconocer las principales características geológicas, como rocas encajonantes, cuerpos mineralizados, alteraciones y los principales rasgos estructurales que pueden controlar la mineralización del yacimiento.

Una vez que se analizó la información, se realizó un plan de trabajo para llevar a cabo el muestreo de roca representativa de los cuerpos mineralizados, principalmente de aquellos que no cuentan con suficiente información mineralógica y, que permita asociarlo con alguna etapa de mineralización. El muestreo se realizó entre los Niveles 400 y 900.

Las muestras fueron enviadas a laboratorio para realizar su caracterización mineralógica, una vez obtenidos los resultados se realizó el análisis de la información, para poder establecer un modelo geológico actualizado considerando las diferentes etapas de mineralización en el yacimiento de la Mina Sabinas.

3. Generalidades.

3.1 Localización geográfica.

El Distrito minero Sabinas/San Martín se encuentra situado en la porción noroeste del Estado de Zacatecas, aproximadamente a 185 Km, de la ciudad capital Zacatecas. Tiene una elevación media sobre el nivel del mar de 2,600 m. Sus coordenadas geográficas son las siguientes:

Latitud Norte 23° 30' 00"

Longitud Oeste 103° 30' 00"

El Distrito Minero está comunicado por la carretera panamericana federal Núm. 45, partiendo de la ciudad de Sombrerete hacia la ciudad de Durango a 11 kilómetros, en el punto de entronque del camino revestido de asfalto que conduce al pueblo de San Martín (Figura 3.1); en el kilómetro 4 se encuentra una desviación que conduce a la mina con una distancia de recorrido de 6 Km.

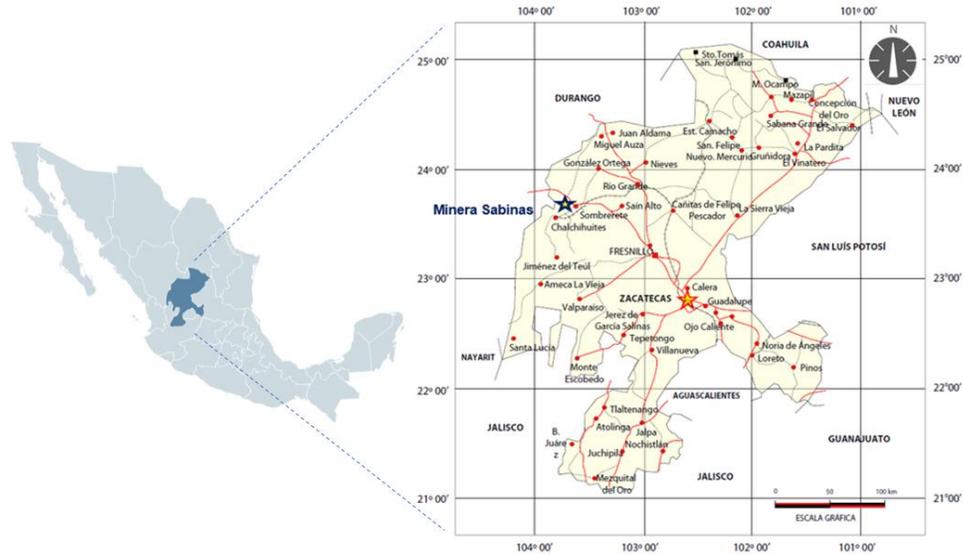


Figura 3.1 Localización de Minera Sabinas en el Estado de Zacatecas. Fuente Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2016.

3.2 Clima y Vegetación.

El clima predominante en la región es Templado-Húmedo con variantes en las diferentes estaciones del año. La temperatura promedio anual es de 16 °C alcanzando su máxima temperatura en el verano con 26 °C y su mínima temperatura en la época de invierno, con temperaturas inferiores a 0 °C. En ocasiones el clima se vuelve extremo en la región.



Figura 3.2 Clima Sombrerete Estado de Zacatecas. Fuente retofotomexico.com.

La vegetación predominante acorde con las características climatológicas abunda la vegetación de tipo xerófito en la mayor parte de la región, como, nopal, huisache, cactus, biznagas, entre otras (Figura 3.3); en algunas otras áreas, siendo éstas minoría, se podrán localizar árboles de coníferas y otro tipo de vegetación con características adaptables al clima que abunda en la zona alta de la sierra.



Figura 3.3 Clima Sombrerete Estado de Zacatecas. Fuente guiaturisticamexico.com.

3.3 Hidrografía.

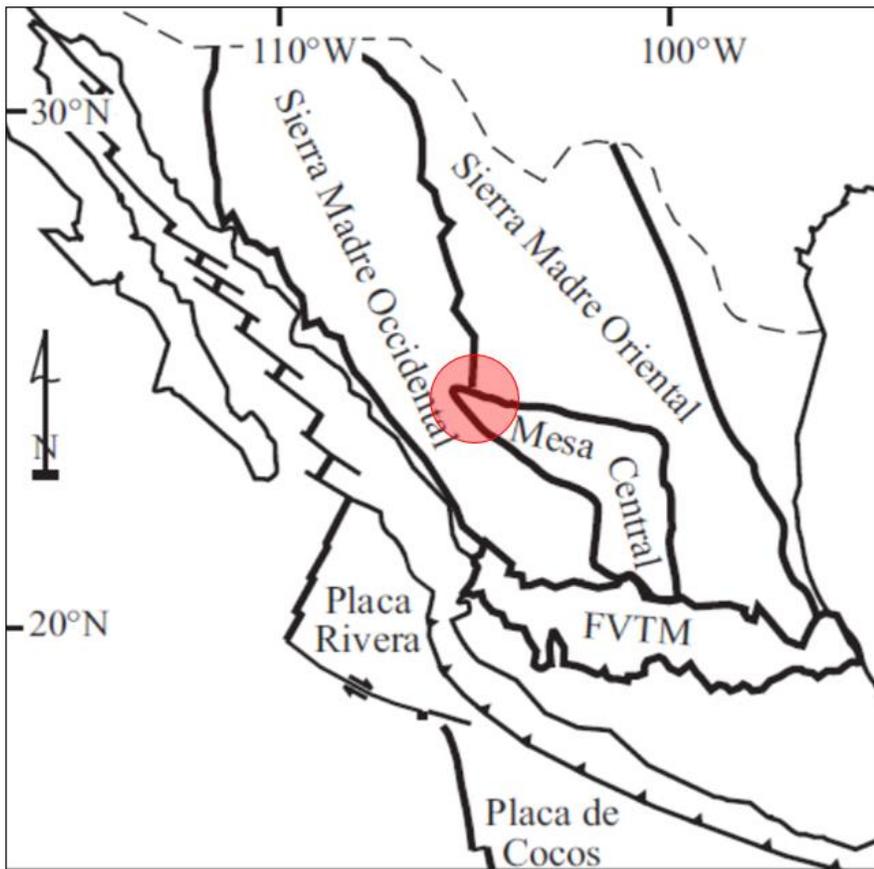
Hidrográficamente, se observa que el patrón de drenaje superficial es del tipo rectangular hacia el SE y del tipo dendrítico al NW (Figura 3.4), los cauces tributarios tienen la dirección de desagüe hacia el Sur y el Suroeste, llegando finalmente al Río San Antonio el cual tiene un drenaje hacia el NW y W.



Figura 3.4 Hidrografía del área de Sombrerete, Zacatecas. Fuente Google Earth.

3.4 Fisiografía y Geomorfología.

La mina de Sabinas se ubica en la intersección austral de las Provincias Fisiográficas de la Sierra Madre Occidental y La Mesa del centro, particularmente en la Sub-provincia de Llanuras Altas (Figura 3.5). El relieve característico es en general del tipo de llanura, con elevaciones medias de 2,351 m.s.n.m. en la Ciudad de Sombrerete; debido a que Minera Sabinas se localiza en un terreno montañoso, las elevaciones son variables en un rango que oscila de 2,500 hasta 3,015 m.s.n.m. Las principales estructuras del relieve en la región del Distrito San Martín son el Cerro de la Gloria, Cerro de San Pantaleón, Cerro Prieto y el Cerro del Papantón.



El Distrito Minero de San Martín-Sabinas esta ubicado en la intersección de las provincias fisiográficas de Sierra Madre Occidental y la Mesa Central (Servicio Geológico Mexicano, 2011), contiene yacimientos epitermales y depósitos de Skarn asociados a un conjunto de intrusiones ígneas de rumbo general NW-SE (Camprubí y Albinson, 2006).

Figura 3.5 Provincias Fisiográficas y ubicación del Distrito Minero de Sabinas-San Martín. Fuente SGM, 2011.

4. Geología Regional.

4.1 Estratigrafía.

Regionalmente las formaciones sedimentarias de interés comprenden rocas calcáreas con alternancia o intercalaciones terrígenas del Jurásico al Cretácico; en el Terreno Parral las rocas Cretácicas con mayor capacidad para alojar yacimientos son la Formación Cuesta del Cura, compuesta por calizas con bandas y nódulos de pedernal, incluye algunos horizontes de lutitas y limolitas. Sobreyaciendo a esta formación se encuentra la Formación Indidura, compuesta por calizas arcillosas, calizas dolomíticas, lutitas y limolitas, al NW de Sabinas dentro de la misma región, se encuentra la Formación Baluarte, que es correlacionable con las formaciones Cuesta del Cura e Indidura, conformada por calizas con intercalaciones de rocas siliciclásticas, bandas discontinuas de pedernal, lutitas, areniscas y limolitas y resalta su importancia por alojar al yacimiento Cerro Las Minitas, Durango (Figura 4.1).

4.2 Intrusivos.

Los intrusivos relacionados con los yacimientos minerales del Terreno Parral, son de edades variables desde el Cretácico Superior al Terciario Inferior; de composiciones también variables, por ejemplo, en Sabinas- San Martín el stock precursor es un monzogranito con edad de 46.2 +/- 1.0 Ma, (Damon et al.,1981); en el Distrito de Chalchihuites-La Colorada, Zacatecas, el stock es una granodiorita y en Cerro Las Minitas, el stock precursor es una monzonita.

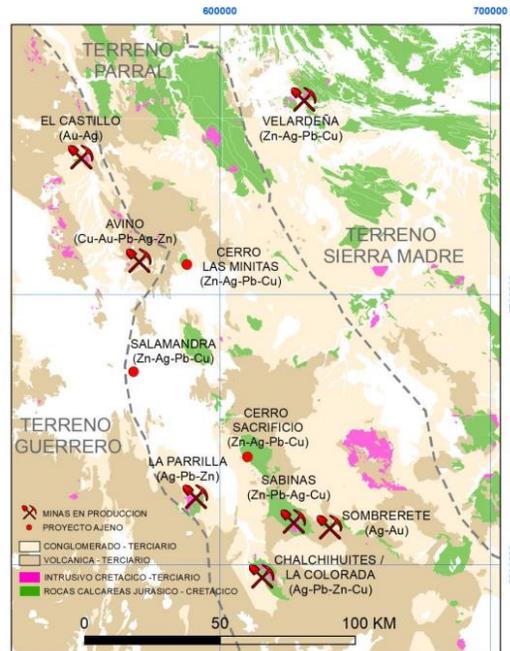


Figura 4.1 Mapa geológico regional Terrenos Tectonoestratigráficos. Fuente SGM.,2020.

4.3 Geología Estructural.

Regionalmente el área fue afectada por una variedad de esfuerzos compresivos y distensivos, producto de la Orogenia Larámide. Tales lineamientos permitieron la inyección de diversos intrusivos. Esta geodinámica provocó una fuerte deformación con un gran anticlinal acostado con vergencia hacia el SW, con un rumbo NW-SE, y abundantes anticlinales y sinclinales de pequeña escala (Graf, 1997), fallas inversas y zonas de cabalgadura, fallas laterales y normales.

5. Geología Local.

Localmente en el Distrito Minero de Sabinas-San Martín se tiene rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas de contacto.

5.1 Rocas Sedimentarias.

Las rocas sedimentarias presentes en la Mina de Sabinas son de edad Cretácica y pertenecen a las siguientes formaciones (Figura 5.1):

Formación Cuesta del Cura: Localmente es la que tiene una mayor distribución en el área, consiste en calizas de color gris, gris oscuro y negro; de grano muy fino con aspecto carbonoso, de estratos ondulantes e intercalaciones de pedernal negro, los estratos están bien definidos, son uniformes y tienen espesores entre 10 y 40 cm. Se han encontrado moldes de amonitas mal preservadas que dificulta su clasificación exacta, pero que pueden situar en el Albiano Superior-Cenomaniano Inferior (Hintze Arenas. 1988). El espesor total de esta formación en el área de la mina es de aproximadamente 770 m.

Formación Indidura: Se encuentra suprayaciendo a la Fm. Cuesta del Cura y consiste principalmente de una alternancia de lutitas con calizas arcillosas, formando estratos de 10 a 30 cm de espesor. Las lutitas son de color verde oscuro a negro, muy fisurables e intemperizan a color pardo amarillento, mientras que las calizas intemperizan a gris claro. A esta formación se le asigna una edad de Cenomaniano-Turoniano y su espesor es de aproximadamente de 575 m (Hintze Arenas. 1988).

ERA	PERIODO	PISO	COLUMNA	FORMACIÓN	Ma	
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO		Qho al/Qho eo	0.01	
		PLEISTOCENO			1.68	
	TERCIARIO	PLIOCENO			5.1	
		MIOCENO			24.0	
		OLIGOCENO			36.0	
		EOCENO			Intrusivos ácidos	55.0
		PALEOCENO			67.0	
MESOZOICO	CRETACICO	MAASTRICHTIANO			71.5	
		CAMPANIANO			83.0	
		SANTONIANO			86.0	
		CONIACIANO			89.0	
		TURONIANO		Cz/Lu	Indidura	91.0
		CENOMANIANO				97.5
		ALBIANO				108.5
		APTIANO				115.0
BARREMIANO	124.0					
HAUTERIVIANO	130.0					

En el área de la Mina Sabinas, se identifican las formaciones Cuesta del Cura del Cretácico inferior e Indidura del Cretácico superior; así como un conjunto de rocas volcánicas del Terciario y un paquete de sedimentos aluviales del Cuaternario (Cuevas, 1980).

Figura 5.1 Columna Estratigráfica. Fuente Minera Sabinas.

5.2 Rocas Ígneas.

Intrusivas.

Entre las rocas ígneas en el área, la más importante es un tronco que conforma el Cerro de la Gloria, al cual está asociado el yacimiento de San Martín/Sabinas, este cuerpo intrusiona a la caliza Cuesta del Cura. Su manifestación superficial se asemeja a una elipse alargada con diámetro en su eje mayor de 2 Km y en su eje menor de 1.5 Km; su composición varía de granito a cuarzo monzonita de biotita + hornblenda y piroxeno. Usando el método K-Ar (Rubin & Kyle, 1988; en Maldonado Espinoza, et, al) determinaron que las biotitas tienen una edad de 46.2 ± 1 M.a. (Eoceno Medio); el "stock" presenta igualmente variaciones texturales que va de equigranular a inequigranular porfídica; alrededor del intrusivo se extiende una aureola de metamorfismo de contacto que convirtió a las calizas en un skarn con su mayor manifestación hacia el poniente del Cerro La Gloria (Figura 5.2).

Extrusivas.

Sobre las formaciones sedimentarias Cuesta del Cura e Indidura se tiene en discordancia erosiva, una secuencia de derrames riolíticos, mejor expuestos en el Cerro Prieto y con espesores de 250 a 300 m, cubriendo una superficie aproximada de 4 Km². Estos derrames fueron fechados en 44.1 ± 0.9 M.a; dos millones de años después del emplazamiento del tronco intrusivo que originó la mineralización (Hintze Arenas, 1986).

5.3 Rocas Metamórficas.

Producto de la intrusión del tronco granítico-cuarzo monzonítico, se generó una aureola metamórfica en el contacto con la caliza Cuesta del Cura. Debido a que la intrusión fue con un echado de 60°, la generación de skarn se desarrolló más ampliamente hacia el alto del intrusivo (hacia el poniente) alcanzando hasta 1 Km de longitud, mientras que en el extremo opuesto alcanza sólo unos cuantos metros (Figura 5.2). Esta aureola consiste en calizas fuertemente silicificadas, silicatadas y recristalizadas, presentándose como un skarn de granates.

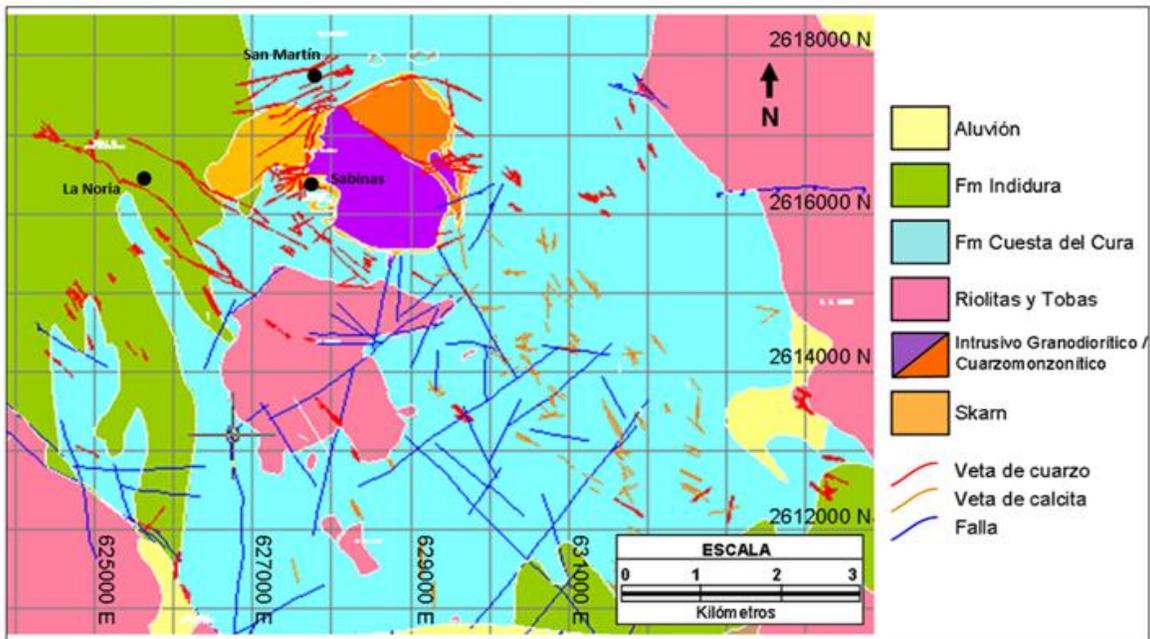


Figura 5.2 Geología Local del Distrito Minero Sabinas-San Martín. Fuente Minera Sabinas.

5.4 Geología Estructural.

El modelo tectónico-estructural del Distrito Sabinas-San Martín, sugiere que las fallas que controlaron el emplazamiento de los intrusivos están fuertemente relacionadas con la mineralización. Las fallas son de tipo inverso con desplazamiento lateral. Estos lineamientos son considerando junto con la geología subterránea, en los programas de barrenación desde interior mina y superficie, además de la geología, superficial, rumbos y echados de vetas y estructuras principales levantadas en superficie, y que se puede ejemplificar con el modelo propuesto por el Dr. Tony Starling (Telluris Consulting, 1997), en las siguientes figuras 5.3 y 5.4.

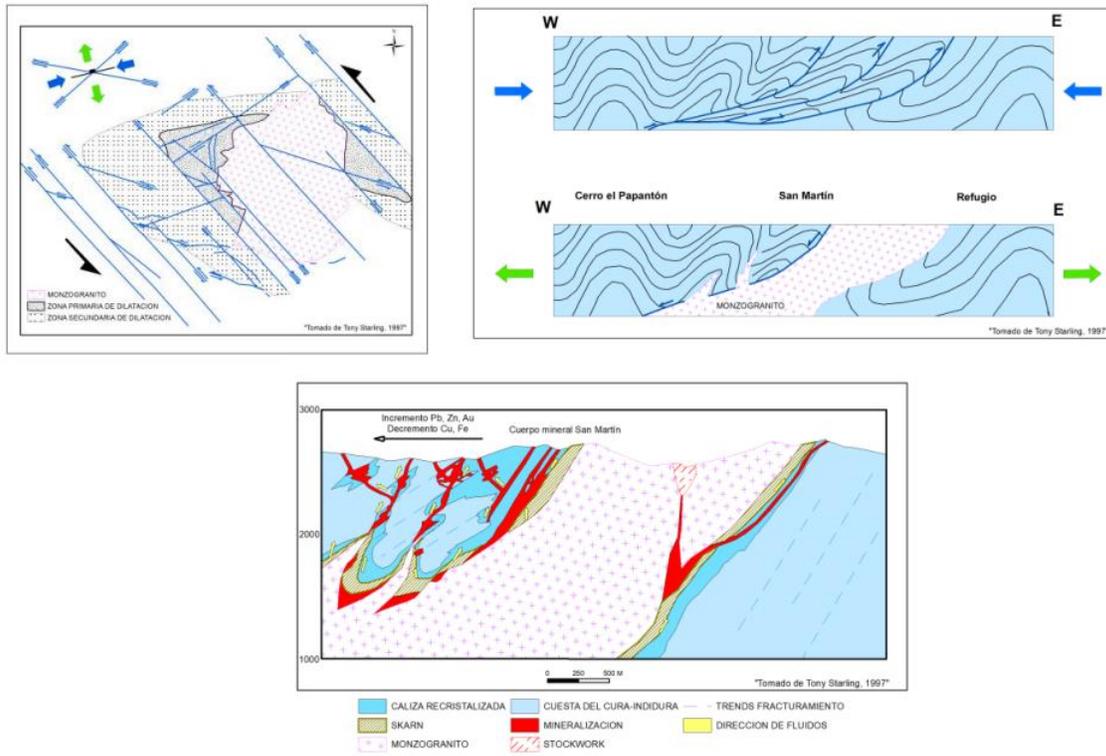


Figura 5.3 Modelo conceptual del emplazamiento del Stock La Gloria (Starling, 1997).

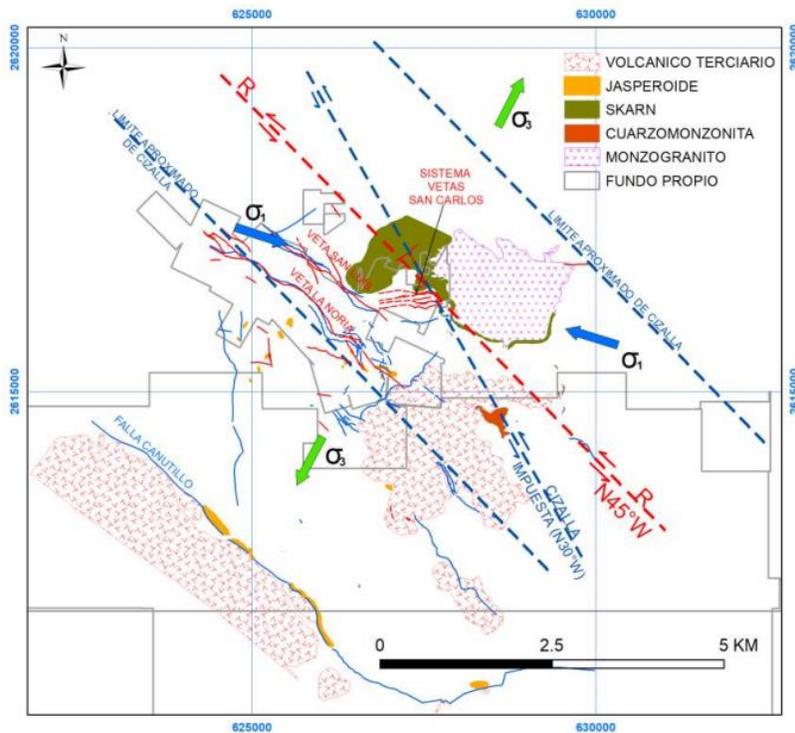


Figura 5.4 Control estructural del modelo conceptual del emplazamiento del Stock La Gloria (Starling, 1997).

5.5 Yacimiento de Sabinas.

El depósito tipo Skarn de Minera Sabinas se considera un yacimiento asociado a sistemas magmáticos someros emplazados en rocas carbonatadas.

Su formación está relacionada al ascenso de fluidos magmáticos de baja temperatura, con el cuerpo plutónico profundo en proceso de enfriamiento y transferencia de masa y calor. Se estima que la temperatura de formación fue mayor de 350° C, intervalo característico de mineralizaciones de Skarn de Zn-Cu.

El rumbo general del depósito es N-S, influenciado por un intrusivo granítico en forma de un domo, con una ligera flexión en la parte sur, donde cambia a NE 30° SW, la inclinación varía desde 30° hasta 65° al NW.

La distribución polimetálica del yacimiento se manifiesta en forma diseminada y masiva en los minerales de mena de Zinc, Cobre, Plata y Plomo; siempre están asociados a minerales ferrosos.

Hacia el poniente del yacimiento fue detectado un sistema de estructuras en forma de vetas delgadas de rumbo NW 35° SE con inclinaciones promedio de 40° al SW y constituidas por calcita-cuarzo con diseminación y bandeamiento de sulfuros (Pb, Ag, Zn). Por su paralelismo en la inclinación, su formación tiene relación muy ligada con el depósito de skarn.

En general, la característica mineralógica del yacimiento se define como una amplia zona silicificada y silicatada (skarn) principalmente de granate de la variedad grosularita-andradita con mineralización diseminada, masiva, bandeada y errática principalmente de Zinc-Cobre, y algo de Plata-Plomo.

La roca encajonante del cuerpo mineral en la parte del bajo es el intrusivo granítico (Formación Cerro La Gloria) y en la parte del alto las calizas (de las formaciones Cuesta del Cura e Indidura).

De acuerdo con estudios de microtermometría (inclusiones fluidas), el yacimiento se clasifica como Skarn Proximal sometido a condiciones de presión litostáticas y distal en vetas epitermales. Estos últimos son de intermedia y baja sulfuración, pero sometido a condiciones hidrostáticas (Sillitoe, 1993).

Como se muestra en la figura 5.5, los cuerpos mineralizados están en forma de vetas, mantos, chimeneas y diseminados (con reemplazamiento de sulfuros de Ag, Pb, Zn, Cu, Fe, Mo y As) que fueron emplazados en la aureola de metamorfismo de la intrusión granodiorítica.

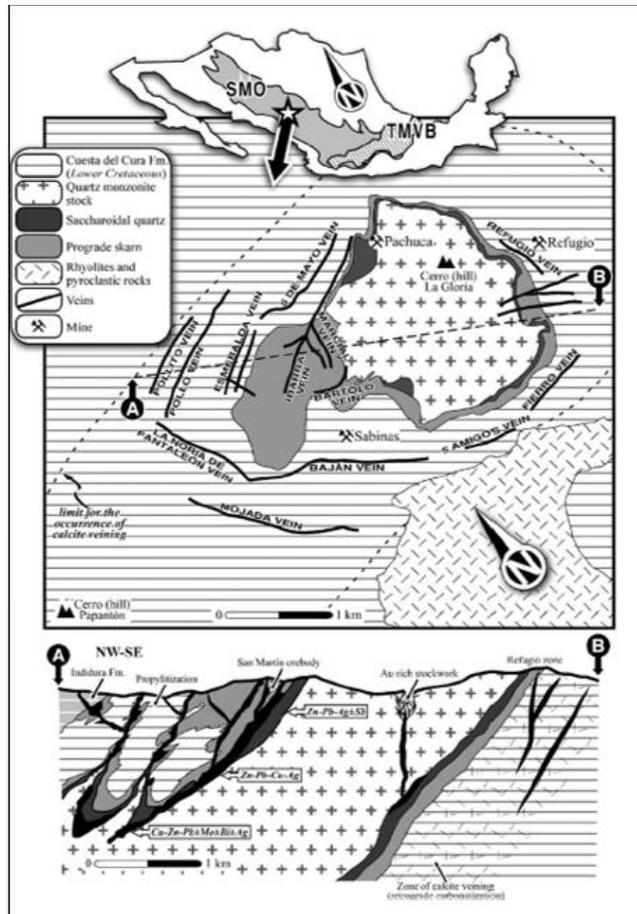


Figura 5.5 Clasificación del Yacimiento tipo Skarn de Minera Sabinas (Sillitoe, 1993).

5.6 Recursos y Reservas.

La Mina de Sabinas reinicio operaciones en el año de 1973, en 1998 es adquirida por Peñoles. A la fecha se han extraído 26.96 millones de toneladas de mineral con leyes de 117 gr/ton de Ag, 0.99 % de Pb, 2.58 % de Zn y 0.69 % de Cu.

De acuerdo a la estimación del año 2021 (Reporte Interno), Minera Sabinas tienen un total de 55.4 millones de toneladas de Recursos minerales, con leyes de Ag 112 gr/ton, Pb 1.17 %, Zn 1.78 % y Cu 0.35% y 18.12 millones de toneladas de reservas, con leyes de Ag 90 gr, Pb 1.08 %, Zn 1.70 % y Cu 0.30 % por tonelada, de este tonelaje 14.7 millones de toneladas son reservas probadas con leyes de Ag 91 gr/ton, Pb 1.01%, Zn 1.65 % y Cu 0.32 % y en reservas probables 3.33 millones de toneladas, con leyes de Ag 87 gr/ton, Pb 1.35 % Zn 1.94 % y Cu 0.22 %.

6. Metodología.

El presente trabajo incluyó principalmente el análisis de la mina y eventualmente muestras de superficie para efectos comparativos, las cuales se enviaron a laboratorio para ser estudiadas utilizando diferentes métodos de ensaye.

6.1 Ubicación de las Muestras.

En total se obtuvieron 64 muestras tomadas en las diferentes obras mineras como frentes, rebajes, cruceros y rampas, las cuales fueron ubicadas espacialmente utilizando el sistema de coordenadas local que utiliza la Mina de Sabinas, (Tabla 6.1). Para este trabajo, únicamente se ubicaron las muestras tomadas en mina, ya que aquellas tomadas en superficie son pocas, no cuentan con información topográfica suficiente y solo se usaron para fines comparativos (Figuras 6.1 y 6.2).

Muestras Analizadas para el Yacimiento de Sabinas																							
Coordenadas				Coordenadas				Coordenadas				Coordenadas											
No. Muestra	Tipo Roca	Nivel	Lugar	X	Y	No. Muestra	Tipo Roca	Nivel	Lugar	X	Y	No. Muestra	Tipo Roca	Nivel	Lugar	X	Y	No. Muestra	Tipo Roca	Nivel	Lugar	X	Y
SAB-1	Dike	400	40-365	4254	3690	SAB-17	Intrusivo	640	64-375	4253.9	3740.7	SAB-33	Caliza	520	52-375			SAB-49	Veta	520	52-335	4258.8	3640.1
SAB-2	Intrusivo	400	40-365	4257	3688	SAB-18	Dike	890	XC SL	4288.7	3699.4	SAB-34	Manto	520	52-375			SAB-50	Skarn-Sulfuros	590	59-370	S/D	S/D
SAB-3	Intrusivo	590	59-370	4163	3743	SAB-19	Dike	740	74-410	3975.4	4126.6	SAB-35	Sulfuros	890	89-380			SAB-51	Skarn	800	80-390	4025.9	3897
SAB-4	Intrusivo	890	89-380	3910	3833	SAB-20	Sulfuros	690	69-370	4117.4	3796.9	SAB-36	Dike	890	Rampa Norte			SAB-52	Arenisca	Superficie	La Noria	S/D	S/D
SAB-5	Intrusivo	740	74-380	3987	3830	SAB-21	Caliza	600	60-375	4264.8	3624.7	SAB-37	Manto	650	65-375			SAB-53	Caliza	650	65-375	4284.2	3550.8
SAB-6	Intrusivo	810	81-370	3899	3745	SAB-22	Caliza	810	81-370	3957	3677.5	SAB-38	Skarn-Sulfuros	690	69-410			SAB-54	Caliza	650	65-375	4284.2	3550.8
SAB-7	Dike	570	57-375	4229	3748	SAB-23	Caliza	450	45-355	3999.3	3818.6	SAB-39	Veta	520	52-335			SAB-55	Veta	520	52-335	4288.3	3605.4
SAB-8	Intrusivo	890	XC SL	3965	3706	SAB-24	Skarn	740	74-380	3956.3	3800.1	SAB-40	Skarn	810	81-370			SAB-56	Dike	820	820	4211.1	3702.1
SAB-9	Manto	570	57-375	4291	3675	SAB-25	Skarn-Sulfuros	710	71	4109.4	3796.9	SAB-41	Caliza	400	40-365			SAB-57	Caliza	620	62-375	4231.1	3638.8
SAB-10	Dike	810	81-370	3813	3736	SAB-26	Veta	600	60-375	4270.3	3633	SAB-42	Skarn	650	XC SL			SAB-58	Skarn	620	620	4231.1	3638.8
SAB-11	Manto	560	56-370	4093	3666	SAB-27	Skarn-Sulfuros	740	74-410	3991	4116.5	SAB-43	Caliza	650	65-375			SAB-59	Arenisca	Superficie	La Noria	S/D	S/D
SAB-12	Dike	890	89-380	3903	3860	SAB-28	Veta	450	45-355	2936.6	3894.6	SAB-44	Caliza	650	XC SL			SAB-60	Caliza	650	65-375	4284.2	3550.8
SAB-13	Dike	560	56-370	4159	3707	SAB-29	Caliza	640	64-375	4383.1	3714	SAB-45	Veta	450	45-355			SAB-61	Caliza	520	820	4213.1	3702.1
SAB-14	Intrusivo	800	80-390	4007	3903	SAB-30	Veta	640	64-375	4309.4	3685.6	SAB-46	Caliza	800	80-390			SAB-62	Caliza	620	62-375	4231.1	3638.8
SAB-15	Intrusivo	690	69-370	4185	3800	SAB-31	Caliza	520	52-335	4300.4	3592.3	SAB-47	Manto	650	XC SL			SAB-63	Veta	Superficie	La Noria	S/D	S/D
SAB-16	Intrusivo	690	69-371	4136	3792	SAB-32	Sulfuros	700	70-430	4072.1	4327.1	SAB-48	Manto	520	52-375			SAB-64	Skarn	650	Sabinas 2	S/D	S/D

Tabla 6.1 Listado con el total de muestra tomadas en Mina y Superficie.

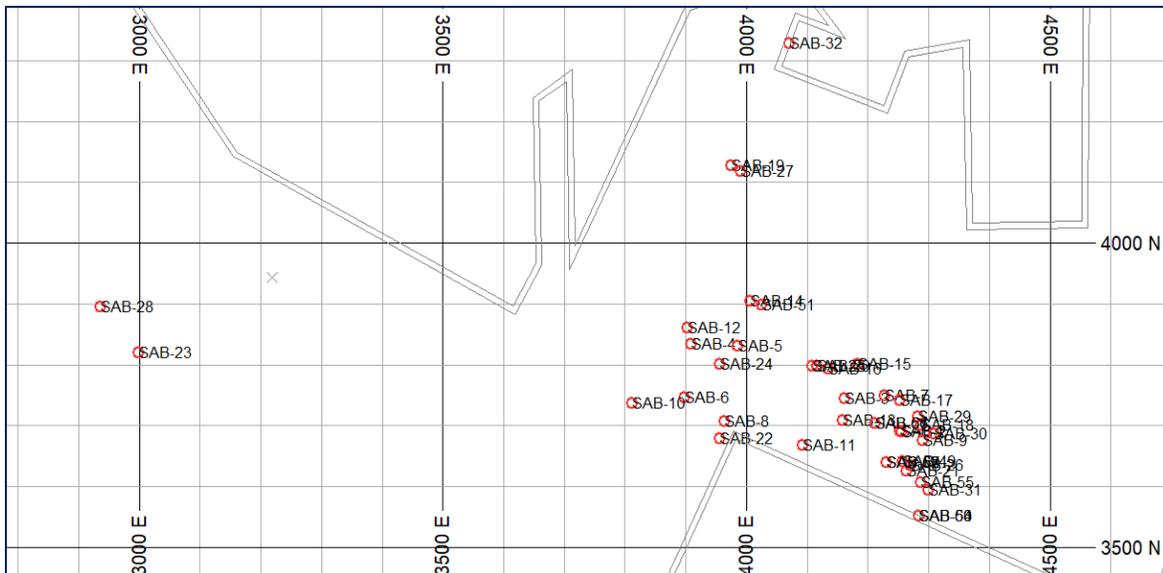


Figura 6.1 Planta con ubicación de las muestras dentro de los fondos mineros.

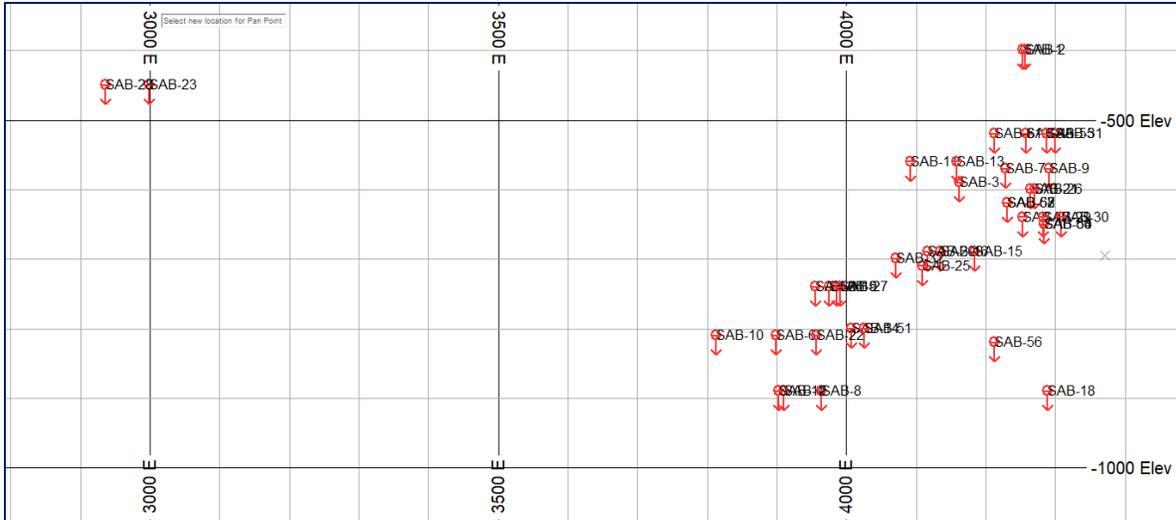


Figura 6.2 Sección longitudinal con ubicación de las muestras en interior mina.

6.2 Preparación y Análisis.

De las 64 muestras de campo, se elaboraron 46 Láminas delgadas, 22 secciones pulidas para realizar la microscopía óptica por luz transmitida (MOP-LT) y luz reflejada (MOP-LR); 10 preparaciones para difracción de Rayos X (DRX), 10 para la microscopía electrónica de barrido (MEB) y 9 preparaciones para análisis geoquímico por elementos mayores, trazas y tierras raras por ICP-OAE. Metodológicamente, se realizó la descripción megascópica y estereoscópica de las muestras; se realizó la microscopía óptica; posteriormente se realizó la DRX y la MEB, para tratar de establecer la correlación entre variables y la interdependencia de los contenidos en las muestras (Tabla 6.2).

Muestras Analizadas para el Yacimiento de Sabinas																								
No. Muestra	LD	SP	DRX	MEB	No. Muestra	LD	SP	DRX	MEB	No. Muestra	LD	SP	DRX	MEB	No. Muestra	LD	SP	DRX	MEB					
SAB-1	X				SAB-17	X				SAB-33					SAB-49	X			X					
SAB-2		X			SAB-18	X				SAB-34		X			SAB-50	X								
SAB-3		X			SAB-19	XX				SAB-35		X		X	SAB-51									
SAB-4	X				SAB-20	X	X		X	SAB-36	X				SAB-52									
SAB-5	X				SAB-21	X				SAB-37		X		X	SAB-53	X								
SAB-6	X				SAB-22	X	X			SAB-38			X	X	SAB-54									
SAB-7	X				SAB-23					SAB-39			X	X	SAB-55		X							
SAB-8	X				SAB-24	X	X	X		SAB-40	X	X			SAB-56	X								
SAB-9	X	X			SAB-25	X	X	X	X	SAB-41	X				SAB-57	X	X							
SAB-10		XX	X	X	SAB-26					SAB-42	X	X	X	X	SAB-58	XX								
SAB-11		X			SAB-27	X		X		SAB-43	X				SAB-59	X								
SAB-12	X				SAB-28	X				SAB-44	X				SAB-60	X								
SAB-13	X				SAB-29	X				SAB-45					SAB-61	X								
SAB-14	X				SAB-30		X		X	SAB-46	X				SAB-62									
SAB-15	X				SAB-31	X				SAB-47	X	X	X	X	SAB-63	X								
SAB-16	X	X			SAB-32	X	X	X		SAB-48		X			SAB-64	X								
Subtotal	12	7	1	1	Subtotal	14	6	4	3	Subtotal	8	7	4	6	Subtotal	12	2	1	0					
																Total	46	22	10	10				

Tabla 6.2 Tabla mostrando el tipo de preparación y análisis realizados a las muestras.

7. Caracterización Roca Encajonante.

La roca encajonante o huésped del yacimiento mineral de Sabinas, se caracteriza por ser una secuencia rítmica de estratos skarnitizados, variando su composición original, que va desde skarn cálcico hasta delgados pseudostratos de Hornfels pelítico - detrítico, con delgadas intercalaciones de pedernal blanco o negro. La zona del skarn cálcico se conforman de granate, actinolita-tremolita, wollastonita y en menor proporción hedenbergita, mientras que los niveles hornfésicos, totalmente transformados se encuentran compuestos por un reemplazamiento parcial de fragmentos y/o por una fina masa cálcica de grano muy fino o bien por niveles de arcillas y materia orgánica. En estos últimos se hace más evidente la foliación y pseudoestratificación con calcitización y silicificación generalizada en la roca encajonante (Figuras 7.1 y 7.2).

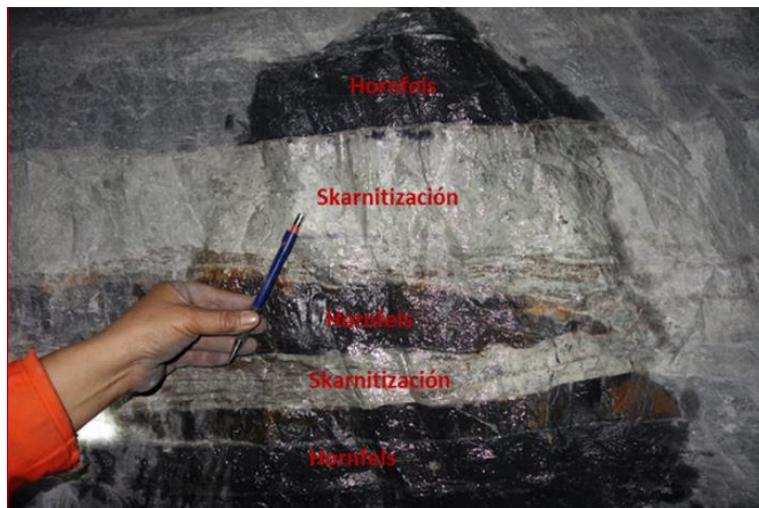


Figura 7.1 Secuencia de estratos skarnitizados presente en el yacimiento mineral de Sabinas.



Figura 7.2 Intercalación de hornfels y pedernal en la roca encajonante del yacimiento de Sabinas.

7.1 Niveles Hornfelsicos.

Los niveles hornfésicos se caracterizan por una variabilidad en mineralogía que va de calcita de grano muy fino a fino, con algunas delgadas intercalaciones de actinolita (muestra SAB-025) (Figuras 7.3 y 7.4). En otras ocasiones se aprecia una fina ritmicidad de niveles de pedernal intercalados con delgadas bandas de textura sacaroide (que son el reflejo de la afinidad detrítica del protolito), siempre hay presencia de sericita, (muestra SAB-26). En estos niveles se observa una foliación paralela a la estratificación que deja oquedades de forma sigmoidal rellenas de calcita de grano medio que presenta típicos puntos triples, en las vetillas y matrices se encuentra calcita, (caracterizada por DRX), (Figuras 7.5 y 7.6), algunas veces se presenta dolomita.



Figura 7.3 Muestra SAB-025 con presencia de actinolita, epidota, piritita, calcopirita, bornita y plata nativa en hábito dendrítico alojado en las pequeñas fracturas.

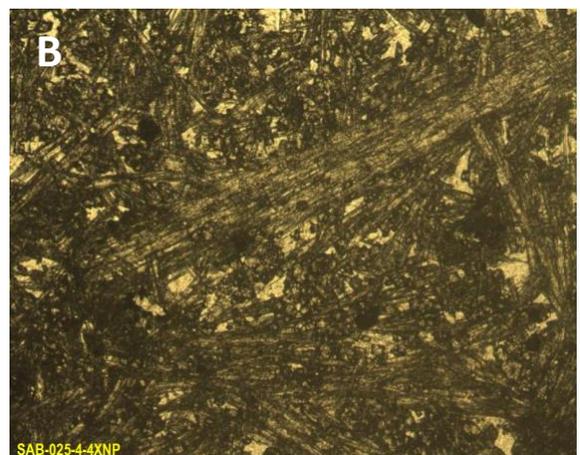
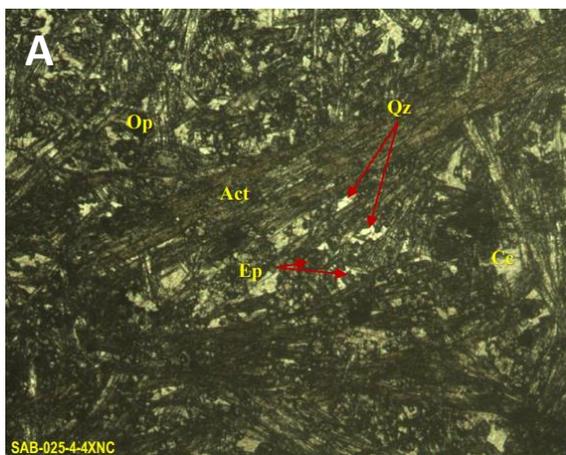


Figura 7.4 Fotomicrografías de Muestra SAB-025. A) Mostrando actinolita (Act) acicular con intersticios rellenos de cuarzo (Qz), epidota (Ep) y minerales opacos (Op), tomada con microscopio de polarización, luz transmitida con falso color para el realce de minerales y nicoles cruzados; B) tomada al microscopio óptico de polarización, luz transmitida con falso color para el realce de minerales, nicoles paralelos.



Figura 7.5 Muestra SAB-26 Caliza-Arenisca y Pedernal de color gris oscuro a negro Calcitizada, remarcando la ritmicidad del depósito a niveles milimétricos.

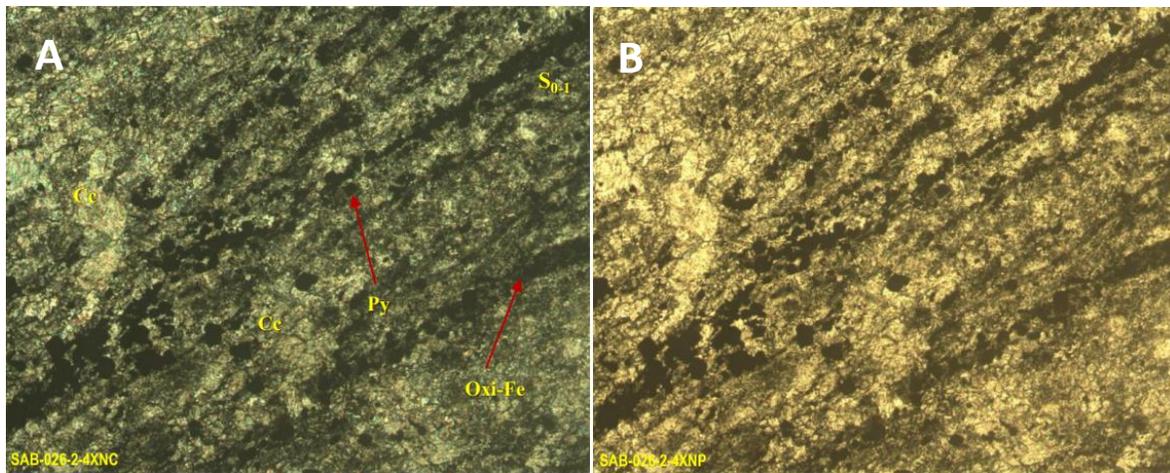


Figura 7.6 Fotomicrografías de Muestra SAB-026. A) mostrando estructura fisil remarcando la foliación (S0-1), con planos rellenos de óxidos de hierro (Oxi-Fe) y minerales metálicos de morfología euhedral, pirita (Py) asociada. La muestra está compuesta de calcita (Cc), tomada al microscopio de polarización, luz transmitida con falso color para el realce de minerales y nicoles cruzados; B) mostrando en otro juego de luz el campo de la anterior, tomada al microscopio óptico de polarización, luz transmitida con falso color para el realce de minerales y nicoles paralelos.

La ritmicidad de diferentes composiciones van variando hacia niveles pelíticos remarcados por presencia de materia orgánica y óxidos de hierro (muestra SAB-33). En estos niveles, conforme aumenta la materia orgánica aumenta el desarrollo de óxidos (escasa pirita euهدral) y en ocasiones este ambiente anóxico está relacionado al alto desarrollo de sulfuros de hierro que preferencialmente son pirrotita asociada a magnetita, la cual está relacionada como captador de parte de la mineralización económica del yacimiento (argentífera). Esta textura se puede apreciar perfectamente en la muestra SAB-030, donde se observan capas milimétricas asociadas de pedernal y hornfels (Figuras 7.7 y 7.8).



Figura 7.7 Muestra SAB-033, Megascópicamente se observa una intercalación de niveles altamente arcillosos, intercalados con hornfels.

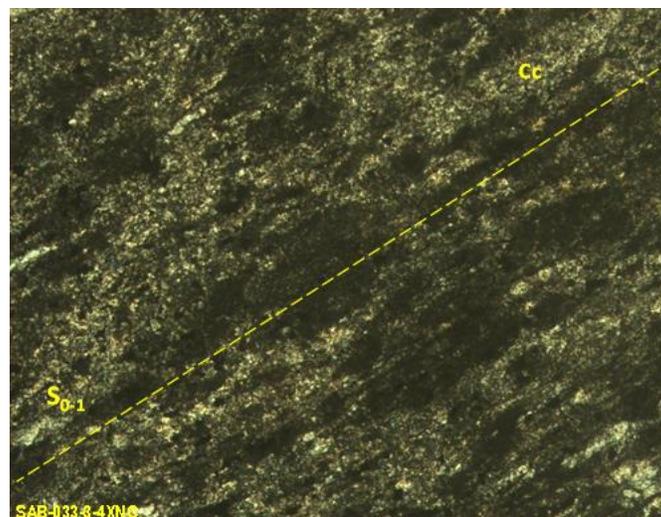


Figura 7.8 Muestra SAB-033, Microscópicamente se evidencian la fuerte presencia de materia orgánica y minerales preexistentes totalmente calcitizados, la distribución materia orgánica dispersa remarca la deformación aboudinada. Esta muestra se clasifica como un hornfels pelítico calcitizado.

Dentro de los niveles hornofélsicos, aún se logran distinguir algunos relictos de microfósiles, que por sus rasgos de esfericidad y remarque de caparazón deben corresponder a radiolarios, así como algunos fragmentos de fósiles de mayores dimensiones (muestra SAB-052a); en algunas de las muestras se reconocen rasgos de globotruncana con rango de edad del Albiano-Cenomaniano, lo que es evidencia de la variación de la energía en la cuenca.

En superficie, fuera del yacimiento y hacia la zona del Cerro Papantón, aflora una arenisca, la cual megascópicamente, se le observan líticos arcillosos (Figura 7.9) y al microscopio, se aprecian algunos fantasmas de dichos líticos, sin embargo, la matriz es cálcica y alberga microfósiles donde se notan algunos rasgos también de globotruncana (Figura 7.10).

La clasificación de esta litología tiene dos posibilidades, dado que no se puede definir si la matriz cálcica es primaria o por metasomatismo, como metacalcarenita, o como metarenisca calcitizada. Es relevante destacar que no se encontró un contacto directo entre la litología de superficie de Cerro Papantón y la secuencia skarnoide de mina.



Figura 7.9 Muestra SAB-052A de superficie, falda del Cerro Papantón. Roca masiva y compacta de color gris oscuro a pardo, bandeada con una evidente diferenciación granulométrica de grano medio a fino y con una estructura microbrechoide compuesta de abundantes fragmentos de pelíticos y otros relictos que se encuentran totalmente calcitizados, dentro de los cuales se reconoce plagioclasa.

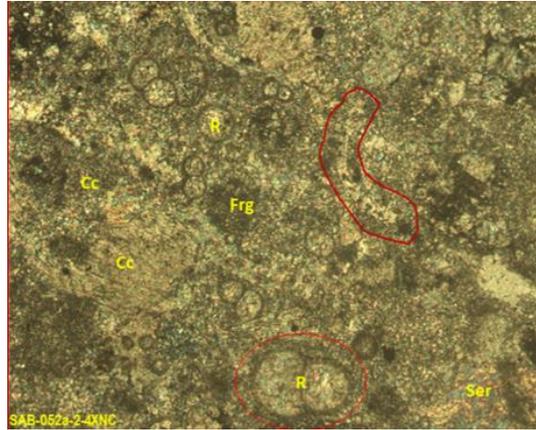


Figura 7.10 Muestra SAB-052A Microscópicamente el cementante de la muestra presenta abundantes radiolarios, con desarrollo de fino vetilleo relleno de calcita y microdrusas rellenas de calcita con algunos puntos de limonita. La roca se clasifica como una arenisca fuertemente calcitizada, no se observan rasgos de metamorfismo ni recristalización por el mismo efecto.

La definición de la mineralogía primaria está enmascarada ya que todo el sistema litológico tiene minerales de neoformación producto del metamorfismo de contacto y metasomatismo asociado, además de estar totalmente calcitizado, con una silicificación superpuesta, claramente observable la presencia de actinolita-tremolita reemplazada. La sericita siempre está presente y, en menor proporción clorita y escasa epidota en los niveles hornfésicos.

La definición del bandeamiento está dada por la variación transicional, pero arrítmica de la granulometría, de contenido de arcillas y materia orgánica; aunque en términos globales la mineralogía primaria es de grano fino. Por los rasgos observados, esta secuencia se clasifica como hornfels cálcico-pelítico. Es importante destacar que el estudio por Difracción de Rayos X (XRD) dio una tendencia a la presencia de calcita hasta llegar a formar dolomita. Los niveles hornfésicos cuando contienen abundante materia orgánica y arcillas, revisten una gran importancia, ya que estos son reemplazados por pirrotita y ésta, a su vez determina un importante metalotecto para el depósito de plata en variadas fases mineralógicas, las cuales se describen detalladamente en el capítulo de la caracterización elemental por MEB.

En las figuras 7.11 a 7.22 se muestran los diferentes niveles bandeados hornfésicos, de pedernal y de textura arenosa que conforman la litología dentro del yacimiento. Las descripciones de campo van desde pequeños niveles hornfésicos bandeados con pedernal, a bandas totalmente silicificadas; reemplazamientos del hornfels por pirrotita donde se aprecian algunas pequeñas bandas de pedernal negro a gris claro intercaladas; así mismo, se observan oquedades rellenas de calcita perfectamente cristalizada; texturas bandeadas remarcadas por materia orgánica asociadas a óxidos de fierro, reemplazamiento de calcita y escasa pirita diseminada; presencia de materia orgánica y óxidos que remarcan una foliación con rasgos sigmoidales, así como microfósiles totalmente calcitizados.

En lo referente a los carbonatos, la influencia del magnesio es muy importante dado que la DRX detectó desde calcita magnésica hasta dolomita.

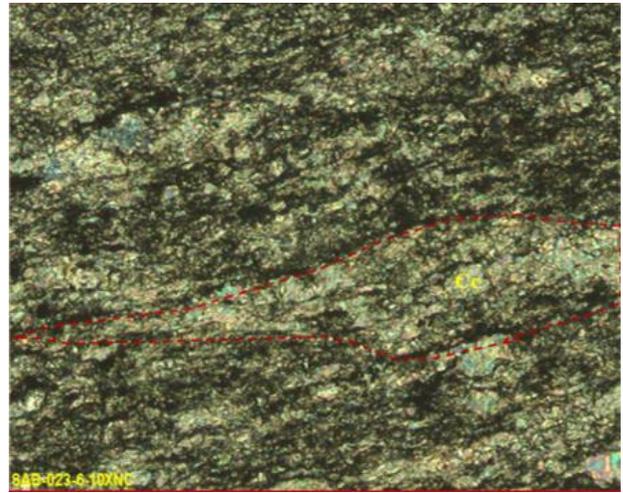


Figura 7.11 Muestra SAB-023 de roca compacta de color gris oscuro a negro, presenta una textura de grano muy fino, foliada, compuesta fundamentalmente por calcita y menor sericita. Donde se observan en parte como fragmentos de calcita/sericita, se definen sigmoides rellenos de calcita recristalizada (marmorización), este nivel evidencia la presencia de un fuerte diastrofismo tectónico por fracturamiento tipo stockwork, constituido por vetillas multidireccionales rellenas de calcita, la roca actualmente es clasificada como un hornfels con presencia de materia orgánica que remarca una foliación y que describe sigmoides.

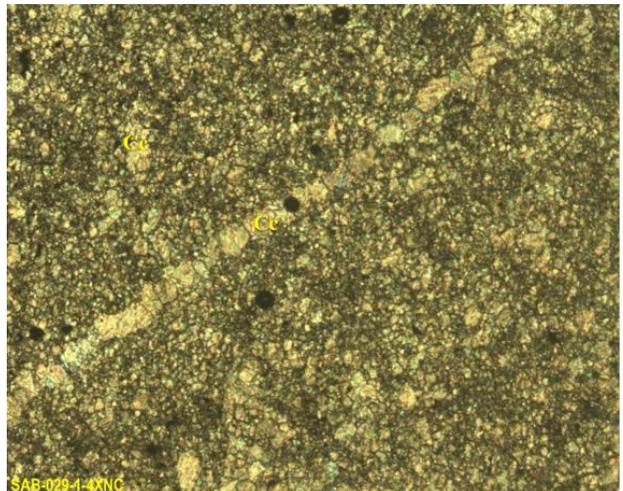
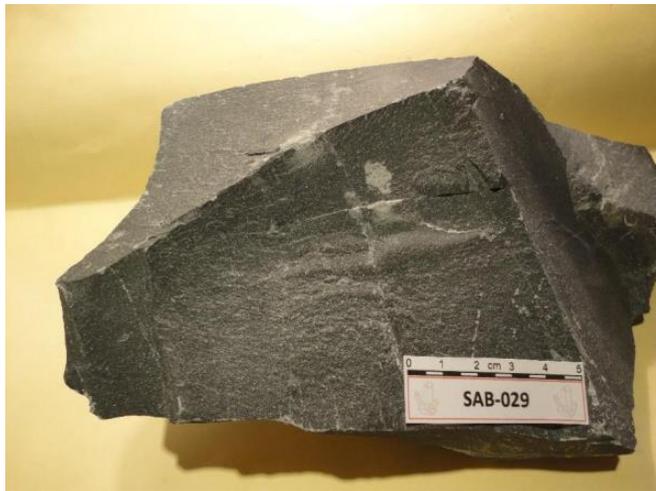


Figura 7.12 Muestra SAB-029 con textura sacaroide, de grano fino, color gris oscuro, relativamente masiva, que presenta fino fracturamiento relleno de calcita, megascópicamente reacciona en todas partes al ácido clorhídrico. Al microscopio presenta una textura de grano fino clástica, donde los pequeños cristales de calcita son cementados por calcita microlítica. A esta escala micrométrica, es clara la presencia de calcita relleno las fracturas, derivado del metamorfismo clasificándose como hornfels calcitizado, su posible protolito es calcaroarenoso.

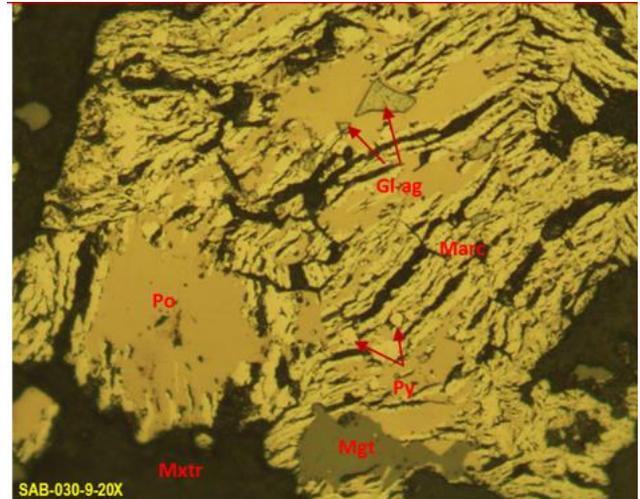


Figura 7.13 Muestra SAB-030 está constituida por horizontes bandeados de pirrotita masiva asociada a magnetita, se aprecian pequeñas bandas de pedernal de grano fino a muy fino, en ocasiones se observa una intercalación tardía de galena punta de aguja asociada a calcita más recristalizada (grano más grande) que toma la morfología bandeada. Estructuralmente algunas bandas de hornfels y el pedernal que no fueron reemplazados muestran una deformación dúctil con fracturamiento ortogonal a la pseudoestratificación. En estos niveles es importante denotar que aparecen minerales verdosos aciculares, actinolita asociada a clorita y epidota. En los planos de fracturamiento y fallamiento existen estrías donde se concentra una oxidación de Fe y/o Mn, la disposición de los minerales metálicos en estos niveles está compuesto por: magnetita con deformación dúctil que la atraviesa y que es interrumpida por pirrotita, esta última tiene una conversión a marcasita y/o pirita. Por su parte la galena se emplaza en las oquedades y zonas de debilidad tanto de la magnetita como de la pirrotita; en especial cuando se encuentra galena asociada a sulfosales de cobre y plata, que también se emplazan en las oquedades de la pirrotita. Algunas veces la galena tiene variación de su dureza, asociada a contenidos de plata en su estructura cristalina blanda entre más plata contenga. La galena se asocia a pequeñas inclusiones de sulfosales de cobre. Estos niveles reemplazados de pirrotita/magnetita, son muy importantes como metalotecto dado que son el mayor captador de minerales de plata y cobre asociados.

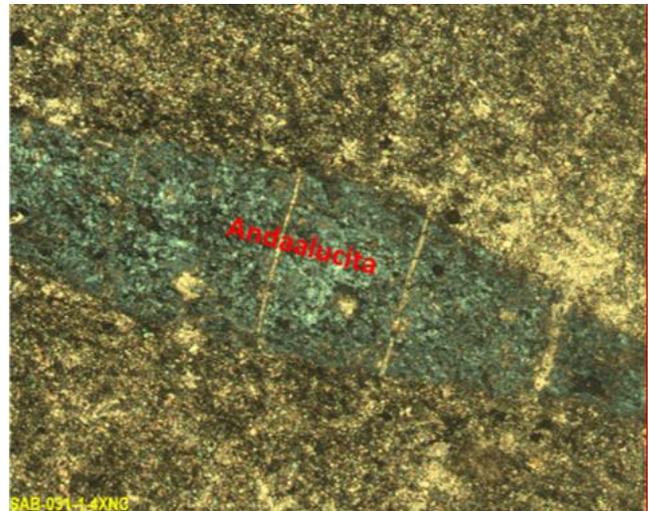


Figura 7.14 Muestra SAB-031 Roca de color gris oscuro, fuertemente cizallada. Al microscopio presenta una textura de grano muy fino, totalmente calcitizada, sin embargo, la importancia de esta muestra es que representa un nivel de alta presión y esfuerzo dúctil, denotado por excelentes cristales de andalucita y sillimanita dispersos en la muestra. Estos dos últimos se encuentran alterados a sericita. La importancia que reviste esta muestra es que evidencia que la secuencia tiene niveles ricamente pelíticos que fueron calcitizados totalmente, además de representa una zona de alto dinamismo de fallamiento compresivo. La muestra se clasifica como un hornfels de andalucita.

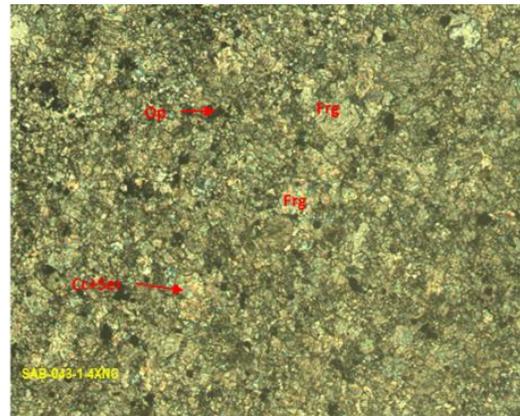


Figura 7.15 Muestra SAB-043 Roca masiva y compacta de color gris oscuro con tono verdoso, presenta una textura de grano fino sacaroide, compuesta de aparentes relictos de líticos, algunos de ellos verdosos con una matriz de calcita. Microscópicamente la muestra presenta una textura granoblástica de grano medio a muy fino de cristales angulares cálcicos, a pesar de la variación en el tamaño de los granos, no se define una gradación, sino un paleodepósito heterogéneo determinándose una zona de alta energía en esta zona el cementante es de escasa calcita mezclada con sericita y clorita, así como menor cuarzo. Se detectan algunas pseudoformas de plagioclasa/feldespato totalmente reemplazadas por calcita y sericita, así mismo se observan fragmentos de cuarzo y minerales opacos diseminados ocupando oquedades. La calcitización de la muestra es muy fuerte, así como la sericitización con menor clorita y las oquedades se observan rellenas de cuarzo. Por las características microscópicas de la muestra, ésta corresponde a un hornfels calcitizado de origen clástico, que antes de alterarse, debió corresponder a una grauvasca feldespática caracterizada por la angulosidad de sus relictos de líticos, así como mayor proporción de relictos de plagioclasa/feldespato.

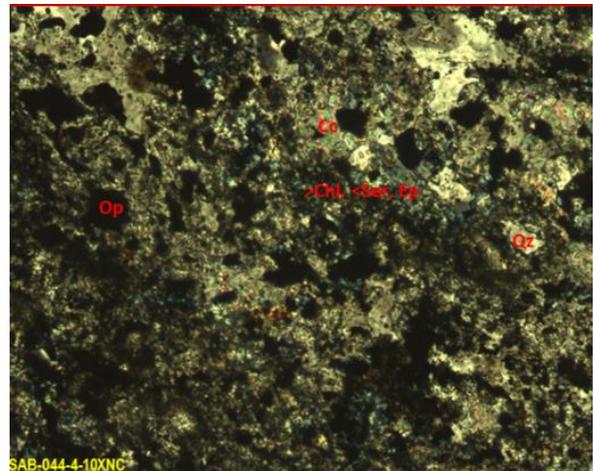


Figura 7.16 Muestra SAB-044. Megascópicamente esta roca es de color gris oscuro, de textura sacaroide de grano fino compuesta de calcita, (responde al ácido clorhídrico) al igual que el fracturamiento que presenta relleno de calcita. Al microscopio su textura es granoblástica, compuesta por elementos elongados totalmente calcitizados y alineados. La importancia que reviste esta muestra es que al microscopio se observa el contacto de cuatro pequeñas bandas, las cuales dos son pedernal y otra es de hornfels de andalucita y el contacto transicional está marcado por una gradación en la granulometría. Dichas bandas presentan un plegamiento cerrado; en los niveles más calcitizados se presenta mayor cantidad de clorita, menor sericita y epidota, las oquedades se rellenan de cuarzo. Por las características de la muestra, ésta sigue siendo un hornfels calcitizado de origen detrítico asociado a niveles reemplazados a pedernal.

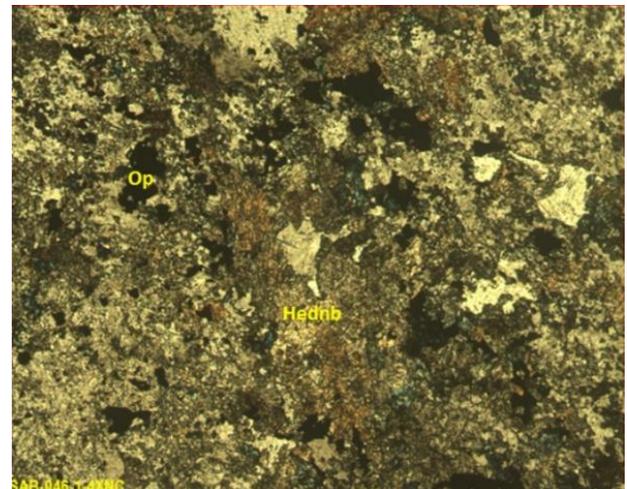


Figura 7.17 Muestra SAB-046. Esta roca representa el contacto entre el skarn, el hornfels calcitizado y el pedernal, el cual al microscopio presenta un grano microlítico, con porosidad que se rellena de calcita y sericita. También se observa un bandeamiento remarcado por dos planos de foliación rellenos de calcita y sericita ondulados, así como un fracturamiento extensivo posterior, la muestra presenta niveles de grano muy fino que corresponden a skarn, al cual se le detecta hedenbergita cloritizada, calcitizada y silicificada, también se observa menor actinolita.

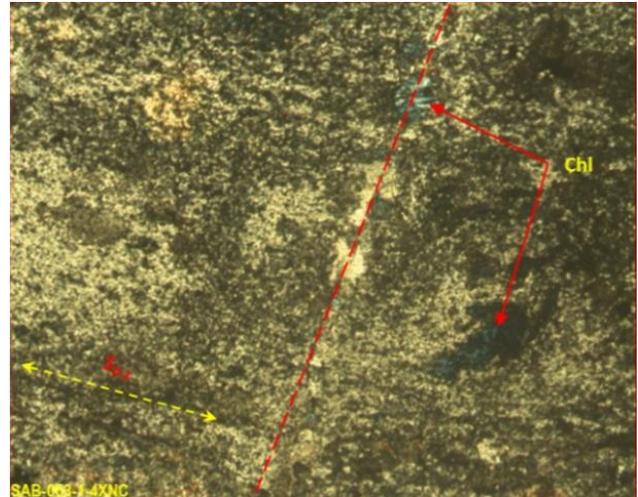


Figura 7.18 Muestra SAB-053 La roca presenta granulometría de grano muy fino, con estratos de dos colores, una parte es de color gris oscuro y la otra parte de color gris verdoso a claro. En esta parte se observaron estratos muy finos de color rosa pálido (jasperoide), que contiene sílice y óxido de fierro. La muestra presenta vetillas milimétricas perpendiculares a la estratificación rellenas de mineralización metálica de bornita, covelita y posible cuprita que atraviesan ortogonalmente al pedernal y skarn. La mineralización metálica se encuentra tanto en las vetillas y en agregados, incluye otras vetillas con cristales de calcita. La muestra corresponde en su parte blanca a un skarn cálcico. La importancia que reviste esta muestra es la presencia del hornfels y el skarn cálcico, lo que confirma que la litología en su conjunto se clasifica como un skarn cálcico selectivo.

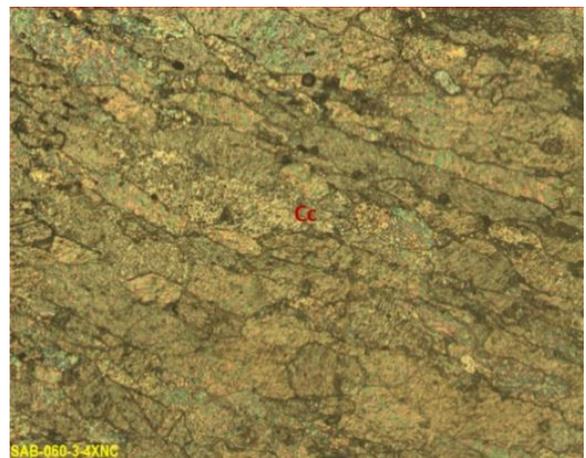


Figura 7.19 Muestra SAB-060 Roca masiva de color gris oscuro a negro con bandeamiento de hornfels, skarn y pedernal, al microscopio se observa un desarrollo de calcita elongada y alineada de grano grueso. La importancia de esta muestra es que megascópicamente es clara asociado a la existencia de una zona de cizalla frágil-dúctil. La zona es de denso fracturamiento semiparalelo ondulado y microscópicamente la muestra presenta una recrystalización de grano grueso de calcita con puntos triples asociada a algo de sericita.

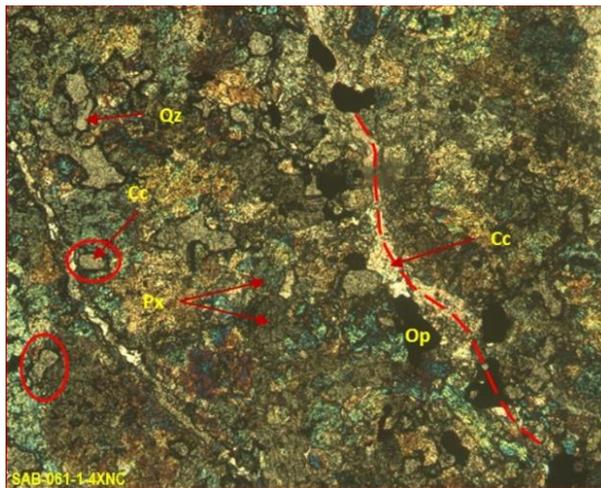


Figura 7.20 Muestra SAB-061 Esta roca representa otro bandeamiento masivo, de color gris verdoso a verde, con textura de grano muy fino, presenta plagioclasas con abundante alteración a clorita-epidota y se observan sigmoides rellenos de sílice y rencuentra bandeamiento de pirrotita, pirita, calcopirita y vetillas multidireccionales de calcita. La roca se puede clasificar como una andesita por la alteración propilítica con abundante calcitización, la muestra efervesce con HCl. Estructuralmente, desarrolla sigmoides y rasgos de movimiento por los espejos de falla. Microscópicamente, presenta textura de grano fino, altamente alterada lo que enmascara absolutamente a los minerales primarios, sin embargo, se distinguen fantasmas y relictos de plagioclasa, algunos piroxenos, (clivajes ortogonales), así como algunos anfíboles, también reconocidos por el mismo clivaje agudo/obtuso. Es importante mencionar que se observan oquedades con un halo de vidrio y con bordes redondeados, con vesículas rellenas de calcita. Existen otras oquedades angulares, intersticiales rellenas de calcita que corresponden a oquedades por el fracturamiento. Por lo que respecta al fracturamiento, este es de dos tipos, uno es típicamente compresivo que ondula la traza del fracturamiento formando sigmoides a lo largo que se rellenan de calcita; el otro fracturamiento es recto y asociado a un fracturamiento frágil extensivo, también relleno de calcita, el cual se asocia a los opacos que corresponden a pirrotita y en menor proporción pirita y calcopirita (observadas megascópicamente). La alteración de la muestra está representada por una fina masa de clorita-epidota-sericita. Esta muestra es muy importante ya que se ha correlacionado con una banda de meta andesita intercalada en hornfels con pirrotita. A pesar de que por la alteración los rasgos de la muestra se encuentran enmascarados, ésta corresponde a una roca volcánica andesítica dada la presencia de la plagioclasa y los piroxenos que por su relieve deben pertenecer al grupo de la diópsida, así como por las vesículas presentes, por su alteración y por la presencia de sigmoides, su edad pre Laramídica. La alteración, sin duda es reflejo del metamorfismo regional (que puede sin duda estar sobrepuesto a la alteración hidrotermal), por lo que se considera que es la evidencia de un metamorfismo de bajo grado en facies de esquisto verde.

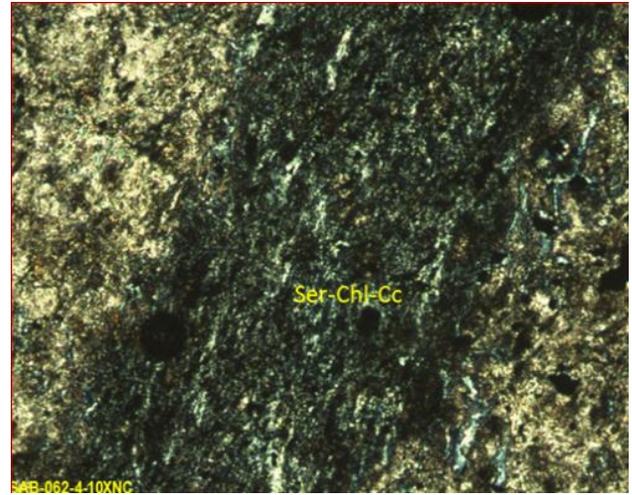


Figura 7.21 Muestra SAB-062. Roca bandeada de skarn con hornfels, donde se observan algunos pequeños niveles totalmente sericitizados y cloritizados, la muestra en general se encuentra calcitizada.



Figura 7.22 Aspecto de la secuencia en la falda del Cerro Papantón, mostrando la diferente granulometría de la secuencia arenoso-calcáreo-pelítica (al W del yacimiento y actualmente en niveles más arriba de la mina).

7.2 Niveles de Skarn Cálxico.

Estos niveles de skarn cálcico están intercalados rítmicamente con los niveles de hornfels cálcico-pelítico-detritico, se describen bajo un inciso aparte dada su evidente textura, mineralogía y su aparente relación a la mineralización, sin embargo, corresponden a la misma secuencia afectada por el metamorfismo de contacto.

Los niveles del skarn tiene sus propias variaciones dentro del bandeamiento, ya que en algunas capas se aprecia casi monomineral, como es el caso de capas exclusivamente de granate, o bien de actinolita-tremolita, epidota y en ocasiones éstos se encuentran asociados. Estas capas son de alta capacidad de clasificación ya que son de granulometría que varía de media a gruesa, en algunas ocasiones es de grano muy fino, sin embargo, en ocasiones es por los rasgos primarios a pesar de estar enmascarados, ya que la calcitización, argilización y silicificación son altas. En términos generales presenta una textura de tipo sacaroide, granoblástica de grano grueso a fino muy compacta.

El granate es de hábito prismático, euهدral, el cual se encuentra fuertemente disgregado y generalmente cementado por calcita y menor cuarzo (muestras SAB-025, SAB-027; SAB-040; SAB-047). La calcita y cuarzo están asociados a parte de la mineralización económica. El análisis del granate permite definir una alteración argílica con alto contenido de epidota.

La actinolita-tremolita, es generalmente de hábito acicular en rosetas, con típico color azulado (muestras SAB-027; SAB-025; SAB-042) lo que permite clasificarla como dominante actinolita, la tremolita es muy escasa.



Figura 7.23 Muestra SAB-027. Roca masiva de color gris blanco, con textura de grano muy fino, constituida principalmente por granate totalmente microcristalino, presenta fracturamiento relleno de calcita y puntos oscuros de mineralización y oquedades con cuarzo euهدral.

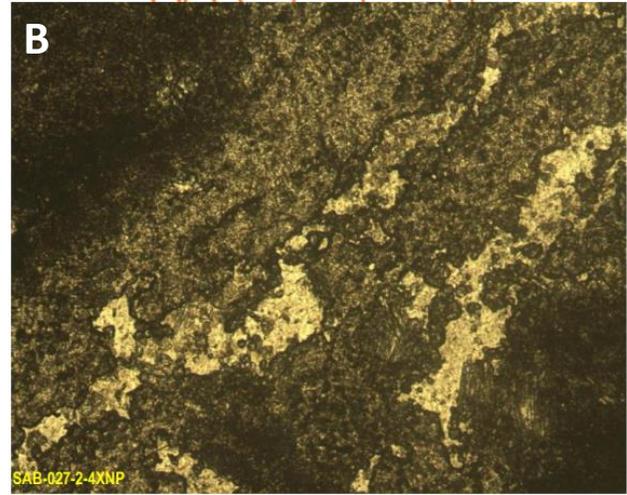
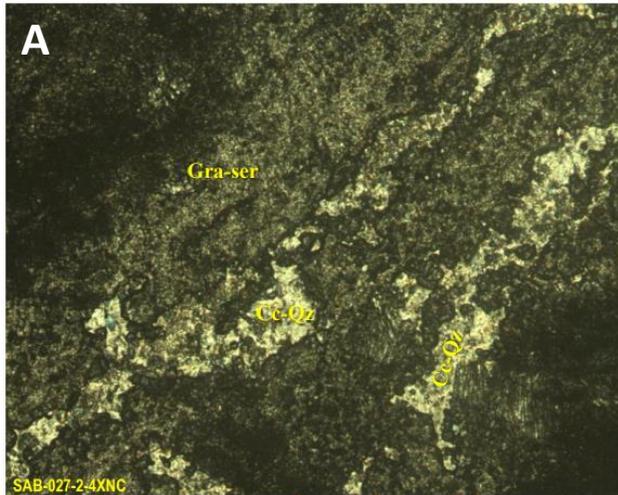


Figura 7.24 Muestra SAB-027. A) Mostrando textura de grano muy fino, compuesta por granate (Gra), presenta zonas de debilidad en planos paralelos rellenos de calcita (Cc) y cuarzo (Qz), Imagen tomada al microscopio de polarización, luz transmitida con falso color para el realce de minerales con nicoles cruzados; B) mostrando en otro campo de la anterior fotomicrografía tomada con luz transmitida con falso color para el realce de minerales y nicoles paralelos.



Figura 7.25 Muestra SAB-040. Roca de color verde a gris de textura granoblástica, de grano medio a fino, compuesta principalmente de granate andradítico de color verde aceituna, con oquedades blancas, rellenas de calcita y cuarzo y donde preferencialmente se observa puntos de calcopirita y pequeños agregados de plata nativa.

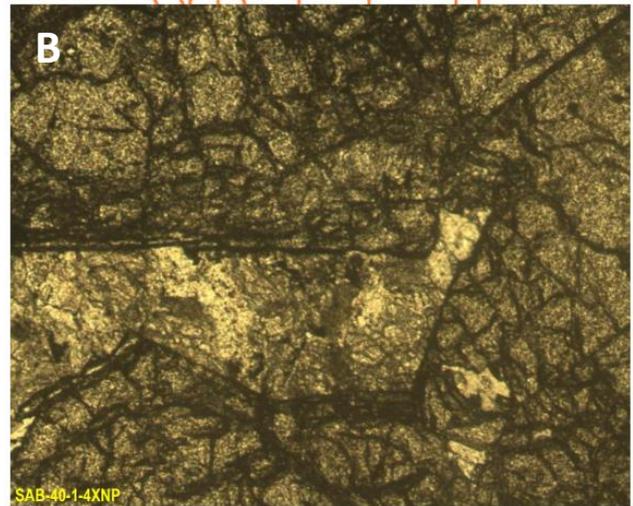
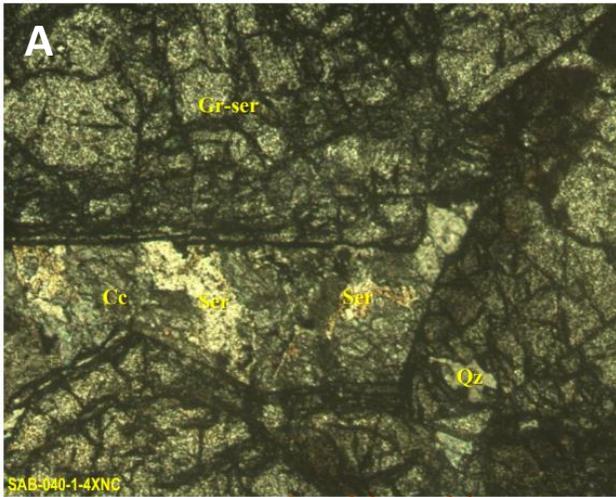


Figura 7.26 Muestra SAB-040. A) Fotomicrografía mostrando granate (Gr) euedral alterado a sericita (Ser) y fuertemente fracturado, en sus oquedades se observa el depósito de calcita (Cc), sericita y cuarzo (Qz), Tomada al microscopio de polarización, luz transmitida con falso color para el realce de minerales y nicoles cruzados; B) mostrando en campo de la anterior fotomicrografía tomada con luz transmitida, falso color para el realce de minerales con nicoles paralelos.



Figura 7.27 Muestra SAB-047 Skarn de color verde aceituna, de textura sacaroide deleznable, con grandes oquedades rellenas de calcita, menor cuarzo, calcopirita y planta nativa filiforme en microfracturas tardías.

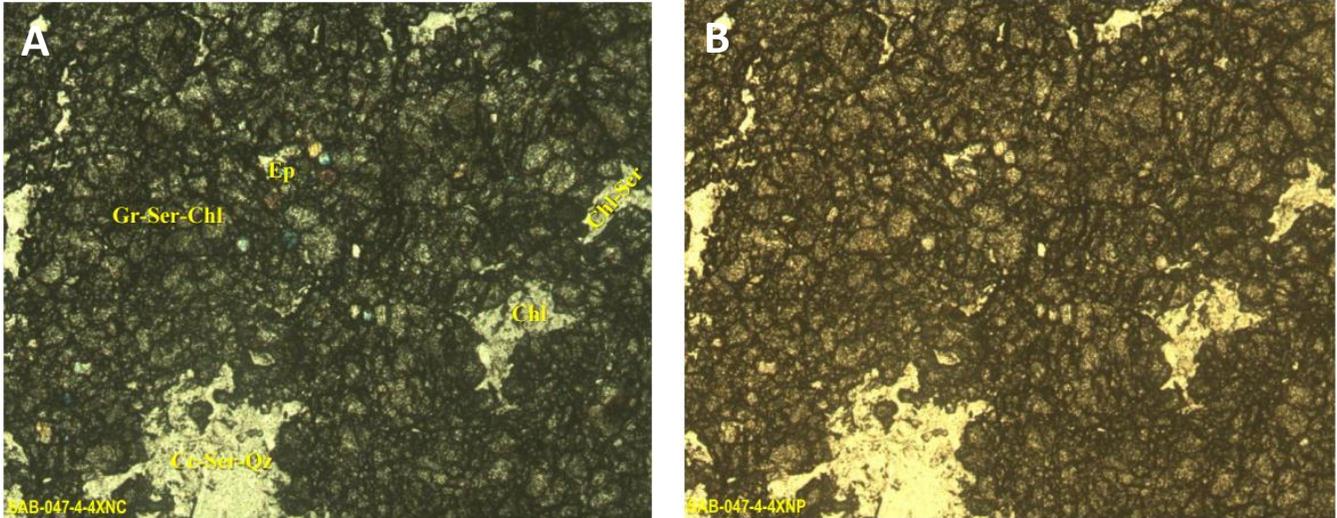


Figura 7.28 Muestra SAB-047 A) mostrando granate (Gr) alterado a sericita (Ser) y clorita (Chl) con textura granoblástica de grano fino, abundantes oquedades rellenas de fina calcita (Cc), sericita (Ser), clorita (Chl) y cuarzo (Qz) y desarrollo parcial de epidota (Ep), tomada al microscopio de polarización, luz transmitida con falso color para el realce de minerales, nicols cruzados; B) mostrando en otro juego de luz el campo de la anterior fotomicrografía, tomada con luz transmitida con falso color para el realce de minerales y nicols paralelos.

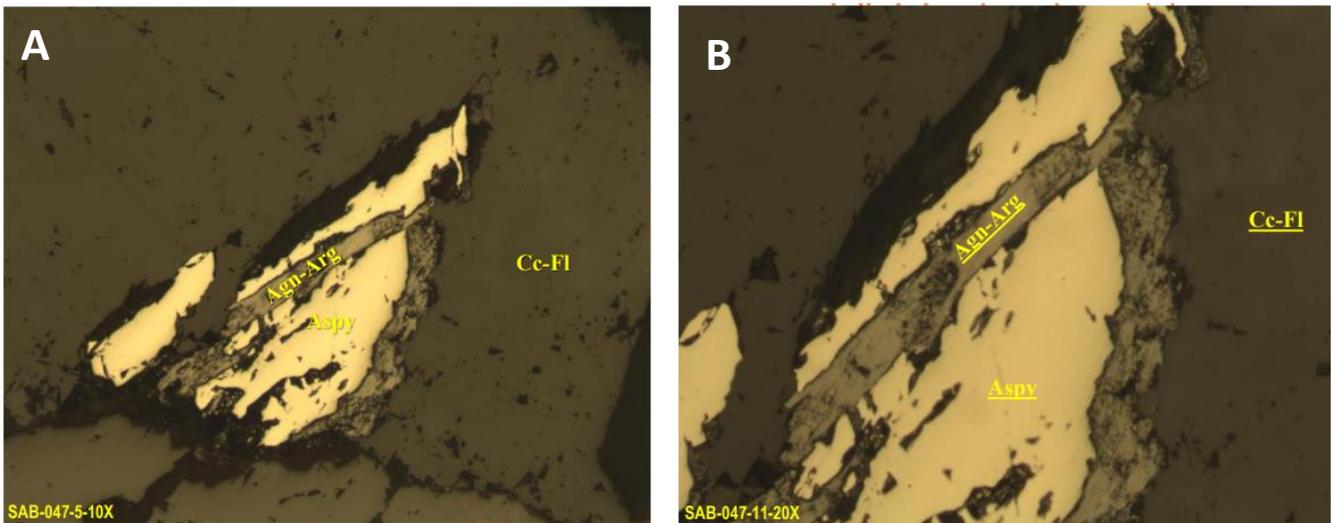


Figura 7.29 Muestra SAB-047 A) Fotomicrografía mostrando una oquedad rellena de calcita (Cc) y fluorita (FI), arsenopirita (Aspy) fracturada rellena de plata nativa (Agn) filiforme, que varía a Argentita (Arg), tomada al microscopio de polarización, luz reflejada con falso color para realce de minerales, nicols paralelos, objetivo 10x; B) mostrando un acercamiento de la fotomicrografía anterior, tomada con luz reflejada, falso color para el realce de minerales y nicols paralelos, objetivo 20x.

La hedenbergita, es generalmente de hábito tabular, en proporción es menor que la actinolita, se encuentra sericitizada y en parte cloritizada.

En términos generales, es un skarn cálcico que se restringe a los niveles originalmente calcáreos, y su espesor está en función al espesor de dichos niveles calcáreos con presencia principalmente de granate, wollastonita, actinolita, epidota. Se tiene detectadas varias paragénesis metasomáticas: granate-actinolita, granate-wollastonita, granate-wollastonita-actinolita, granate-epidota. La dislocación tectónica de la secuencia (skarn/hornfels) enmascara el zoneamiento regional del yacimiento.

Estos niveles, lógicamente son muy importantes por constituir el metalotecto de la mineralización de zinc, además de que las oquedades, sigmoides, fracturas y fallas son el conducto para el depósito de mineralización plumbo/argentífera tardía.

Finalmente, la separación entre el hornfels cálcico, hornfels pelítico no es posible dado lo transicional de la variación mineralógica, sin embargo, es claro que dicha variación mineralógica va de una litología rítmica calcárea pura que se metamorfiza a skarn cálcico hacia un hornfels calcáreo asociado a sílico-aluminatos (actinolita-tremolita) hasta llegar a un hornfels pelítico representado por las partes más físciles con mayor cantidad de arcillas remarcando sus planos de foliación por medio de óxidos de hierro.

La secuencia se puede clasificar como un depósito cíclico con variación progresiva de composición de caliza a facie detrítica y luego pelítica que se puede diferenciar por la granulometría más que por la mineralogía ya totalmente reemplazada por calcita. La observación microscópica permite constatar que la granulometría que va hacia el polo más fino esta enriquecida de aporte pelítico asociado a óxidos de hierro.

Lo anterior permite definir que la secuencia corresponde a un ambiente de cuenca de depósito tranquilo, pero con energía fluctuante, que desde el punto de vista sedimentológico corresponde a una sedimentación parcialmente catastrófica, donde los niveles de energía cinética tienen variaciones litológica, el registro de variación composicional en la secuencia es amplia.

Desde el punto de vista metalogénico, la secuencia que se encuentra afectada por un metamorfismo de contacto es reflejado por la mineralogía progradada de corte cálcico, de una ritmicidad intercalada de skarn cálcico y hornfels cálcico-detrítico-pelítico, por lo que la secuencia se clasifica como un skarn cálcico selectivo.

7.3 Texturas y Mineralogía de los Niveles de Skarn Cálxico.

En las siguientes imágenes 7.30 a 7.37 se describen observaciones y descripciones de muestras selectas, así como las evidencias que sustentan la interpretación.

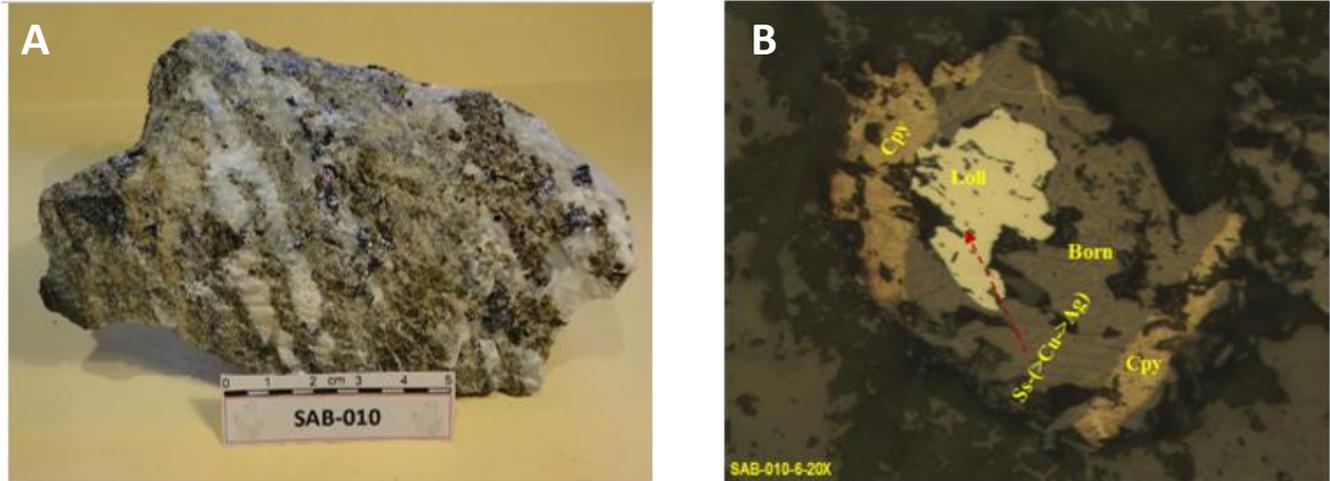


Figura 7.30 Muestra SAB-010. Descripción de Skarn de granate, A) la muestra presenta una estructura masiva bandeada de grano grueso, color verde pardo debido a la abundante presencia de granate andradítico alterado a epidota y clorita (verde más obscuro), así como sericita intercalados con niveles de calcita tardía o bien de exsolución por la compresión, con escasa presencia de barita y fluorita, así como niveles de bornita y covelita asociada, en contacto con arsenopirita de grano muy fino; B) Microscópicamente, la mineralogía metálica está compuesta fundamentalmente por bornita con halos y manchones anaranjados de idaita (determinada por MEB ya que originalmente fue clasificada como cuprita) y menor calcopirita, galena y sulfosales, con aparente bandeamiento, pero siempre en las oquedades y zonas de debilidad del granate andradítico ferrífero. Este granate varía a grosularita también ferrífero (composición determinada por DRX en varias muestras) y menor proporción de anfíbol. Tanto la bornita como la calcopirita tienen tendencia a presentar halos de covelita, digenita. En términos generales los minerales metálicos, exceptuando a la arsenopirita, se depositan solamente en fracturamiento y se observan efectos de reapertura y bandeamiento típico de relleno de cavidades. La arsenopirita es generalmente euhedral con hábito típico losangico, sin embargo, hay dos tipos una con alto grado de intercrecimiento de minerales tardíos y otra totalmente sólida quien en sus oquedades aloja calcopirita. La pirita es escasa y se encuentra embebida en la covelita. Dicha bornita es posterior al desarrollo de la arsenopirita y se aloja en las zonas de debilidad de los granates. Se observa el proceso de oxidación de la bornita y generación de sulfosales ricas en Ag dada la textura que refleja pérdida de dureza y riqueza en Cu ya que se deriva de la bornita. La calcopirita, se observa en contacto transicional con sulfosales, dentro de las cuales se reconoce tetraedrita y otras muy ricas en plata. Con respecto a las sulfosales éstas presentan una fuerte variación en su composición, lo que es denotado por las texturas, y se reflejan soluciones sólidas, aquellas que representan tetraedrita-tennantita (se confirma tetraedrita a la DRX), la cual se le observa generalmente como tetraedrita y en ocasiones altamente rica en plata tipo freibergita, y menor pirargirita-proustita. En estas últimas el contenido de plata es parte fundamental de estructura cristalina. En otras muestras se ha observado megascópicamente alta cantidad de enargita. Microscópicamente, la muestra corresponde a parte de un cuerpo de skarn mineralizado, rico en minerales de cobre (sulfuros y sulfosales) con evidencia de oxidación. Las texturas de los minerales de cobre muestran que fueron depositados de manera tardía y la abundante presencia de sulfosales, algunas de ellas muy enriquecidas en plata y otras en cobre, confirman el proceso tardío de oxidación (ver capítulo de caracterización elemental por MEB).

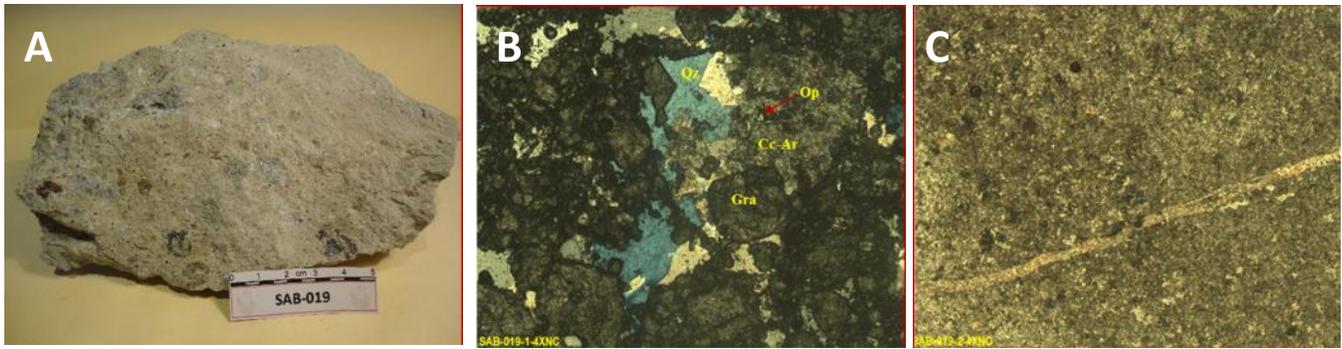


Figura 7.31 Muestra SAB-019. A) Descripción brecha tectónica skarn de granate/dique aplítico en respaldo de la falla (SAB-019b y SAB-019a). Roca color ocre masiva y compacta de color sacaroide por contenido de granate muy fino verde, altamente porosa y relativamente silicificada y sericitizada. La muestra presenta una estructura brechoide, donde se observan fragmentos de roca muy alterados de color gris, verde y rojo. Estos clastos son de intrusivo y de óxidos de fierro (hematita), con pirita diseminada en los clastos. Macroscópicamente, la muestra corresponde a una brecha con una matriz granatífera. B y C) Microscópicamente la muestra tiene una estructura brechoide, donde la matriz está compuesta por granate altamente epidotizado, calcitizado muy fracturado y disgregado, cementado por calcita, cuarzo y por sericita en finas masas o bien en pequeños hilos de sericita bien cristalizada. Sin embargo, es preciso subrayar que el propio granate por estar tan disgregado pasa a formar parte de los fragmentos. Los fragmentos que componen a la muestra están totalmente alterados, observándose solo minerales de alteración como: arcillas, clorita, epidota, calcita y cuarzo. Dentro de las arcillas se aprecia sericita. Por las características microscópicas, esta muestra corresponde a una brecha tectónica del skarn, en contacto también tectónico con un dique aplítico (SAB-019b) argilizado, de textura casi microcristalina, el cual presenta fracturamiento, en el mismo afloramiento y que es el causante del brechamiento del skarn.

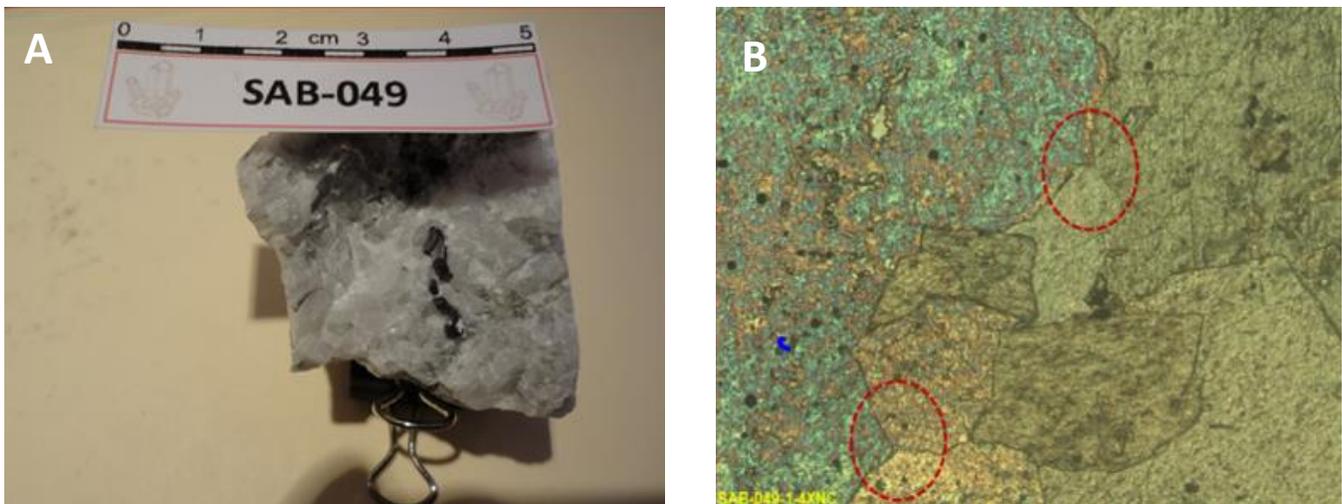


Figura 7.32 Muestra SAB-049. A) Descripción de sigmoide marmorizado relleno de calcita, que megascópicamente presenta una textura granoblástica de grano grueso, la cual en sus fracturas y juntas presenta sulfosales; B) Al microscopio está compuesta totalmente por calcita, la cual presenta uniones triples, lo que fortalece la clasificación de calcita recrystalizada, es decir corresponde a un mármol. Es importante subrayar que este mineral corresponde a dolomita (definida por la DRX), sin embargo, en las otras muestras se detecta calcita con magnesio, por ser una solución sólida es muy variable por lo que se conserva el nombre de calcita que se ha venido manejando en el texto.

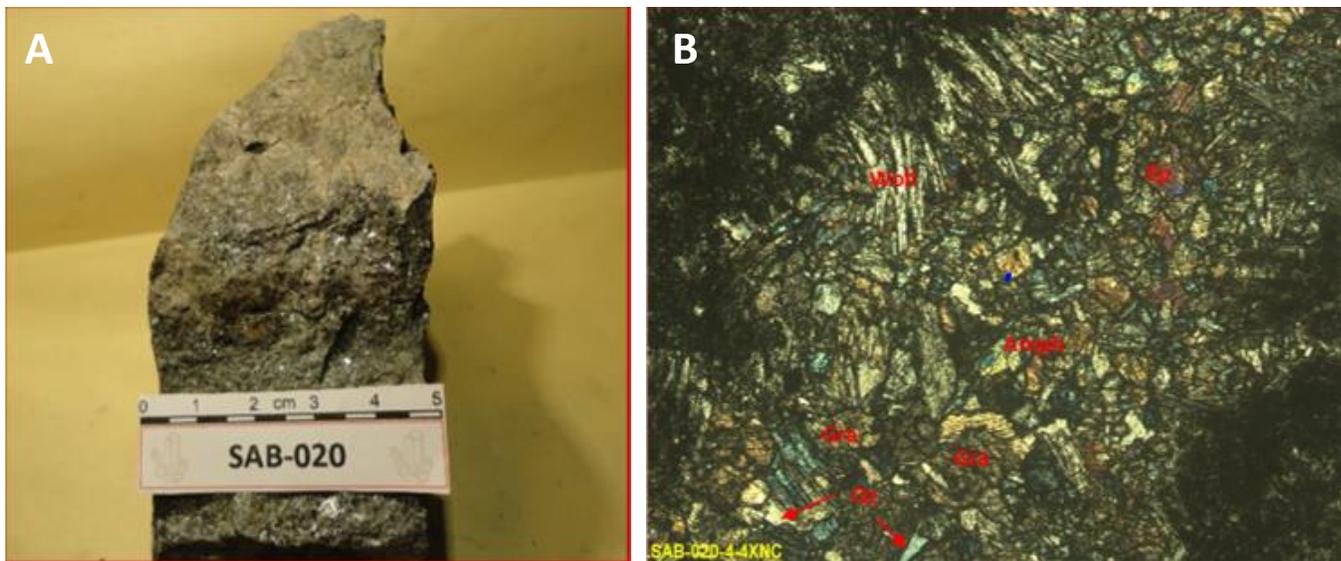


Figura 7.33 Muestra SAB-020. A) Descripción de skarn de granate-actinolita-tremolita-wollastonita, Roca masiva y compacta de color gris verdoso obscuro a verde obscuro, presenta una textura de grano muy fino y en algunas partes de grano medio. En la zona donde se aprecian el grano medio se observa que está constituida por abundante granate y tremolita-actinolita acicular, escaso feldespato/plagioclasa (los cristales de grano medio), se observa escasos cristales de cuarzo depositados en oquedades. La mineralización metálica se observa diseminada sin un patrón de disposición especial, constituida por galena, escasa pirita y calcopirita intercrecida con actinolita/tremolita. En algunas partes de la muestra se observa bornita/covelita. Por las características megascópicas, la muestra corresponde a un endoskarn dada la presencia de feldespato/plagioclasas embebidas en una masa de minerales de skarn; B) Microscópicamente, la muestra presenta una textura granoblástica de grano fino y en partes de grano medio. Está compuesta por abundante anfíbol actinolita-tremolita), granate, wollastonita y epidota, se observan algunas escasas plagioclasas relictas. Los minerales de alteración están representados por principalmente por sericita y menor clorita. El anfíbol, así como la plagioclasa de hábito generalmente granular se encuentran alteradas a clorita, epidota y sericita en diferente grado. En los piroxenos (pseudopiroxeno) se reconoce wollastonita con hábito acicular, el cual se aprecia intercrecido con el granate. Ambos minerales también se encuentran alterados, el primero sobre todo a sericita, mientras que el granate además a clorita. Existe desarrollo de minerales opacos (metálicos) y óxidos en las juntas intercristalinas, así como desarrollo de cuarzo tardío emplazado tanto en la junta intercristalina como en las oquedades y reemplazando a dichos minerales. Los metálicos observados son arsenopirita, esfalerita que generalmente tiene una emulsión de calcopirita y calcopirita en individual con algunas muy pequeñas inclusiones de sulfosales, así como escasa magnetita. La disposición estructural de los metálicos en la muestra permite establecer la cronología de depósito metálico; se parte de la arsenopirita temprana que en ocasiones presenta rasgos de ser afectada tanto por la esfalerita como la calcopirita, la esfalerita se emplaza en el microfracturamiento del granate y wollastonita, siguiendo en depósito la calcopirita ya que se le aprecia afectando tanto a los silicatos como a la esfalerita. Dicha calcopirita, presenta diminutas inclusiones de sulfosales, sin embargo, no se puede establecer su cronología dado que puede representar un proceso de exsolución y no un depósito en oquedad y dado su imperceptible contacto es más probable un proceso de emulsión. En especial en esta muestra hay, una zona de textura de reemplazamiento de silicatos por calcopirita, lo que da la evidencia de que esta mineralogía pertenece al evento de transición de la etapa progradada a la retrogradada del evento de skarn, es decir que esta mineralogía metálica pertenece al evento de skarn. Por las características microscópicas, la muestra corresponde a un skarn de wollastonita-granate con influencia de actinolita ya que la presencia del feldespato/plagioclasa no es tan abundante, y el desarrollo de anfíbol, granate y wollastonita es relevante.

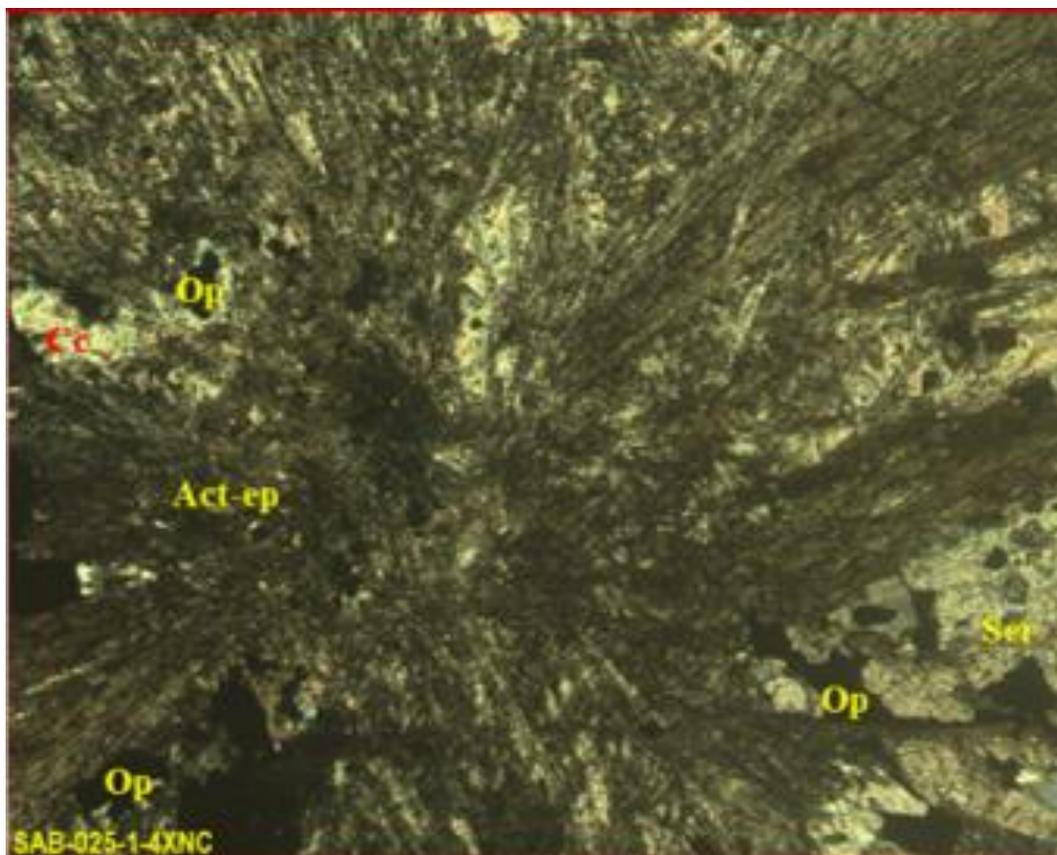


Figura 7.34 Muestra SAB-025. Microscópicamente, la muestra presenta una textura de grano fino, de hábito acicular, compuesta fundamentalmente por actinolita-tremolita, sin embargo, dado su color característico es más actinolita que tremolita. La actinolita se dispone en rosetas de grandes acículas que se disponen de forma intersertal con otras rosetas. Este mineral se encuentra calcitizado y epidotizado. Sus oquedades e intersticios se encuentran rellenos de cuarzo, sericita y de algunos opacos, estos últimos también se encuentran emplazados en algunas fracturas que cortan tanto a la actinolita, al cuarzo. La calcita está emplazada en fracturamiento, intersticios y oquedades.

Con respecto a los minerales metálicos, estos se componen de principalmente calcopirita, bornita, sulfosales de cobre, argentita y plata nativa. Se detectaron algunos puntos muy pequeños de malaquita. Esta muestra se torna muy importante ya que se observan texturas de reemplazamiento. Sin embargo, hay algunos metálicos cortando la calcita de los intersticios, lo que implica que hay dos etapas de relleno de metales que corresponden a la argentita y plata nativa. La calcopirita se encuentra emplazada entre los minerales aciculares (actinolita) y hay algunas zonas donde se observa un proceso de reemplazamiento de la actinolita por la calcopirita. La calcopirita presenta bornita y sulfosales de cobre. Por su parte, la bornita se encuentra en inclusiones granulares en la calcopirita y en ocasiones reemplaza sus zonas de clivaje. Así mismo, las sulfosales de cobre se observan, sea en inclusiones dentro de la calcopirita o bien cortándola. Se aprecia argentita entre los bordes de los silicatos y la calcopirita. En algunas fracturas muy delgadas o bien en oquedades pequeñas existe planta nativa.

Por las características microscópicas, esta muestra es muy importante para evidenciar textura de reemplazamiento en zona de skarn y lo más importante es que el reemplazamiento es de calcopirita en actinolita. Por la presencia de casi únicamente actinolita, la muestra corresponde a un nivel de skarn de actinolita ligeramente argilizada, pero fuertemente silicificada con un aporte de sulfuros de cobre contemporáneos a la formación de skarn en el inicio de su etapa retrograda y minerales tardíos de plata como son argentita y plata nativa (ver clasificación elemental de metálicos al MEB).

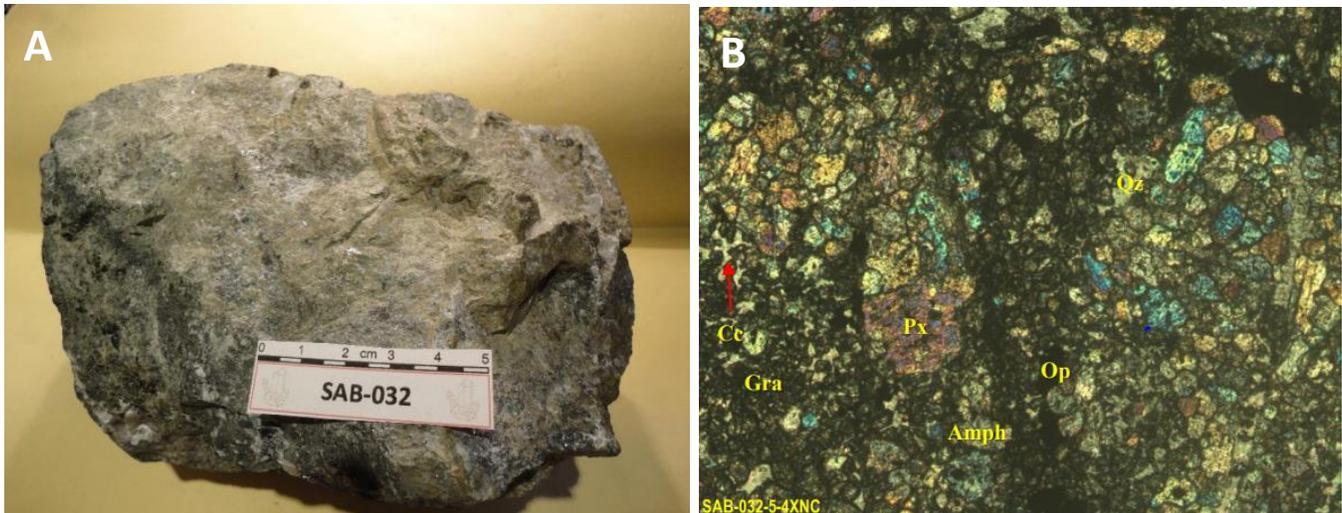


Figura 7.35 Muestra SAB-032. A) Roca masiva, compacta de color gris verdoso a verde, presenta una textura de grano fino a medio. Está constituida por calcosilicatos, dentro de los cuales se reconoce granate euhedral de color verde, abundante piroxeno o anfíbol verde en baguetas.

La muestra presenta fragmentos de color verde más oscuro asociados a mineralización metálica en fracturas, constituida por calcopirita, piritita, bornita y covellita asociadas a calcita. Se observan vetillas que cortan al skarn rellenas de covellita. Megascópicamente, se aprecia mineralización de posible plata nativa en hábito dendrítico, todo este conjunto mineralógico está emplazado en una matriz carbonatada con poco cuarzo.

La muestra presenta la alteración de clorita-epidota y sericita, por sus características megascópicas la muestra corresponde a un skarn cálcico de granate.

B) Microscópicamente la muestra es de textura granoblástica de grano fino compuesta principalmente por piroxeno, dentro del cual se distingue diápsida, asociada con menor anfíbol y abundante granate, el cual es de grano muy fino y en algunas zonas de tamaño grande de hábito prismático euhedral generalmente zonado, todos los minerales se encuentran epidotizados y generalmente calcitizados.

La muestra está fracturada y rellena de calcita, con menor cuarzo, se asocia a escasos opacos y escasa clorita; en el fracturamiento se detecta megascópicamente, la presencia de calcopirita, bornita con supergénesis a covellita y plata nativa filiforme.

La mineralización metálica se compone fundamentalmente de piritita generalmente euhedral con una textura de reemplazamiento, por lo que se observa embebiendo a los piroxenos y anfíboles. Lo que confirma el desarrollo de piritita en el proceso de transición de la etapa progradada y retrogradada a del skarn. Por las características microscópicas, la muestra corresponde a un skarn de diópsida y granate con presencia de anfíbol, afectada por vetillas con sulfuros de cobre.

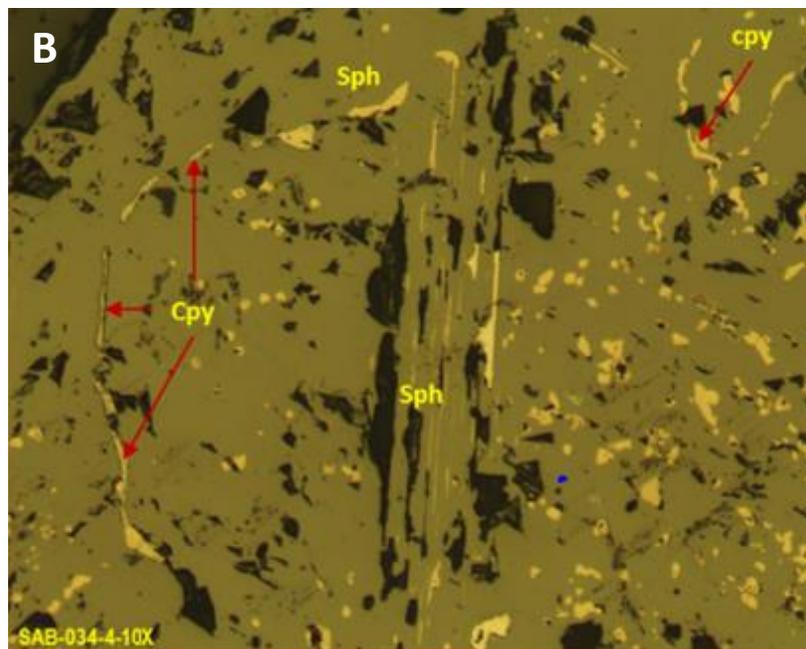


Figura 7.36 Muestra SAB-034. A) Descripción skarn de granate. Roca masiva de color negro a gris oscuro de grano medio a fino, constituida principalmente por esfalerita, menor galena, covellita, calcopirita, escasa arsenopirita y sulfosales, entre las cuales se tienen tetrahedrita y escasa pirargirita, asociadas a calcita y cuarzo. Todo este conjunto mineralógico está emplazado en una matriz de calcita y cuarzo: B) Microscópicamente la muestra es representativa de reemplazamiento dadas sus texturas, ya que se aprecian dos tipos de esfalerita, una de ella en fracturamiento por depósito y otra reemplazando granates y silicatos aciculares, desarrollo de calcopirita en clivajes, (imagen derecha de arriba), en ocasiones da la impresión de que es una emulsión de calcopirita. La arsenopirita que es escasa siempre está embebida en los metálicos tardíos, pero ella a su vez embebe fragmentos de silicatos.

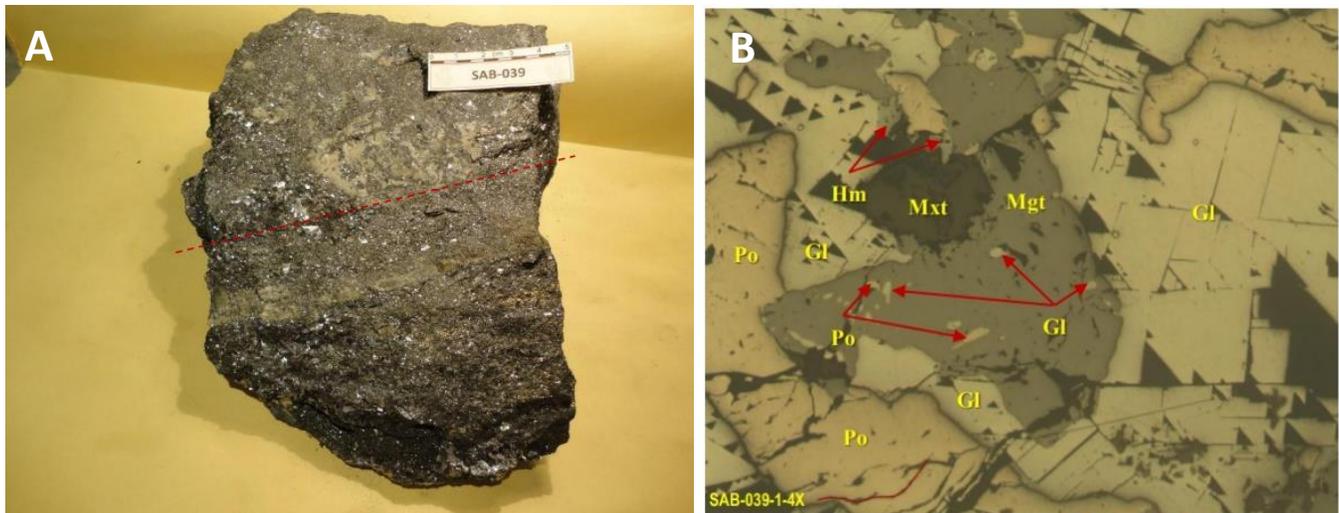


Figura 7.37 Muestra SAB-049 A Descripción de skarn de granate bandeado con mineralización metálica. La roca es de mineral masivo de color gris oscuro a pardo, se presenta en forma estratificada totalmente recrystalizados, pero muy deleznable, se observan algunos cristales verdosos. Los niveles mineralizados se encuentran constituidos principalmente por dos tipos de galena: una de granulometría muy fina tipo aguja, la otra es de grano más grueso, con posible contenido de sulfosales, asociada a pirrotita, calcopirita y a cuarzo amorfo (color blanco lechoso) en forma de agregados escasos, presenta alteración de sericita y escasa calcita; B) Microscópicamente, la muestra se caracteriza por contener alta proporción de galena, menor pirrotita y magnetita. Como minerales de alteración se observa un poco de hematita. Estos minerales se encuentran interdigitados con los minerales relictos de la roca, dentro de estos minerales se observa granate, recrystalizado en calcita y cuarzo y así como algunos anfíboles. La pirrotita siendo la más antigua en el depósito (después de la roca recrystalizada), desarrolla algunas zonas deformadas (con sigmoides), se encuentra afectada por la magnetita, la cual presenta inclusiones de pirrotita. La galena en esta muestra es pura de excelente cristalización mostrando sus característicos triángulos y sin evidentes contenidos de plata, por otro lado, la hematita es de menor presencia y se encuentra intercrecida con los minerales transparentes. Es importante mencionar que la pirrotita corresponde a fragmentos los cuales sufrieron una deformación dúctil evidenciada por los clivajes dibujando sigmoides, Microscópicamente, la muestra corresponde parte de un cuerpo mineralizado secuencialmente, asociado a zona de skarn (relicto de granate y anfíboles). Sin embargo, las texturas no muestran un reemplazamiento, sino un depósito progresivo, con relictos de roca totalmente alterada y recrystalizada evidenciados megascópicamente.

7.4 Intrusivo Granítico-Cuarzomonzónico.

Las muestras de intrusivo analizadas tienen un rango de composición que va de cuarzomonzónica a granítica, prevaleciendo la primera. Esta clasificación fue determinada cualitativamente dado el enmascaramiento de los minerales primarios por una fuerte alteración argílica, silicificación y/o calcitización.

Macroscópicamente, sus texturas son granulares, típicamente leucocráticas, pero varían de grano fino a grano medio, y en ocasiones se observan porfídicas. Dentro de dichas texturas, se observan desarrollos gráficos, lo que significa que hubo un proceso de fusión o solidificación con reacciones incongruentes en una masa líquida con reactividad de fases subsólidas, donde se genera al mismo tiempo la formación intercrecida de feldespato potásico y cuarzo.

La mineralogía está representada por plagioclasa, menor feldespato potásico, y escaso cuarzo. La fuerte silicificación enmascara si el cuarzo realmente es primario, sin embargo, la presencia de feldespato potásico, las texturas gráficas de feldespato potásico confirman que el sistema depositó algo de cuarzo.

Los escasos ferromagnesianos están representados por hornblenda; los minerales de alteración argílica están representados por epidota, fina pero escasa pirita, calcita y montmorrillonita, con fuerte silicificación superpuesta.

El intrusivo en todas sus variantes se caracteriza por una deficiencia en ferromagnesianos y una silicificación y calcitización. En lo que concierne a su estructura, el intrusivo presenta una pérdida de volumen que genera aperturas intercristalinas o bien un fuerte fracturamiento y fallamiento que aloja principalmente calcita, arsenopirita, galena, calcopirita, sulfosales de cobre/plata y menor esfalerita. Sin embargo, a pesar de contener mineralización metálica, el intrusivo no constituye ningún metalotecto, como es el caso de hornfels rico en pirrotita. Así mismo, se detectan algunas evidencias de deformación aparentemente dúctil.

En términos generales el intrusivo, presenta características normales de un intrusivo ácido intermedio, con deficiencia en ferromagnesianos, con argilización y feldespaticización. Lo más importante desde el punto de vista mineralización, es que el intrusivo está sumamente fracturado y fallado, e incluso se observan algunas evidencias ocasionales de deformación.

El fracturamiento es el medio donde se deposita la mineralización económica, siendo menos rica en sulfuros de zinc y más rica en sulfuros de plomo asociado a sulfosales de plata. Sin embargo, la roca como tal no constituye ningún metalotecto, como es el caso del hornfels rico en pirrotita; sin embargo, el fracturamiento y la debilidad intermineralica si constituye un metalotecto para los minerales epitermales que son ricos en plata, cobre y plomo.

7.5 Texturas y Mineralogía del Intrusivo.

En las figuras 7.38 a 7.45 se muestran los diferentes aspectos texturales y mineralógicos del intrusivo, que va desde texturas granulares de grano fino a medio grueso hasta porfídicas, caracterizando al intrusivo los escasos ferromagnesianos y mineralización metálica en oquedades intercristalinas, fracturamiento y fallamiento.

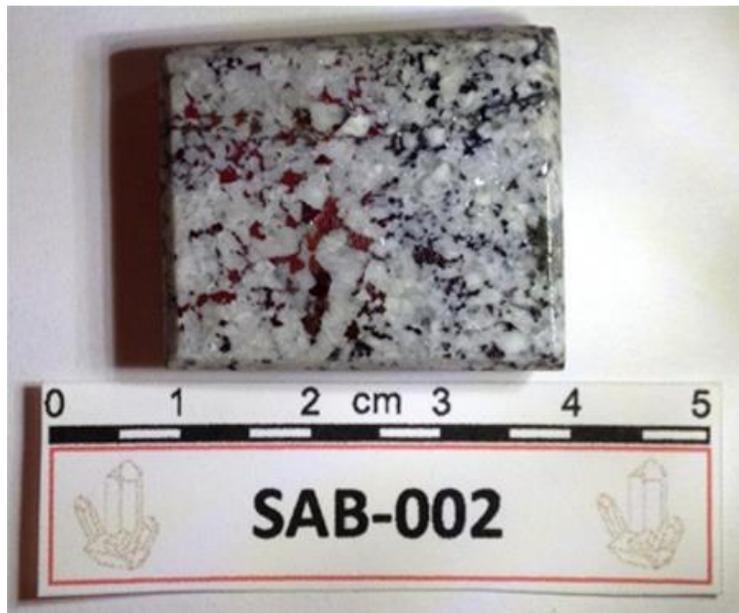


Figura 7.38 Muestra SAB-002. Descripción de intrusivo con fracturamiento y relleno de minerales metálicos. La roca es masiva de color gris claro a gris verdoso, textura equigranular, de grano medio a grueso, constituida por plagioclasa y cuarzo; afectada por fracturas y oquedades intercrystalinas con mineralización metálica. La mena corresponde a galena, arsenopirita, sulfosales de cobre, menor esfalerita, escasas pirita y magnetita. La arsenopirita va de euhedral a anhedral y generalmente se le observa embebida por la galena y la esfalerita, en sus oquedades aloja tanto a la galena como a la esfalerita, así como a las sulfosales de cobre. La galena embebe a su vez a la esfalerita. Es importante denotar que la galena en ocasiones va perdiendo su textura sedosa pasando a una textura rugosa de débil dureza, lo que indica que los contenidos de plata se hacen presentes y en ocasiones en cantidades relevantes. La esfalerita, se presenta de dos tipos, una limpia y otra con inclusiones de pirita (lo que no es raro, pero tampoco común, es más común de calcopirita). Algunas texturas muestran, inclusiones de calcopirita, (observaciones microscópicas). La muestra corresponde a un protolito de intrusivo que se encuentra sumamente fracturado, donde las fracturas y zonas de debilidad fueron utilizadas por la mineralización metálica. Parte de la pirita existente pertenece a un proceso de reemplazamiento de minerales primarios a diferencia de la esfalerita y galena.



Figura 7.39 Muestra SAB-003. Descripción de intrusivo con escasos ferromagnesianos, fracturado y alterado, la roca es masiva de color blanco a gris verdoso, de granulometría equigranular de grano medio, compuesta por cuarzo y por plagioclasa-feldespato muy alterado al grado de mostrar un aspecto arenoso. La coloración verdosa es ocasionada por la clorita y epidota contenida, asociada al color blanco de la caolinita y sericita que también altera a los minerales. La mineralogía metálica está representada por una fina diseminación en oquedades de arsenopirita embebida por calcopirita con inclusiones de sulfosales que generalmente son de tetraedrita. Por los contenidos de plata, su textura pasa de sedosa a rugosa (freibergita), asociada a bornita, pirita y galena, esta última también se presenta en las fracturas y zonas de debilidad intercrystalina de la roca y es de grano muy fino. Por sus características megascópicas, la muestra corresponde a la cuarzomonzonita totalmente argilizada, con una afectación de mineralización polimetálica en vetillas y zonas de debilidad igual que la muestra SAB-002.

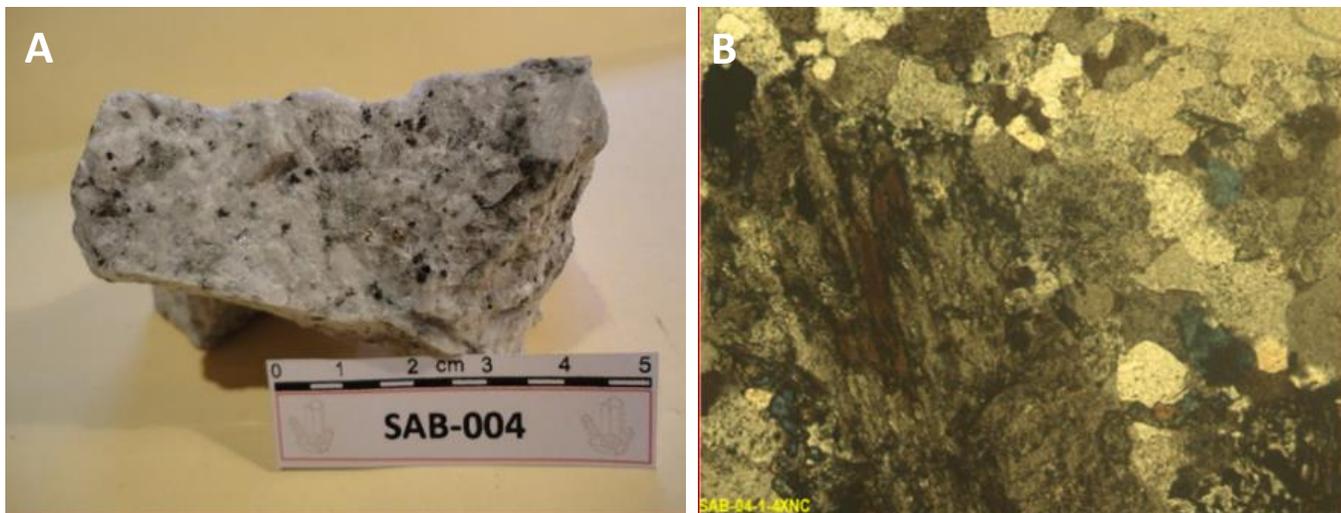


Figura 7.40 Muestra SAB-004 Descripción de intrusivo, calcitizado y silicificado. A) Roca masiva de color gris claro a blanco con moteado negro, de granulometría equigranular de grano medio a grueso, de cristales subhedrales a anhedrales de plagioclasa, menor cantidad de feldespato y abundante cuarzo, menor cantidad de ferromagnesianos (hornblenda). Los metálicos son escasos constituidos por arsenopirita, calcopirita, bornita y covelita y escasa galena. Se observa ligera sericitización y epidotización, por las características megascópicas texturales, la proporción de plagioclasa, menor feldespato y cuarzo, la muestra se clasifica como cuarzomonzonita ligeramente argilizada.

B) Microscópicamente, presenta textura porfídica anhedral, ciertos fenocristales euhedrales, matriz anhedral de grano medio, compuesta de abundante plagioclasa, menores feldespatos potásicos y cuarzo; los ferromagnesianos corresponden a relictos de hornblenda. La plagioclasa presenta maclado polisintético y en ocasiones zonado con bordes de crecimiento.

La importancia del análisis de la plagioclasa en esta muestra es importante, ya que su alteración permite, definir que el magma tuvo pulsaciones composicionales, ya que hay plagioclasa fuertemente alterada a sericita-clorita-epidota (composición original más cálcica) sea al centro y con contorno de plagioclasa menos alterada o bien nada alterada, lo que evidencia una composición más ácida. La proporción de plagioclasa sódica es menor que la cálcica, así como menor feldespato potásico.

El feldespato potásico está presente, tanto en fenocristal como en la matriz, la importancia de la evidencia de las pulsaciones también se puede apreciar en esta muestra, ya que existen texturas relictas perfiticas, las cuales se encuentran remarcadas por una caolinización presentando a su vez un halo de plagioclasa con captura de cuarzo.

El cuarzo es de grano medio anhedral y generalmente no se presenta en fenocristales. Los ferromagnesianos son escasos, generalmente euhedrales de hábito tabular, corresponden a hornblenda totalmente sericitizada, en parte cloritizada y epidotizada. En los clivajes de la hornblenda se encuentra desarrollo de óxidos de fierro.

Estos metálicos se relacionan a la paragénesis de alteración. Los metálicos corresponden a diminuta pirita diseminada en la muestra, así como desarrollo de óxidos de fierro en clivajes y en juntas interminerálicas. La muestra se encuentra fuertemente argilizada, ya que la paragénesis mineral se compone de sericita, epidota, clorita y pirita.

Por las características microscópicas, con base a la proporción de las plagioclasas, feldespato potásico presencia de cuarzo primario, la muestra se clasifica como una cuarzomonzonita argilizada.

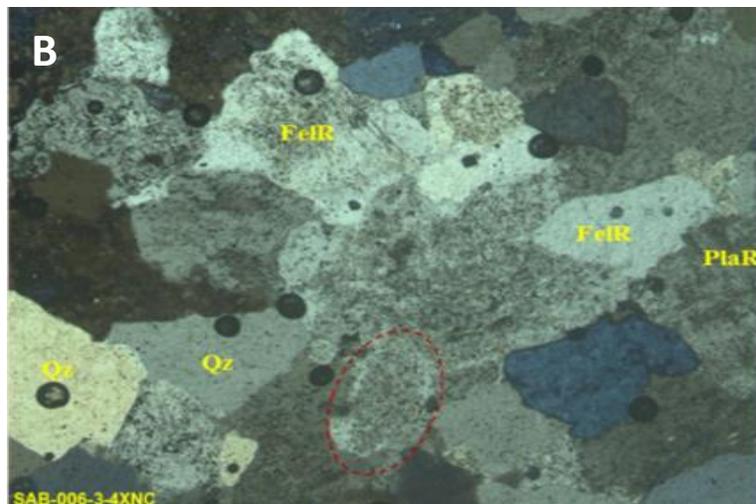


Figura 7.41 Muestra SAB-006. Descripción de intrusivo de grano fino sin ferromagnesianos fracturado. A) Roca masiva de color gris claro a blanco, presenta una textura afanítica, heterogranular, anhedral de grano fino a muy fino, constituida por feldespato y cuarzo, se observa escasa mica (biotita), la que formó una alteración de epidota. La plagioclasa que es mayor en proporción con respecto al feldespato se encuentra fuertemente alterados a sericita y sólo se puede discernir su presencia, sea porque conserva la forma o bien aparecen maclas polisintéticas en la plagioclasa, por su alteración a sericita principalmente se deduce su composición intermedia. B) Microscópicamente se llegan a distinguir formas típicas de anfíbol totalmente reemplazado, así mismo, se observan zonas con textura gráfica que exsolucionan cuarzo, lo que representa evidencias de deformación o bien metamorfismo que, por el contexto del yacimiento, esta muestra representa una zona cercana al contacto con el encajonante. Es importante señalar que en esta muestra el feldespato se encuentra relativamente fresco lo que evidencia una feldespatización. Por lo que respecta a los metálicos, se observa escasas calcopirita y galena asociadas a calcita, estas se introducen en las oquedades y fracturas multidireccionales e interminerálicas. Por las características microscópicas, la muestra se clasifica como cuarzomonzonita, fuertemente sericitizada y silicificada con desarrollo de feldespatización.

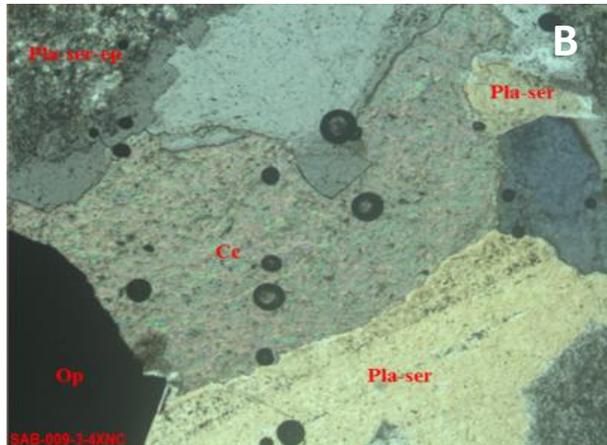


Figura 7.42 Muestra SAB-009. Descripción de intrusivo en contacto con mineralización bandeada A Roca masiva de color gris verdoso, presenta una textura fanerítica equigranular de grano grueso, constituida por plagioclasas (color blanco lechoso), abundante cuarzo, biotita escasa. El color verdoso se debe a la presencia de abundante sericita, clorita, epidota alterando a las plagioclasas. Presenta una mineralización metálica diseminada de piritita muy fina y escasa, además de bornita y calcopirita, la cual se presenta en vetillas e intersticios intermineralicos rellenos de calcita, arsenopirita, piritita, pirrotita, galena, esfalerita con exsolución y sulfosales, así como escasa cuprita. La esfalerita contiene exsolución de calcopirita generalmente hacia los bordes de los cristales, donde ésta última embebe a sulfosales ricas en plata (al igual que en la arsenopirita), esto evidenciado por su textura porosa. Finalmente, en las oquedades se observa el desarrollo de cuprita.

B) Microscópicamente la cronología de depósito parte de una pirrotita deformada, luego la arsenopirita, piritita, seguida por esfalerita embebida por galena, luego calcopirita y la sulfosales ricas en plata totalmente tardías. La pirrotita en esta muestra es importante, ya que tiene evidencias de arrastre de deformación dúctil, lo que puede ser evidencia de un gran fallamiento o una zona de compresión posterior al desarrollo de esa pirrotita y es el reflejo del diaclasamiento que se observa en megascópico. La roca se encuentra sericitizada (sericita, clorita, calcita) y fuertemente silicificada, al grado que se observan en los minerales relictos con halos de cuarzo. Así mismo, se observa el desarrollo de feldespatos tardíos denotado por cristales de una textura limpia y poco alterada, evidenciando una feldespatización. Por las características microscópicas la muestra corresponde a un intrusivo cuarzomonzónico ya que la proporción de plagioclasa es mayor con respecto al feldespato primario, argilizado y altamente silicificado, afectado por una feldespatización y finalmente por un evento epitermal que se asocia con calcopirita, galena y sulfosales ricas en plata.

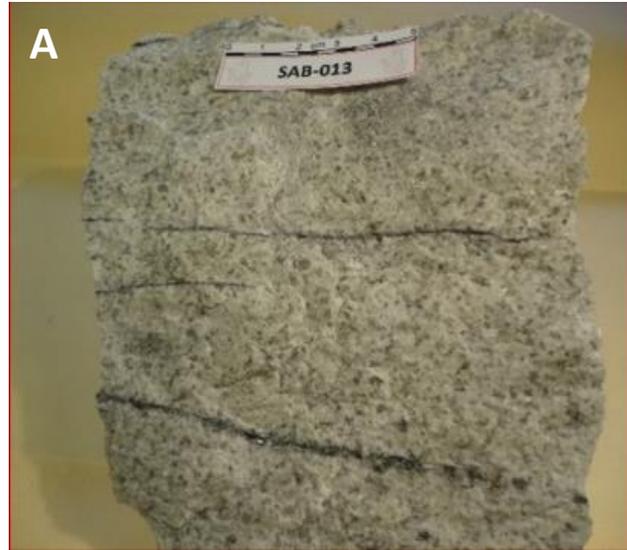


Figura 7.43 Muestra SAB-013. Descripción de intrusivo con fracturamiento semiparalelo A Roca masiva y compacta de color blanco, grisáceo verdoso, de textura fanerítica, equigranular de grano medio a grueso, constituida por plagioclasa (color blanco lechoso) que sólo se reconocen por el relicto de maclado polisintético, cuarzo (cristales translúcidos) y algunos feldespatos que se encuentran epidotizados (color verdoso), se reconocen fantasmas de anfíbol. Las características de la muestra se encuentran enmascaradas por dos efectos: el primero es un evidente recocimiento (perdida de la nitidez de los contactos intermineralicos, además de texturas subsolidus y aparición de cuarzo de extinción ondulante, segundo por una fuerte alteración argílica, con una superposición de silicificación. La roca sericitizada, pero con una silicificación intensa le da alta dureza a la roca. Se observa un fuerte fracturamiento paralelo que forman una serie de vetillas y fracturas milimétricas rellenas de sulfuros de plomo y fierro (galena, pirita) de grano muy fino, así como de escasa calcopirita; estos sulfuros se encuentran escasamente diseminados en la muestra. B) Por las características microscópicas, esta muestra corresponde a un protolito intrusivo, pero en zona de asimilación por contacto, sin embargo, si bien los cambios de temperatura son relevantes por su posición este recalentamiento tiene dos enfoques a definir: más de una etapa de intrusión que haya elevado la temperatura para el recocimiento ya que se esperaría en esta posición de contacto presencia de minerales con mayores contenidos de aluminio debido a la asimilación, lo que no es siempre lo esperado, ya que las rocas encajonantes no son totalmente arcillosas. Sin embargo, esta muestra se clasifica como endoskarn con un protolito Cuarzomonzonítico, como lo son las muestras SAB-002 y SAB 003.

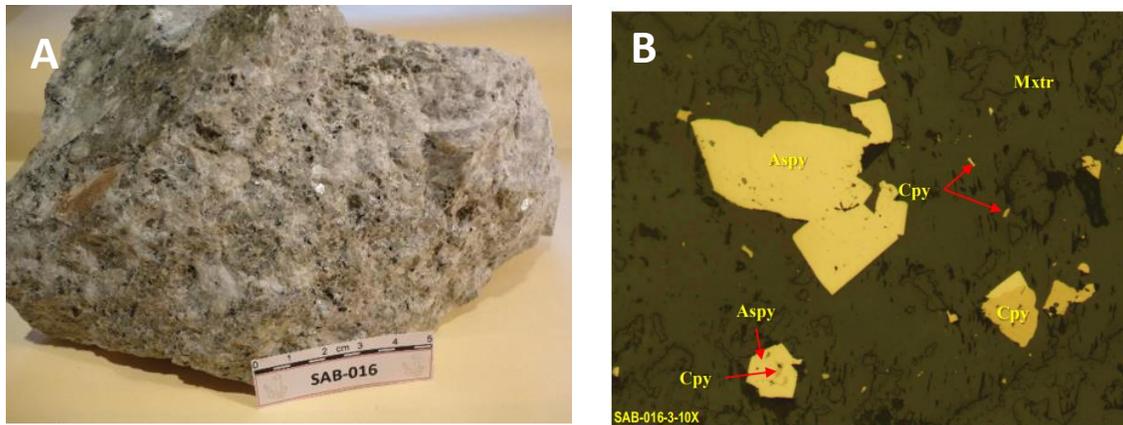


Figura 7.44 Muestra SAB-016. Descripción de intrusivo alterado con textura porfídica. Roca masiva y compacta de color gris verdoso, presenta una textura inequigranular de grano grueso, con fenocristales de plagioclasa que por su grado de argilización son de composición intermedia y en menor cantidad feldespato, cuarzo y ferromagnesianos (mica-biotita), y se observaron cristales muy escasos de fluorita (color morado), emplazados en una matriz cuarzosa. La muestra presenta una fuerte silicificación, sericitización (argilización). La mineralización se encuentra diseminada en pequeños puntos aislados generalmente asociados a una matriz cuarzosa y la mineralización metálica es escasa y diseminada en forma de bornita, calcopirita, pirita y covelita. Microscópicamente, la proporción de la mineralización metálica es baja y está representada por arsenopirita de subhedral a euhedral relativamente más abundante que la pirita, a estos dos minerales se les observa desarrollados de forma glomerática en las oquedades de la roca. La arsenopirita presenta inclusiones de sulfosales de cobre, en este caso, tetraedrita. La secuencia de depósito de la mineralogía metálica inicia por arsenopirita-pirita seguido por la calcopirita y finalmente desarrollo de las sulfosales de cobre (tetraedrita). La relación cronológica entre la arsenopirita y pirita no se ha podido establecer en esta muestra. Por las características microscópicas, se establece que este intrusivo totalmente argilizado y silicificado, tiene su mineralogía metálica relacionada al fracturamiento que ha aportado la fuerte silicificación.

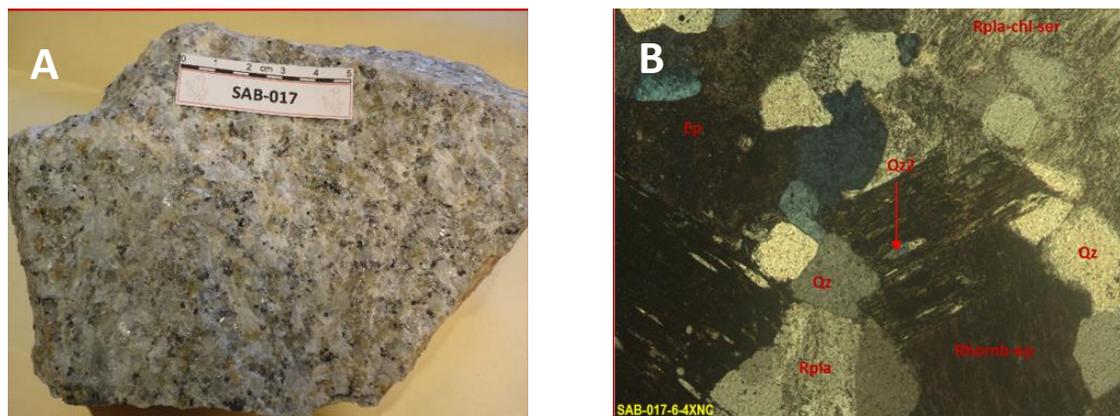


Figura 7.45 Muestra SAB-017. Descripción de intrusivo con ferromagnesianos cloritizados y epidotizados A Roca masiva y compacta de color gris claro a pardo, presenta una textura equigranular de grano medio a grueso. Constituido por plagioclasa, cuarzo y mayor cantidad de feldespato (color rosa), clorita de color verde clorita y epidota, así como menor cantidad de ferromagnesianos (hornblenda cloritizada y epidotizada). La muestra presenta una fuerte silicificación y algo sericitizada con algo de hematita y limonita. B) Microscópicamente, tanto el feldespato potásico como la plagioclasa se encuentran en calidad de relictos dada la fuerte alteración que en ocasiones le transforma totalmente a sericita y clorita, reemplazados por cuarzo. Se observa un fino fracturamiento relleno por sílice. Por sus características, la muestra corresponde a una cuarzomonzonita propilitizada y fuertemente silicificada.

8. Caracterización Elemental MEB.

El análisis por microscopio electrónico de barrido (MEB) permitió por una parte confirmar algunos minerales, reconocer otros y buscar elementos químicos anómalos que puedan ser de interés. Se analizaron 96 puntos de 7 muestras como se puede apreciar en la tabla 8.1. Es importante remarcar que se realizaron tres tipos de rutinas para confirmar la presencia del estaño y de tierras raras. El punteo se realizó a 25kV, sin pulverización de carbono. Los resultados son semicuantitativos ya que ponderan al 100% los elementos registrados y no miden ni oxígeno, ni hidrogeno, sólo se calculan. La estequiometria de estos análisis es muy alta, lo que es confirmado por la precisión de la mayoría de las fórmulas estructurales de los minerales base.

Muestras Analizadas por MEB (Microscopio Electrónico de Barrido)				
Muestras	No. Puntos	Descripción de la Roca	Fases Detectadas por MEB	Fases Detectadas por DRX
SAB-010	24	Skarn de granate con sulfosales y calcopirita	Arsenopirita, bornita, calcopirita, estromeyerita, galena con sulfosales, idaita loellingita, mckinstryita, miharaita, plata nativa, fase compleja de Pb/Se con S, fase completa de Ag/Pb/Se.	Esfalerita con cadmio, esfalerita pura, ferrokesterita, esfalerita con manganeso
SAB-020	6	Skarn de wollastonita-granate	Arsenopirita, esfalerita, lollingita	
SAB-025	13	Skarn de actinolita, calcopirita	Bornita, calcopirita, casiterita, naumannita, roquesita, fase compleja de Ag/Se, calcosilicoaluminato con REE.	Tetrahedrita, calcopirita
SAB-030	13	Reemplazamiento de hornfels por pirrotita	Arsenopirita, esfalerita, freibergita, galena, pirrotita	
SAB-035	7	Reemplazamiento de hornfels por pirrotita	Calcopirita, galena, pirrotita, calcosilicato con Mg.	
SAB-037	18	Reemplazamiento de hornfels por pirrotita	Arsenopirita, bornita, esfalerita, freibergita, idaita, galena, gudmundita, pirrotita, fosfato (monazita).	
SAB-042	15	Skarn de grano muy fino con mx tardía en calcita de galena.	bornita, calcopirita, idaita, plata nativa, fase compleja de Ag/Pb/Se, fase compleja de Pb/Se, calcosilicatos con F, P, Ni, REE.	Calcita manganesífera, andradita ferrífera
Total	96			

Tabla 8.1 Muestras analizadas por MEB para determinar fases minerales y poder clasificarlas.

Los minerales detectados por MEB se pueden dividir en cuatro tipos:

Sulfuros básicos: Galena, esfalerita, calcopirita y bornita; estos minerales de cobre y plomo derivan en sulfuros secundarios y ternarios por alteración supergénica en covelita y/o digenita.

Sulfosales: Relacionadas a la presencia de plata, dentro de las cuales se detectan freibergitas, stromeyeritas, mckinstryitas y sulfoseleniuros como naumanita, aguilarita. Es importante subrayar que la presencia de selenio e indio son bastante relevantes, por el contrario, el bismuto fue detectado una sola vez.

Silicatos: se detectó abundante monazita, la cual tiene relevantes cantidades de Lantano y Cesio con algo de Neodimio, Este dato es relevante ya que el yacimiento deberá analizarse detalladamente por tierras raras y elementos traza, por separado dado que se tiene presencia común y en ocasiones alta de ambos además de: Selenio, Indio, Cesio, Lantano y menor Neodimio, estos tres últimos en los silicatos-fosfatos.

Óxidos: Se encontraron óxidos de estaño bajo la forma de casiterita en fracturas dentro de la secuencia skarnizada. Esto es diferente y no como frecuentemente se piensa encontrar en la secuencia riolítica.

En las siguientes dos tablas se puede apreciar la variación de los contenidos elementales de cada uno de los minerales básicos, siendo relevante las existencias de fases complejas, hasta el grado que éstas no se pueden calcular sus fórmulas estructurales.

Muestra/Punto	S	Pb	Zn	Cu	Fe	As	Sb	Ag	Se	In	Bi	Sr	Cd	Sn	O	Mineral
SAB-37-4	13.29	86.71														Gl
SAB-37-1	14.28	85.72														Gl
SAB-035-3a	12.09	87.91														Gl
SAB-030-3b	10.79	87.37														Gl
SAB-030-4b	10.18	88.33														Gl
SAB-030-7	9.64	90.36														Gl
SAB-10-21*	10.31	68.65		5.16	1.70			10.50	3.68							Gl casi SS
SAB-020-3a	32.24		67.76													Sph
SAB-020-3c	31.47		66.46		2.07											Sph
SAB-37-14	36.86		53.42		9.72											Sph
SAB-37-3	35.44		53.13		10.52								0.91			Sph
SAB-37-8	34.97		54.22		10.81											Sph
SAB-37-2	35.81		53.18		11.00											Sph
SAB-030-6	30.62		57.37		12.01											Sph
SAB-030-1b	30.76		56.83		12.41											Sph
SAB-030-1a	32.22		50.13		17.66											Sph
SAB-030-3c	37.35				62.65											Po
SAB-035-3b	36.67				63.33											Po
SAB-035-1b	36.63				63.37											Po
SAB-035-1a	36.38				63.62											Po
SAB-37-11	41.25				58.75											Po
SAB-37-5	42.16				57.84											Po
SAB-030-5c	16.62				29.81	49.93										Arspy
SAB-020-1b	17.77				33.15	48.78										Arspy
SAB-10-13	18.06				33.10	48.84										Arspy
SAB-10-12	19.23				33.73	47.05										Arspy
SAB-030-5b	16.09				27.94	47.87	3.86									Arspy
SAB-37-12	21.63				32.51	43.90	1.97									Arspy
SAB-37-9	21.24				32.60	43.74	2.42									Arspy
SAB-37-16	21.16				32.67	44.84	1.33									Arspy
SAB-030-5a	18.05				33.16	42.33	3.34									Arspy
SAB-020-1a*	1.54				25.62	62.39										Arspy
SAB-37-13	16.11				15.39	11.41	57.10									Gudm
SAB-10-11					26.79	73.21										Loig
SAB-10-7	1.36				26.32	72.31										Loig
SAB-020-3b	3.41				27.05	69.55										Loig
SAB-020-2b	2.51				27.96	69.53										Loig
SAB-035-2a	32.42			36.42	31.17											Cpy
SAB-25-3	38.17			33.51	28.31											Cpy
SAB-25-4	38.31			32.42	29.27											Cpy
SAB-25-9	38.03			32.82	29.15											Cpy
SAB-37-17	37.73			32.18	30.09											Cpy
SAB-10-1	32.15			37.55	30.30											Cpy
SAB-10-3	32.85			36.52	30.63											Cpy
SAB-042-5b	33.69			35.85	30.47											Cpy
SAB-042-3b*	49.41			23.47	27.12											Cpy
SAB-10-8**	33.29			36.99	28.82	0.90										Cpy
SAB-10-23	31.80	3.71		34.86	29.63											Cpy
SAB-10-20	29.72			50.00	3.18			1.03	4.17							Bor
SAB-25-8	30.42			56.14	13.44											Bor
SAB-25-10	29.58			57.92	12.49											Bor
SAB-37-10	36.55			52.49	10.96											Bor
SAB-37-7	32.96			55.77	11.27											Bor
SAB-10-4	22.67			65.10	10.78			1.46								Bor
SAB-042-3a	42.01			46.03	11.96											Bor
SAB-10-17	23.28			59.04	10.27			7.41								Bor
SAB-042-6b	25.28			64.11	10.61											Bor
SAB-10-9	24.00			62.21	11.13	0.74		1.92								Bor
SAB-25-1	28.94			59.27	11.79											Bor
SAB-10-2	23.34			65.64	11.03											Bor
SAB-042-5a	24.50			63.78	11.72											Idai
SAB-10-6	21.42	6.60		58.98	13.00											Idai
SAB-10-5	13.94	35.13		48.01	2.92											Idai
SAB-37-18*	9.83		21.53	36.27	18.47	11.31										Idai
SAB-042-2a	32.71			49.18	11.59			6.52								FcAgPbSe
SAB-042-2b*	6.80			70.08	12.95			6.27								FcAgPbSe
SAB-042-2c*	7.71	2.58		64.86	13.76			6.50								FcAgPbSe
SAB-10-18	4.37			76.00	11.15			7.37								FcAgPbSe
SAB-10-15*	8.34			73.76	5.93	1.96			4.32							FcPbSeS
SAB-042-5c				81.28	6.57	4.07			6.51			1.57				FcPbSe
SAB-10-24	22.35	3.47		60.05	11.11			3.02								Dig/Cov
SAB-25-7	29.01			25.67	5.73					39.59						Roq
SAB-25-11	27.49			25.56	2.19					44.77						Roq
SAB-10-10	16.93			24.04	2.51	6.95		45.57								Stromy
SAB-030-4a	19.91			1.73	6.96		26.19	30.22								Freib
SAB-030-3a	20.02			17.70	7.48		25.68	29.12								Freib
SAB-037-15	22.11			12.27	5.72		26.13	33.78								Freib
SAB-25-6				3.49	1.37			70.68	24.46							Naum
SAB-10-19	12.86			29.62	2.90			52.57	2.050							Mck
SAB-10-14	12.32	22.81		36.80	1.52	2.57		0.280				23.70				Miha
SAB-25-2	9.51			7.83				51.49	16.95	14.23						FcAgSe
SAB-042-6a	1.13							98.87								Agn
SAB-10-16	4.33			9.02				86.65								Agn
SAB-25-5					0.72									58.14	41.14	Cass
SAB-25-12					0.45									68.06	31.48	Cass

Tabla 8.2. Datos de análisis por MEB de minerales metálicos por fase mineral.

Muestra/Punto	S	Pb	Zn	Cu	Fe	As	Sb	Ag	Se	In	Bi	Sr	Cd	Sn	O	Mineral
SAB-010-1	32.15			37.55	30.3											Cpy
SAB-010-2	23.34			65.64	11.03											Bor
SAB-010-3	32.85			36.52	30.63											Cpy
SAB-010-4	22.67			65.1	10.78			1.46								Bor
SAB-010-5	13.94	35.13		48.01	2.92											Idai
SAB-010-6	21.42	6.6		58.98	13											Idai
SAB-010-7	1.36				26.32	72.31										Lolg
SAB-010-8**	33.29			36.99	28.82	0.9										Cpy
SAB-010-9	24			62.21	11.13	0.74		1.92								Bor
SAB-010-10	16.93			24.04	2.51	6.95		45.57								Stromy
SAB-010-11					26.79	73.21										Lolg
SAB-010-12	19.23				33.73	47.05										Arspy
SAB-010-13	18.06				33.1	48.84										Arspy
SAB-010-14	12.32	22.81		36.8	1.52	2.57		0.28			23.7					Miha
SAB-010-15*	8.34	73.76		5.93	1.96				4.32							FcPbSeS
SAB-010-16	4.33			9.02				86.65								Agn
SAB-010-17	23.28			59.04	10.27			7.41								Bor
SAB-010-18	4.37			76	11.15			7.37								FcAgPbSe
SAB-010-19	12.86			29.62	2.9			52.57	2.05							Mck
SAB-010-20	29.72			50	3.18			1.03	4.17							Bor
SAB-010-21*	10.31	68.65		5.16	1.7			10.5	3.68							Gl casi SS
SAB-010-23	31.8	3.71		34.86	29.63											Cpy
SAB-010-24	22.35	3.47		60.05	11.11			3.02								Dig/Cov
SAB-020-1a*	1.54				25.62	62.39										Arspy
SAB-020-1b	17.77				33.15	48.78										Arspy
SAB-020-2b	2.51				27.96	69.53										Lolg
SAB-020-3a	32.24		67.76													Sph
SAB-020-3b	3.41				27.05	69.55										Lolg
SAB-020-3c	31.47		66.46		2.07											Sph
SAB-025-1	28.94			59.27	11.79											Bor
SAB-025-2	9.51			7.83				51.49	16.95	14.23						FcAgSe
SAB-025-3	38.17			33.51	28.31											Cpy
SAB-025-4	38.31			32.42	29.27											Cpy
SAB-025-5					0.72									58.14	41.14	Cass
SAB-025-6				3.49	1.37			70.68	24.46							Naum
SAB-025-7	29.01			25.67	5.73					39.59						Rq
SAB-025-8	30.42			56.14	13.44											Bor
SAB-025-9	38.03			32.82	29.15											Cpy
SAB-025-10	29.58			57.92	12.49											Bor
SAB-025-11	27.49			25.56	2.19					44.77						Rq
SAB-025-12					0.45									68.06	31.48	Cass
SAB-030-1a	32.22		50.13		17.66											Sph
SAB-030-1b	30.76		56.83		12.41											Sph
SAB-030-3a	20.02			17.7	7.48		25.68	29.12								Freib
SAB-030-3b	10.79	87.37														Gl
SAB-030-3c	37.35				62.65											Po
SAB-030-4a	19.91			1.73	6.96		26.19	30.22								Freib
SAB-030-4b	10.18	88.33														Gl
SAB-030-5a	18.05				33.16	42.33	3.34									Arspy
SAB-030-5b	16.09				27.94	47.87	3.86									Arspy
SAB-030-5c	16.62				29.81	49.93										Arspy
SAB-030-6	30.62		57.37		12.01											Sph
SAB-030-7	9.64	90.36														Gl
SAB-035-1a	36.38				63.62											Po
SAB-035-1b	36.63				63.37											Po
SAB-035-2a	32.42			36.42	31.17											Cpy
SAB-035-3a	12.09	87.91														Gl
SAB-035-3b	36.67				63.33											Po
SAB-037-1	14.28	85.72														Gl
SAB-037-2	35.81		53.18		11											Sph
SAB-037-3	35.44		53.13		10.52								0.91			Sph
SAB-037-4	13.29	86.71														Gl
SAB-037-5	42.16				57.84											Po
SAB-037-7	32.96			55.77	11.27											Bor
SAB-037-8	34.97		54.22		10.81											Sph
SAB-037-9	21.24				32.6	43.74	2.42									Arspy
SAB-037-10	36.55			52.49	10.96											Bor
SAB-037-11	41.25				58.75											Po
SAB-037-12	21.63				32.51	43.9	1.97									Arspy
SAB-037-13	16.11				15.39	11.41	57.1									Gudm
SAB-037-14	36.86		53.42		9.72											Sph
SAB-037-15	22.11			12.27	5.72		26.13	33.78								Freib
SAB-037-16	21.16				32.67	44.84	1.33									Arspy
SAB-037-17	37.73			32.18	30.09											Cpy
SAB-037-18*	9.83		21.53	36.27	18.47	11.31										Idai
SAB-042-2a	32.71			49.18	11.59			6.52								FcAgPbSe
SAB-042-2b*	6.8			70.08	12.95			6.27								FcAgPbSe
SAB-042-2c*	7.71	2.58		64.86	13.76			6.5								FcAgPbSe
SAB-042-3a	42.01			46.03	11.96											Bor
SAB-042-3b*	49.41			23.47	27.12											Cpy
SAB-042-5a.	24.5			63.78	11.72											Idai
SAB-042-5b	33.69			35.85	30.47											Cpy
SAB-042-5c		81.28		6.57	4.07				6.51			1.57				FcPbSe
SAB-042-6a	1.13							98.87								Agn
SAB-042-6b	25.28			64.11	10.61											Bor

Tabla 8.3. Datos al MEB de minerales metálicos por número de muestra.

Muestra/Punto	S	Fe	Zn	Pb	La	Ce	Nd	O	P	F	Al	Ca	Ti	Si	Mg	Ni	Mineral
SAB-37-6	6.470	5.840	3.790		17.510	46.570		16.660	0.620	2.530							Monazita
SAB-25-13		8.710			3.400	6.210	1.580	44.440			8.550	10.380	1.060	15.680			CalcSil
SAB-035-3c		27.720						27.980			14.720			21.010	8.580		CalcSiMg
SAB-035-3d		3.040						29.200				17.770		36.370	13.620		CalcSiMg
SAB-042-1b		1.420			28.260	38.840		7.500	1.270			5.180		5.670		7.260	CalcSiMg
SAB-042-1a		4.100		8.180		50.970		10.690	2.190	4.610		8.500		10.330		5.050	CalcSiFPNI

Tabla 8.4. Datos por MEB de minerales no metálicos.

8.1 Sulfuros.

Galena.

Como se puede apreciar en los siguientes análisis, se tiene la presencia de galena pura, así como galena con contenidos de plata y selenio, donde se observa que el selenio substituye al azufre (cuando el Selenio rebasa 27% pasa a llamarse clausalita PbSe, lo que no es el caso).

Muestra/Punto	S	Pb	Ag	Fe	Cu	Se	Fórmula estructural
Estándar Ideal	13.600	86.600					
SAB-37-4	13.290	86.710					Pb _{1.00} S _{1.00}
SAB-37-1	14.280	85.720					Pb _{1.04} S _{0.96}
SAB-035-3a	12.090	87.910					Pb _{0.94} S _{1.06}
SAB-030-3b	10.790	87.370					Pb _{0.85} S _{1.07}
SAB-030-4b	10.180	88.330					Pb _{0.82} S _{1.11}
SAB-030-7	9.640	90.360					Pb _{0.82} S _{1.18}
SAB-10-21*	10.310	68.650	10.500	1.700	5.160	3.680	Pb _{0.73} Fe _{0.07} Cu _{0.18} Ag _{0.21} (Se _{0.10} S _{0.71}) _{0.81}

* Se aproxima a una Sulfosal.

Figura 8.5 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de galenas.

Esfalerita.

Este mineral se muestra con respecto al contenido de fierro, valores de Fe hasta rebasar 17% y sólo un punto de esfalerita contiene escaso contenido de Cd.

Muestra/Punto	S	Zn	Fe	Cd	Fórmula estructural
Estándar Ideal	33.06	64.06	2.88		
SAB-020-3a	32.240	67.760			(Zn _{1.02} S _{0.98}
SAB-020-3c	31.470	66.460	2.070		(Zn _{1.00} Fe _{0.04}) _{1.04} S _{0.96}
SAB-37-14	36.860	53.420	9.720		(Zn _{0.76} Fe _{0.16}) _{0.92} S _{1.07}
SAB-37-3	35.440	53.130	10.520	0.910	(Zn _{0.77} Fe _{0.18} Cd _{0.01}) _{0.96} S _{1.05}
SAB-37-8	34.970	54.220	10.810		(Zn _{0.78} Fe _{0.18}) _{0.96} S _{1.03}
SAB-37-2	35.810	53.180	11.000		(Zn _{1.76} Fe _{0.19}) _{0.95} S _{1.05}
SAB-030-6	30.620	57.370	12.010		(Zn _{0.86} Fe _{0.21}) _{1.07} S _{0.93}
SAB-030-1b	30.760	56.830	12.410		(Zn _{0.85} Fe _{0.22}) _{1.07} S _{0.94}
SAB-030-1a	32.220	50.130	17.660		(Zn _{0.73} Fe _{0.30}) _{1.03} S _{0.96}

Figura 8.6 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de esfaleritas.

Pirrotita.

La pirrotita es abundante, generalmente su contenido elemental es muy estable y cercano al estándar ideal, la variación de los contenidos de ambos elementos, en parte se debe a su transformación parcial a escasas marcasita y piritita.

Muestra/Punto	S	Fe	Fórmula estructural
Estándar Ideal	37.670	62.330	
SAB-030-3c	37.350	62.650	Fe _{0.98} As _{1.02}
SAB-035-3b	36.670	63.330	Fe _{1.00} As _{1.00}
SAB-035-1b	36.630	63.370	Fe _{1.00} As _{1.00}
SAB-035-1a	36.380	63.620	Fe _{1.00} As _{1.00}
SAB-37-11	41.250	58.750	Fe _{0.90} As _{1.10}
SAB-37-5	42.160	57.840	Fe _{0.88} As _{1.12}

Figura 8.7 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de pirrotitas.

Arsenopirita.

Este mineral presenta dos polos, uno rico en arsénico que corresponde a la arsenopirita pura, que va variando a fases que se enriquecen en antimonio, hasta llegar a ser Gudmundita, sin haber encontrado una fase que corresponda únicamente al polo con Sb.

Muestra/Punto	S	Fe	As	Sb	Fórmula estructural
Estándar Ideal	19.69	34.30	46.01		
SAB-030-5c	16.620	29.810	49.930		Fe _{0.90} As _{1.12} Sb _{0.87}
SAB-020-1b	17.770	33.150	48.780		Fe _{0.98} As _{1.08} Sb _{0.92}
SAB-10-13	18.060	33.100	48.840		Fe _{0.98} As _{1.08} Sb _{0.93}
SAB-10-12	19.230	33.730	47.050		Fe _{0.99} As _{1.03} Sb _{0.98}
SAB-030-5b	16.090	27.940	47.870	3.860	Fe _{0.86} (As _{1.10} Sb _{0.05}) _{1.15} Sb _{0.86}
SAB-37-12	21.630	32.510	43.900	1.970	Fe _{0.94} (As _{0.95} Sb _{0.03}) _{0.98} Sb _{1.09}
SAB-37-9	21.240	32.600	43.740	2.420	Fe _{0.95} (As _{0.95} Sb _{0.03}) _{0.98} Sb _{1.07}
SAB-37-16	21.160	32.670	44.840	1.330	Fe _{0.95} (As _{0.97} Sb _{0.02}) _{0.99} Sb _{1.07}
SAB-030-5a	18.050	33.160	42.330	3.340	Fe _{0.95} (As _{0.94} Sb _{0.05}) _{0.99} Sb _{0.94}
SAB-020-1a*	1.540	25.620	62.390		Fe _{0.83} As _{1.50} Ca _{0.19} Si _{0.41} Sb _{0.09}

* Presenta Ca (4.130) y Si (6.330), se enmascara porque superpuesta hay un calcosilicato, pero es Arsenopirita

Figura 8.8 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de arsenopiritas.

Gudmundita.

Muestra/Punto	S	Fe	As	Sb	Fórmula estructural
Estándar Ideal	15.29	26.64		58.29	
SAB-37-13	16.110	15.390	11.410	57.100	Fe _{0.59} (Sb _{1.01} As _{0.33}) _{1.34} Sb _{1.08}

Figura 8.9 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de gudmundita.

Lollingita.

Otra fase mineral que contiene arsénico en el yacimiento es la lollingita, la cual es también abundante. Está enriquecida en Hierro y empobrecida en As y en general presentan un poco de azufre, lo que es normal en esta especie mineral. Su presencia es relevante, y se puede distinguir a la lupa por un color más blanco que la arsenopirita (color acero) y generalmente se presenta prismática.

Muestra/Punto	S	Fe	As	Fórmula estructural
Estándar ideal		23.15	72.85	
SAB-10-11		26.790	73.210	Fe _{0.99} As _{2.01}
SAB-10-7	1.360	26.320	72.310	Fe _{0.96} As _{1.96} S _{0.09}
SAB-020-3b	3.410	27.050	69.550	Fe _{0.96} As _{1.86} S _{0.21}
SAB-020-2b	2.510	27.960	69.530	Fe _{1.00} As _{1.85} S _{0.16}

Figura 8.10 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de lollingita.

Calcopirita.

Este mineral se presenta muy claramente, sólo se encontró una fase derivada de la calcopirita con algo de supergénesis, la muestra SA-042-3b tiene reflejos muy endebles de arsénico, así como de plomo que es más relevante por estar en límite con galena o, como se observa al microscopio existe supergénesis a partir de los contactos con galena.

Muestra/Punto	S	Fe	Cu	As	Pb	Fórmula estructural
Estándar ideal	34.94	30.43	34.63			
SAB-035-2a	32.420	31.170	36.420			Cu _{1.07} Fe _{1.04} S _{1.89}
SAB-25-3	38.170	28.310	33.510			Cu _{0.95} Fe _{0.91} S _{2.14}
SAB-25-4	38.310	29.270	32.420			Cu _{0.92} Fe _{0.94} S _{2.14}
SAB-25-9	38.030	29.150	32.820			Cu _{0.93} Fe _{0.94} S _{2.13}
SAB-37-17	37.730	30.090	32.180			Cu _{0.91} Fe _{0.97} S _{2.12}
SAB-10-1	32.150	30.300	37.550			Cu _{1.11} Fe _{1.02} S _{1.88}
SAB-10-3	32.850	30.630	36.520			Cu _{1.07} Fe _{1.02} S _{1.91}
SAB-042-5b	33.690	30.470	35.850			Cu _{1.04} Fe _{1.01} S _{1.95}
SAB-042-3b	49.410	27.120	23.470			Cu _{0.62} Fe _{0.81} S _{2.57}
SAB-10-8	33.290	28.820	36.990	0.900		Cu _{1.08} Fe _{0.96} As _{0.02} S _{1.93}
SAB-10-23	31.800	29.630	34.860		3.710	Cu _{1.05} Fe _{1.02} Pb _{0.03} S _{1.90}

Figura 8.11 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de calcopirita, la muestra SAB-10-8, presenta arsénico como reflejo de la lollingita que embebe.

Bornita.

Muestra/Punto	S	Fe	Cu	Ag	As	Se	Pb	Fórmula estructural
Estándar ideal	25.56	11.13	63.31					
SAB-10-20	29.720	3.180	50.000	1.030		4.170		Cu _{4.07} Fe _{0.29} Ag _{0.05} Se _{0.27} S _{4.80}
SAB-25-8	30.420	13.440	56.140					Cu _{4.26} Fe _{1.16} S _{4.58}
SAB-25-10	29.580	12.490	57.920					Cu _{4.43} Fe _{1.09} S _{4.48}
SAB-37-10	36.550	10.960	52.490					Cu _{3.82} Fe _{0.91} S _{5.27}
SAB-37-7	32.960	11.270	55.770					Cu _{4.16} Fe _{0.96} S _{4.88}
SAB-10-4	22.670	10.780	65.100	1.460				Cu _{3.65} Fe _{1.00} Ag _{0.07} S _{5.29}
SAB-042-3a	42.010	11.960	46.030					Cu _{3.22} Fe _{0.95} S _{5.83}
SAB-10-17	23.280	10.270	59.040	7.410				Cu _{4.87} Fe _{0.96} Ag _{0.36} S _{3.81}
SAB-042-6b	25.280	10.610	64.110					Cu _{5.08} Fe _{0.96} S _{5.08}
SAB-10-9	24.000	11.130	62.210	1.920	0.740			Cu _{5.01} Fe _{1.02} Ag _{0.09} As _{0.05} S _{3.83}
SAB-25-1	28.940	11.790	59.270					Cu _{4.56} Fe _{1.03} S _{4.41}
SAB-10-2	23.340	11.030	65.640					Cu _{5.20} Fe _{0.99} S _{3.67}

Figura 8.12 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de bornitas.

Idaita compleja.

Este mineral es una fase más de cobre.

Muestra/Punto	S	Fe	Cu	Pb	Zn	Ag	As	Na	Fórmula estructural
Estándar ideal	33.99	9.87	56.14						
SAB-042-5a.	24.500	11.720	63.780						Cu _{6.09} Fe _{1.27} S _{4.64}
SAB-10-6	21.420	13.000	58.980	6.600					Cu _{5.99} Fe _{1.50} Pb _{0.21} S _{4.31}
SAB-10-5	13.940	2.920	48.010	35.130					Cu _{6.42} Fe _{0.44} Pb _{1.44} S _{3.69}
SAB-37-18	9.830	18.470	36.270		21.530		11.310	2.590	Cu _{3.80} Fe _{2.20} Zn _{2.19} As _{1.01} Na _{0.75} S _{2.04}

Figura 8.13 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de idaitas.

Fases minerales complejas de cobre/plata/plomo/selenio, ricas en Cu.

Muestra/Punto	S	Fe	Cu	Ag	Pb	O	Ca	Si
SAB-042-2a	32.710	11.590	49.180	6.520				
SAB-042-2b	6.800	12.950	70.080	6.270		1.210	1.150	1.520
SAB-042-2c	7.710	13.760	64.860	6.500	2.580	1.280	1.450	1.850
SAB-10-18	4.370	11.150	76.000	7.370				

Figura 8.14 MEB Fases ricas en Cu sin fórmula estructural precisa.

Fases minerales complejas ricas en Pb/Se con S.

Muestra-Punto	S	Fe	Cu	Pb	Se	Ca	Si	P
SAB-10-15	8.340	1.960	5.930	73.760	4.320	2.020	2.440	1.230

Figura 8.15 MEB Fases ricas en Pb/Se con S sin fórmula estructural precisa.

Fases minerales complejas de Pb/Se sin S, (seleniuro de plomo).

Muestra-Punto	Fe	Cu	Pb	Se	Sr	Fórmula estructural
SAB-042-5c	4.070	6.570	81.280	6.510	1.570	Pb _{1.17} Cu _{0.31} Fe _{0.22} Sr _{0.05} Se _{0.25}

Figura 8.16 MEB Fases ricas en Pb/Se sin S con fórmula estructural muy aproximada.

Digenita/covelita.

Muestra-Punto	S	Fe	Cu	Ag	Pb	Fórmula estructural
Estándar ideal	21.90		78.10			Digenita
Estándar ideal	33.54		66.46			Covelita
SAB-10-24	22.350	11.110	60.050	3.020	3.470	Digenita (Cu ₉ S ₅): Cu _{7.02} Fe _{1.48} Ag _{0.21} Pb _{0.12} S _{5.18} Covelita (CuS): Cu _{1.00} Fe _{0.21} Ag _{0.03} Pb _{0.09} S _{0.74}

Figura 8.17 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de digenita/covelita.

8.2 Sulfosales.

Roquesita.

Muestra-Punto	S	Fe	Cu	In	Fórmula estructural
Estándar ideal	26.45		26.20	47.35	
SAB-25-7	29.010	5.730	25.670	39.590	Cu _{0.92} In _{0.79} Fe _{0.23} S _{2.06}
SAB-25-11	27.490	2.190	25.560	44.770	Cu _{0.95} In _{0.92} Fe _{0.09} S _{2.03}

Figura 8.18 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de roquesita.

Stromeyerita.

Muestra-Punto	S	Fe	Cu	Ag	As	Fórmula estructural
Estándar ideal	15.760		31.230	53.010		
SAB-10-10	16.930	2.510	24.040	45.570	6.950	Ag _{0.86} Fe _{0.09} Cu _{0.77} As _{0.19} S _{1.08}

Figura 8.19 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de stromeyerita.

Freibergita.

Muestra-Punto	S	Fe	Cu	Ag	Sb	As	Fórmula estructural
Estándar ideal	21.60	3.47	11.86	40.25	18.93	3.88	El Sb y As varía por ser solución sólida. En esta fórmula ideal el As es de: 3.88
SAB-030-4a	19.910	6.960	1.730	30.220	26.190		Ag _{6.41} Fe _{2.85} Cu _{0.62} Sb _{4.19} S _{14.20}
SAB-030-3a	20.020	7.480	17.700	29.120	25.680		Ag _{4.03} Fe _{2.56} Cu _{5.32} Sb _{4.03} S _{11.93}
SAB-037-15	22.110	5.720	12.270	33.780	26.130		Ag _{6.00} Fe _{1.96} Cu _{3.70} Sb _{4.11} S _{13.22}

Figura 8.20 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de freibergita.

Naumannita.

Muestra-Punto	Fe	Cu	Ag	Se	Fórmula estructural
Estándar ideal			73.21	26.79	
SAB-25-6	1.370	3.490	70.680	24.460	Ag _{1.88} Fe _{0.07} Cu _{0.16} Se _{0.89}

Figura 8.21 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de naumannita.

Mckinstryita.

Muestra-Punto	S	Fe	Cu	Ag	Se	Fórmula estructural
Estándar ideal	15.10		23.94	60.96		
SAB-10-19	12.860	2.900	29.620	52.570	2.050	Ag _{1.02} Cu _{0.98} Fe _{0.11} Se _{0.05} S _{0.84}

Figura 8.22 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de Mckinstryita.

Miharaita.

Este mineral es raro y muy complejo, encontrándose como inclusiones en la galena. Ha sido reportado en la bibliografía como presente en diseminación en depósitos de skarn tipo hedenbergita, granate-epidota.

Muestra-Punto	S	Fe	Cu	Pb	Ag	As	Bi	Fórmula estructural
Estándar ideal	20.94	6.08	27.67	22.56			22.75	
SAB-10-14	12.320	1.520	36.800	22.810	0.280	2.570	23.700	Cu _{6.02} Fe _{0.28} Pb _{1.14} Bi _{1.18} As _{0.36} Ag _{0.03} S _{6.02}

Figura 8.23 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de Miharaita.

Mineral complejo de Ag/Se Aguilarita con exsoluciones de mineral de In.

Muestra-Punto	S	Cu	Ag	Se	In	Fórmula estructural
SAB-25-2	9.510	7.830	51.490	16.950	14.230	$Cu_{0.60}In_{0.60}Ag_{2.32}Se_{1.04}S_{1.44}$

Figura 8.24 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de mineral complejo de Ag/Se aguilarita con exsoluciones de elemento Indio.

Plata Nativa.

Muestra-Punto	S	Cu	Ag	Fórmula estructural
Estándar ideal			100.000	
SAB-042-6a	1.130		98.870	$Ag_{0.96}S_{0.04}$
SAB-10-16	4.330	9.020	86.650	$Ag_{0.74}Cu_{0.13}S_{0.13}$

Figura 1 MEB: cálculo de fórmulas estructurales de plata nativa

Figura 8.25 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de plata nativa.

8.3 Óxidos.

Casiterita.

Muestra-Punto	Fe	Sn	O	Fórmula estructural
Estándar ideal		78.77	21.23	
SAB-25-5	0.720	58.140	41.140	$Sn_{0.48}Fe_{0.01}O_{2.51}$
SAB-25-12	0.450	68.060	31.480	$Sn_{0.67}Fe_{0.01}O_{2.32}$

Figura 8.26 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de casiterita.

Fosfatos.

Muestra-Punto	S	Fe	Zn	La	Ce	Nd	Th	O	P	F
Monazita-La				28.95	14.60	12.02	4.89	26.68	12.02	
Monazita-Nd				14.43	11.64	29.96	4.82	26.59	9.65	
Monazita-Ce				14.46	29.17	12.01	4.83	26.64	12.89	
Rhabdophana-Ce				13.74	41.57			31.64	12.25	
SAB-37-6	6.470	5.840	3.790	17.510	46.570			16.660	0.620	2.530

Figura 8.27 MEB Cálculo de fórmulas estructurales de monazita.

8.4 Silicatos.

Calcosilicoaluminatos con REE.

Muestra-Punto	Fe	La	Ce	Nd	O	Al	Ca	Ti	Si
SAB-25-13	8.710	3.400	6.210	1.580	44.440	8.550	10.380	1.060	15.680

Figura 8.28 MEB Calcosilicoaluminatos con REE sin fórmula estructural precisa.

Calcosilicatos con Mg.

Muestra-Punto	Fe	O	Al	Ca	Si	Mg
Tremolita		47.27		9.86	27.66	14.96
Actinolita	8.50	45.01	1.39	8.60	25.64	9.71
SAB-035-3d	3.040	29.200		17.770	36.370	13.620
SAB-035-3c	27.720	27.980	14.720		21.010	8.580

Figura 8.29 MEB Calcosilicoaluminatos con Mg sin fórmula estructural precisa.

Calcosilicatos con flúor, fósforo, níquel y REE.

Muestra-Punto	Fe	Pb	La	Ce	Th	O	Ca	Si	P	F	Ni
SAB-042-1b	1.420		28.260	38.840		7.500	5.180	5.670	1.270	4.610	7.260
SAB-042-1a	4.100	8.180		50.970		10.690	8.500	10.330	2.190		5.050

Figura 8.30 MEB Calcosilicoaluminatos con REE sin fórmula estructural precisa.

La relación textural de las fases minerales es muy importante, para poder reconformar la paragénesis preliminar, encontrándose lo siguiente:

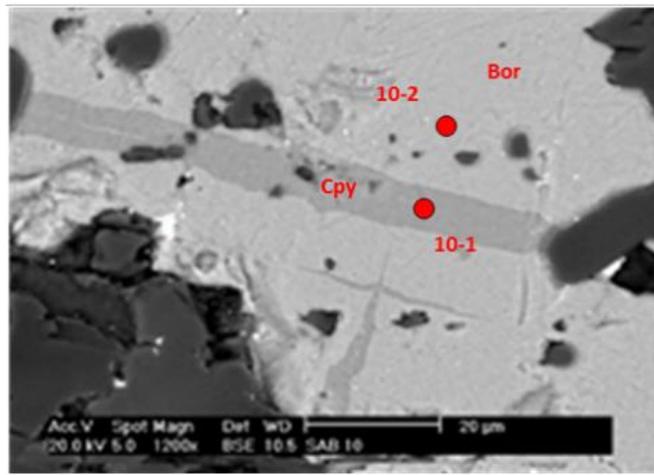


Figura 8.31 MEB Bornita, Calcopirita SAB-010, Imagen con electrones retrodispersados mostrando la relación de bornita y calcopirita depositado en las zonas craqueladas, por lo que su cronología para las muestras estudiadas es posterior a la bornita.

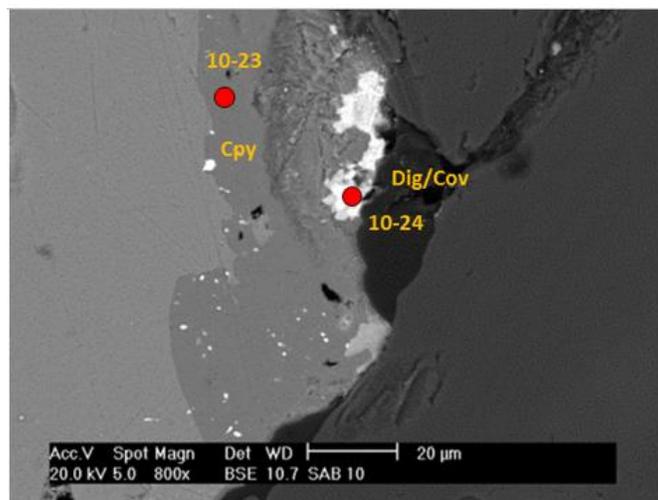


Figura 8.32 MEB Covelita, Digenita SAB-010, Imagen con electrones retrodispersados mostrando la presencia de covelita/digenita en los bordes de la alteración de calcopirita.

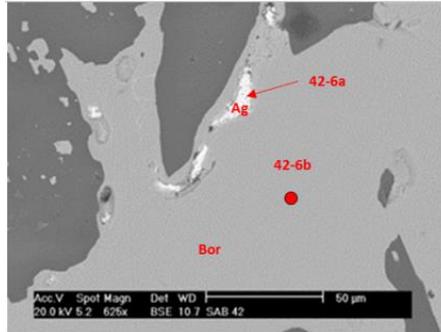


Figura 8.33 MEB Plata Nativa SAB-042, Imagen con electrones retrodispersados mostrando plata nativa en las zonas de debilidad de la bornita.

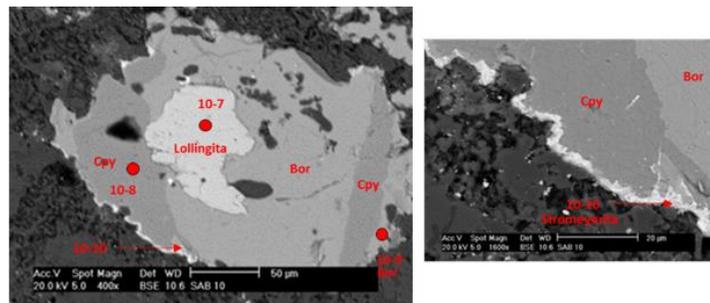


Figura 8.34 MEB Lollingita, calcopirita, bornita, estromeyerita SAB-010, Imagen con electrones retrodispersados mostrando bornita embebiendo a la lollingita, bornita con calcopirita en zonas de debilidad. Se muestra la presencia en los bordes de estromeyerita (sulfuro de plata y cobre), lo que confirma la presencia tardía de las fases con plata.

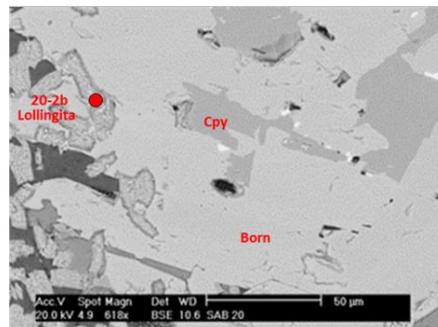


Figura 8.35 MEB Lollingita, bornita SAB-020, Imagen con electrones retrodispersados mostrando baguetes prismáticas de lollingita embebidas en la bornita, la cual tiene en sus fracturas calcopirita.

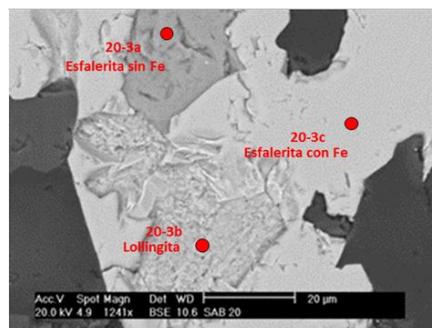


Figura 8.36 MEB Lollingita, esfalerita SAB-020, Imagen con electrones retrodispersados mostrando otro detalle de la lollingita embebida en esfalerita con hierro y asociada a otra sin hierro.

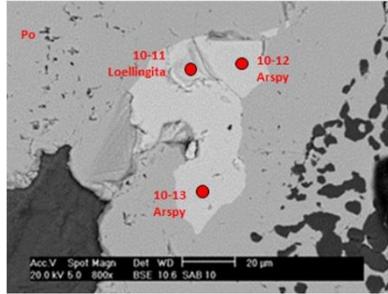


Figura 8.37 MEB Lollingita, arsenopirita SAB-010, Imagen con electrones retrodispersados mostrando lollingita derivada de arsenopirita, embebidas en pirrotita.

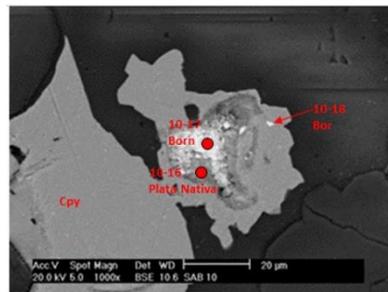


Figura 8.38 MEB Bornita, plata nativa SAB-010, Imagen con electrones retrodispersados, mostrando un hueco en granate donde se encuentra el depósito de calcopirita, la cual contiene en el centro bornita en proceso de supergénesis con un halo de plata nativa.

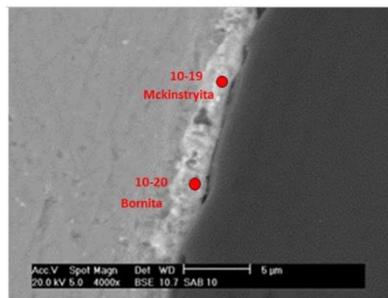


Figura 8.39 MEB Mckinstryita, bornita SAB-010, Imagen con electrones retrodispersados mostrando una orilla en proceso de supergénesis, enriquecida en plata bajo la forma de Mckinstryita asociada a una fase supergenizada de bornita.

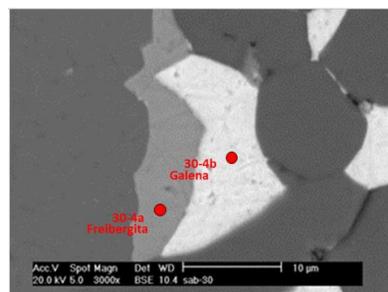


Figura 8.40 MEB Galena, freibergita SAB-010, Imagen con electrones retrodispersados mostrando una oquedad en granate rellena de galena y en su contacto se deposita la freibergita (es una tetraedrita, pero con el 30.22% de plata).

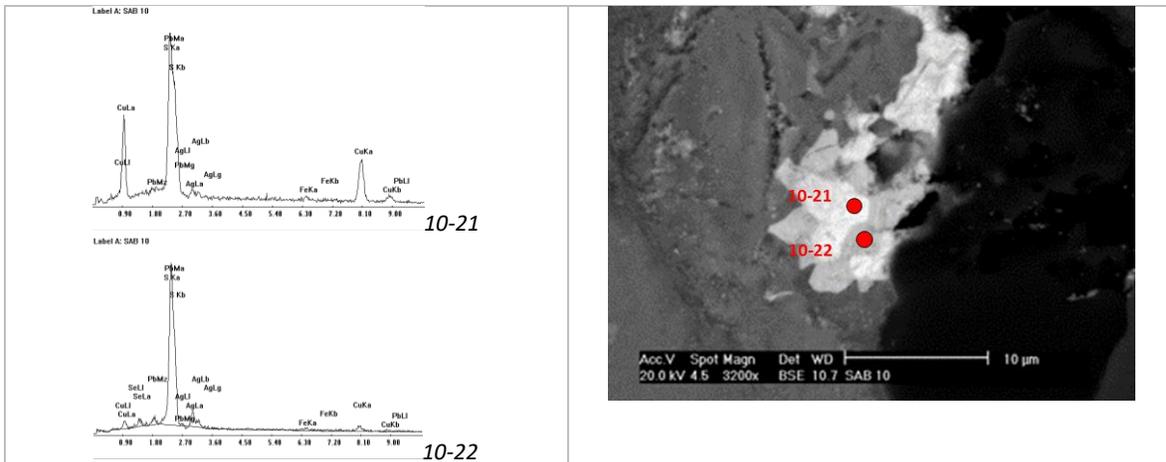


Figura 8.41 MEB Galena con variaciones en Cu, Pb, Ag, Se SAB-010, Imagen con electrones retrodispersados mostrando dos fases minerales que reflejan en la 10-21 una composición cercana a la galena, cambiando la coloración de la fase a 10-22 disminuye el cobre y el plomo, aumentando la plata y el selenio, lo que puede ser el reflejo de naumanita por y/o aguilarita.

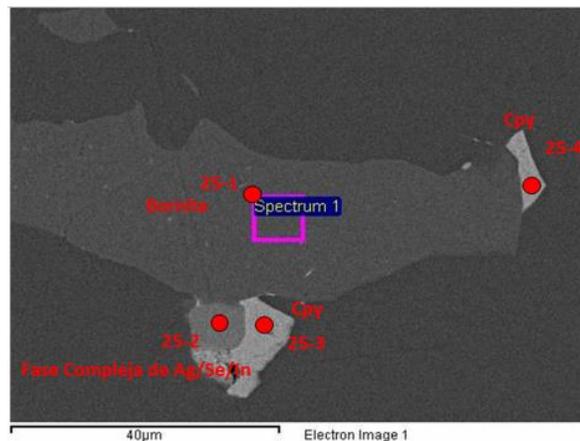


Figura 8.42 MEB Aguilarita/naumanita SAB-025, Imagen con electrones retrodispersados mostrando bornita. En sus contactos se observa el depósito de calcopirita y una fase compleja de aguilarita-naumanita con altos contenidos de indio.

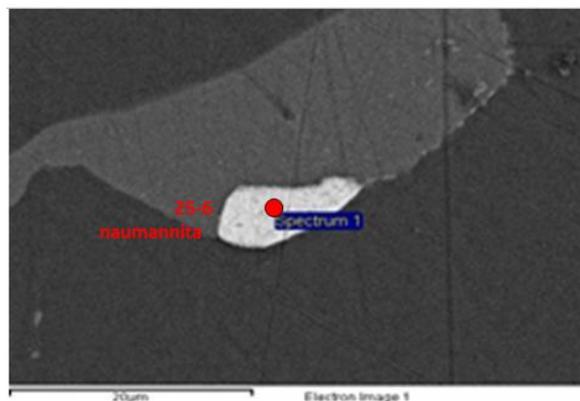


Figura 8.43 MEB Naumanita SAB-025, Imagen con electrones retrodispersados mostrando un borde relleno de naumanita.

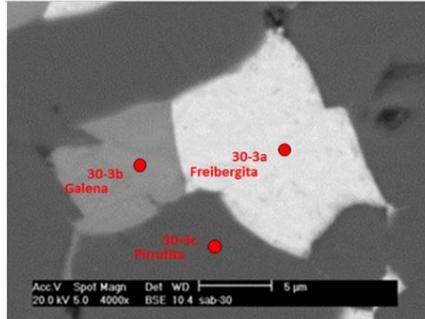


Figura 8.44 MEB Pirrotita, galena, freibergita SAB-030, Imagen con electrones retrodispersados mostrando en una oquedad de pirrotita, el emplazamiento de galena en contacto con freibergita (tetraedrita con 29% de plata).

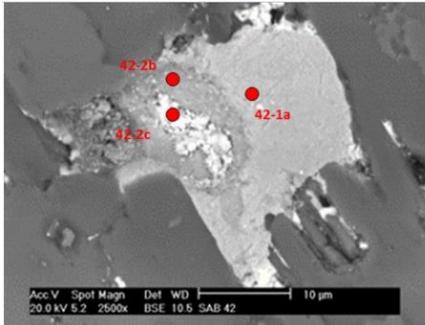


Figura 8.45 MEB Fases complejas con variaciones en Ag, Cu SAB-042, Imagen con electrones retrodispersados mostrando una oquedad en calcosilicatos con fases minerales de cobre con plata, donde 42-1a es más cercana a calcopirita, 42-1b está enriquecida en Cu y empobrecida en S al igual que el 42-2c. Todas las fases son complejas y corresponden a intervalos supergenizados con contenidos de Ag.

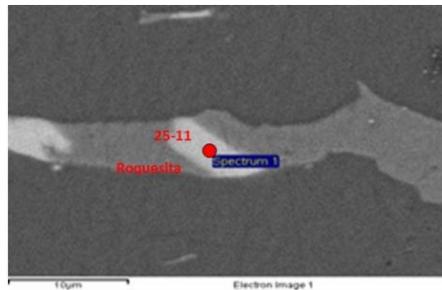


Figura 8.46 MEB Roquesita SAB-025, Imagen con electrones retrodispersados mostrando una fractura en calcopirita, rellena de bornita en transición a roquesita. Esta muestra reviste gran importancia dado que la cantidad de Indio es anómala en estas fases (39.590% a 44.770% de la composición de su estructura mineral).

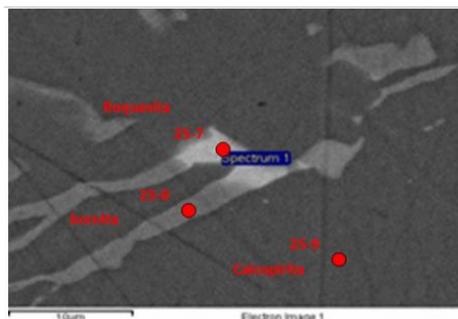


Figura 8.47 MEB Roquesita, bornita, calcopirita SAB-025, Imagen con electrones retrodispersados mostrando una fractura en calcopirita rellena de bornita en transición a roquesita. Esta muestra reviste gran importancia dado que la cantidad de indio es relevante en estas fases (39.590% a 44.770% de la composición de su estructura mineral).

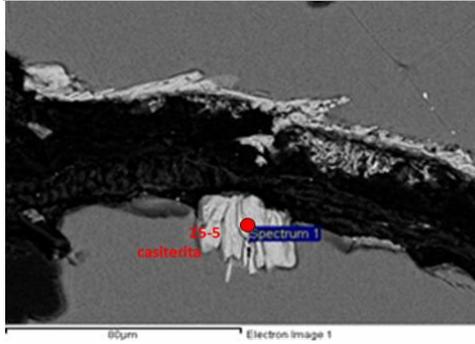


Figura 8.48 MEB Casiterita SAB-025, Imagen con electrones retrodispersados mostrando fracturamiento con relleno de casiterita. La muestra que reviste gran importancia por contener óxidos de estaño en vetillas dentro del yacimiento.

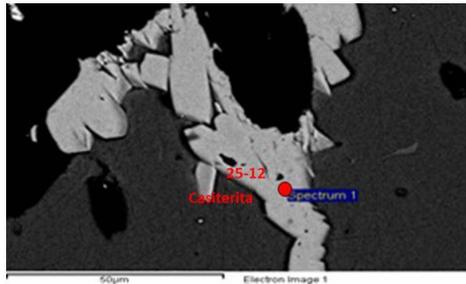


Figura 8.49 MEB Casiterita SAB-025, Imagen con electrones retrodispersados mostrando fracturamiento con relleno de casiterita. Muestra que reviste gran importancia por contener óxidos de estaño en vetillas dentro del yacimiento.

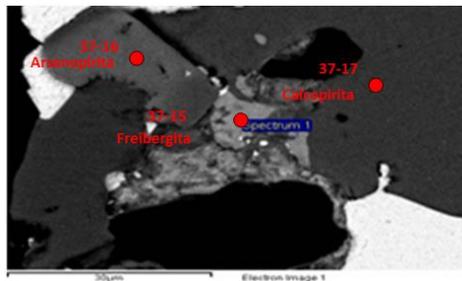


Figura 8.50 MEB Calcopirita, arsenopirita SAB-037, Imagen con electrones retrodispersados mostrando calcopirita embebiendo arsenopirita y en sus oquedades se observa freibergita (tetraedrita con 33.780% de Ag).

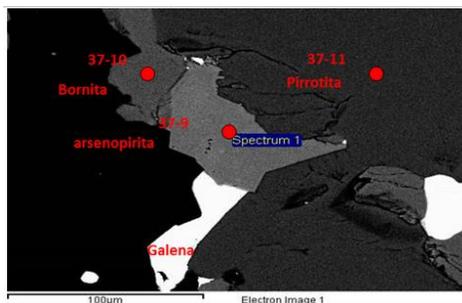


Figura 8.51 MEB Arsenopirita, pirrotita, bornita, galena SAB-037, Imagen con electrones retrodispersados mostrando arsenopirita afectando a pirrotita y en contacto con bornita y galena.

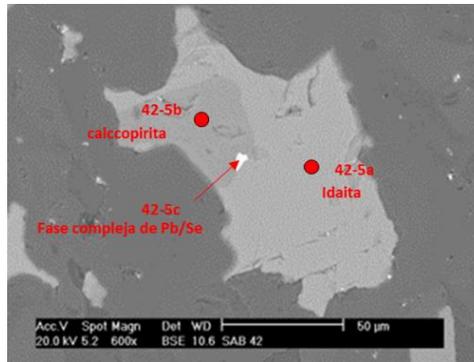


Figura 8.52 MEB Calcopirita, idaita, fase compleja Pb/Se SAB-037, Imagen con electrones retrodispersados mostrándola conversión de calcopirita en idaita. Además de contener inclusiones de fases complejas de Pb/Se, fases complejas de sulfosales.

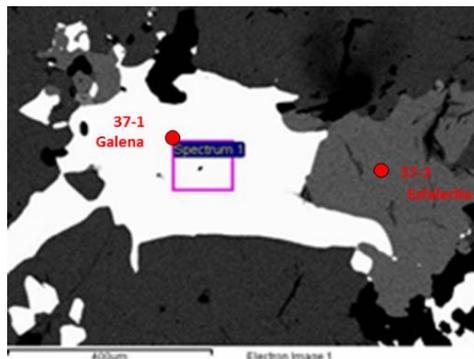


Figura 8.53 MEB Galena, esfalerita SAB-037, Imagen con electrones retrodispersados mostrando como la galena afecta a la esfalerita.

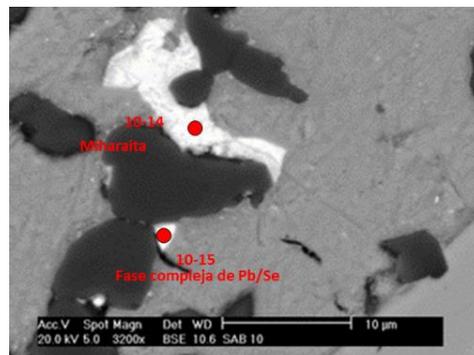


Figura 8.54 MEB Miharaita, fase compleja de Pb/Se SAB-010, Imagen con electrones retrodispersados mostrando el depósito de miharaita con 23.70% de Bi, depositado en una oquedad, así como una fase compleja de Pb/Se derivado de una sulfosal.

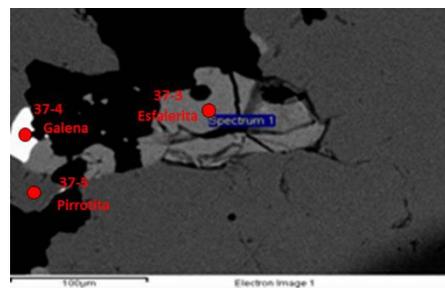


Figura 8.55 MEB Pirrotita, galena, esfalerita SAB-037, Imagen de pirrotita asociada a esfalerita y galena.

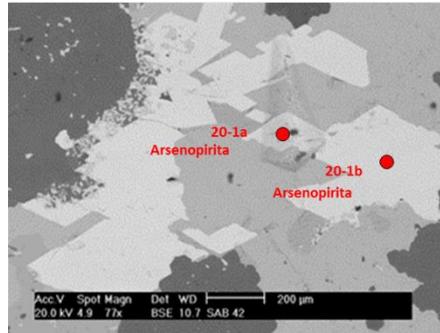


Figura 8.56 MEB Arsenopirita SAB-042, Imagen con electrones retrodispersados mostrando arsenopirita, donde en el punto 20-1a presenta enmascaramiento de S por un calcosilicato, por lo que el análisis registra Ca y Si.

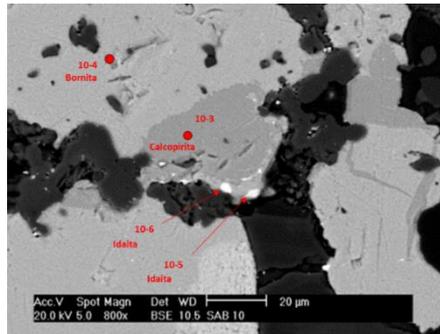


Figura 8.57 MEB Calcopirita, idaita SAB-010, Imagen con electrones retrodispersados mostrando bornita con desarrollo de calcopirita con puntos de idaita.

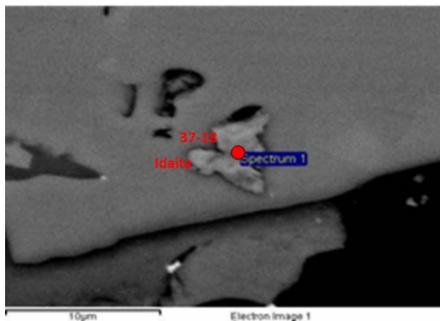


Figura 8.58 MEB Idaita SAB-037, Imagen con electrones retrodispersados mostrando una oquedad con idaita perfectamente individualizada, donde se aprecia una textura indefinida, típica de fases secundarias.

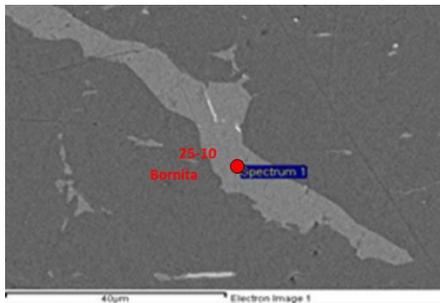


Figura 8.59 MEB Bornita SAB-025, Imagen con electrones retrodispersados mostrando una fractura en calcopirita rellena de bornita.

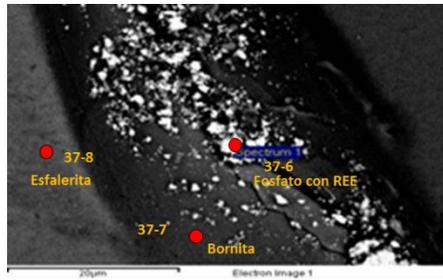


Figura 8.60 MEB Esfalerita, bornita, fosfato con REE SAB-037, Imagen con electrones retrodispersados mostrando esfalerita en contacto con bornita, que tienen embebidos fosfatos con evidentes tierras raras, La y Ce con 17.510% y 46.570% respectivamente.

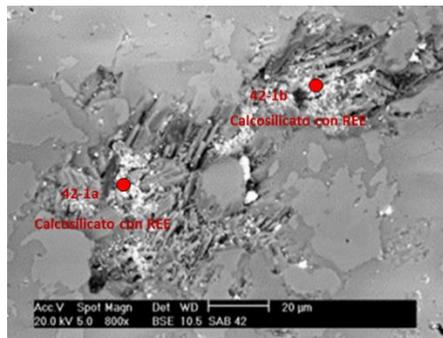


Figura 8.61 MEB Calcosilicato con REE SAB-042. Imagen con electrones retrodispersados mostrando otro calcosilicato con tierras raras en SAB-042-1b, La, Ce con 28.260% y 38.840% respectivamente y en SAB-042-1a, La 50.970%.

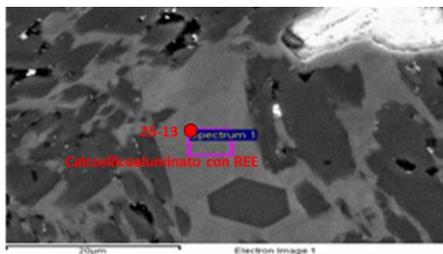


Figura 8.62 MEB Calcosilicoaluminato con REE SAB-025, Imagen con electrones retrodispersados mostrando silicato con tierras raras, La, Ce, Nd; 3.400%, 6.210%, 1.580% respectivamente.

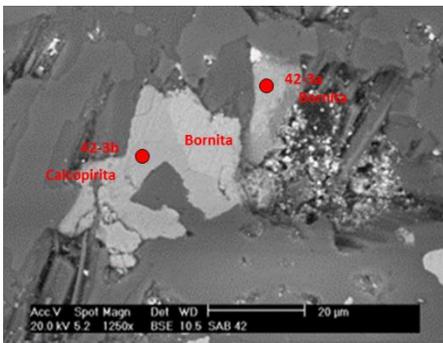


Figura 8.63 MEB Calcopirita, bornita SAB-042, Imagen con electrones retrodispersados mostrando en oquedades de calcosilicatos desarrollo de calcopirita y bornita con algún grado de alteración.

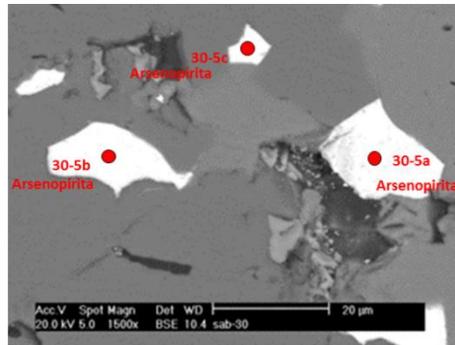


Figura 8.64 MEB Arsenopirita SAB-030, Imagen con electrones retrodispersados mostrando arsenopirita en zonas de debilidad de minerales transparentes.

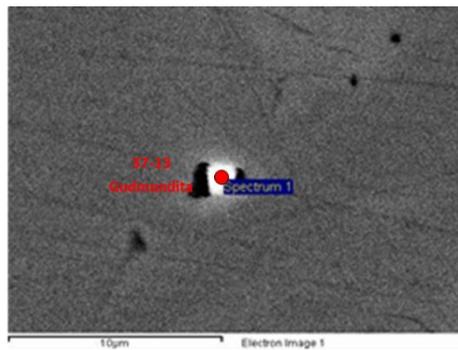


Figura 8.65 MEB Gudmundita SAB-037, Imagen con electrones retrodispersados mostrando Gudmundita en oquedad de pirrotita.

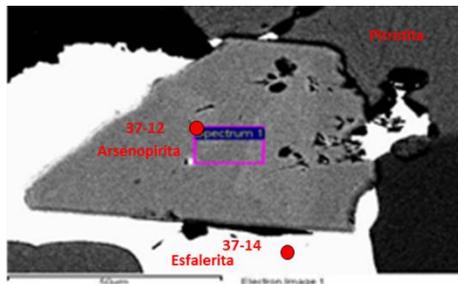


Figura 8.66 MEB Pirrotita, arsenopirita, esfalerita SAB-037, Imagen con electrones retrodispersados mostrando arsenopirita embebida en galena que afecta a pirrotita.

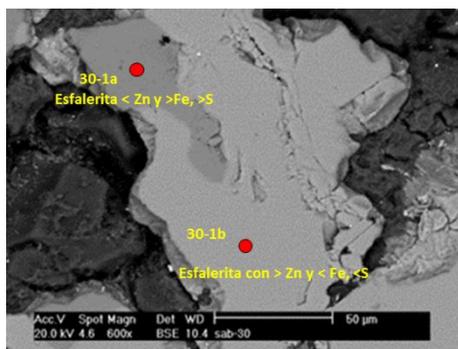


Figura 8.67 MEB Esfalerita SAB-030, Imagen con electrones retrodispersados mostrando la coexistencia de esfalerita con más y menos Fe.

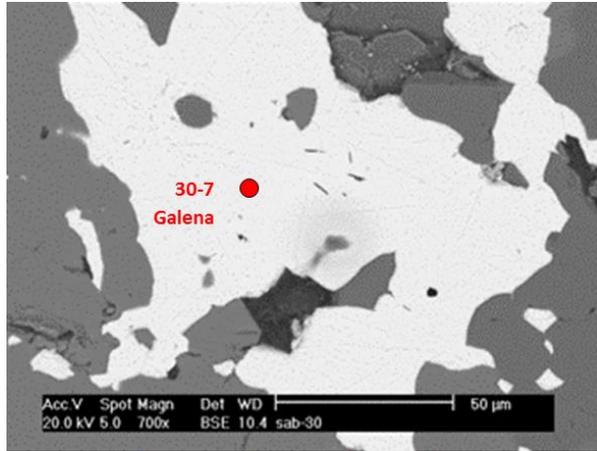


Figura 8.68 MEB Galena SAB-030, Imagen con electrones retrodispersados mostrando galena.

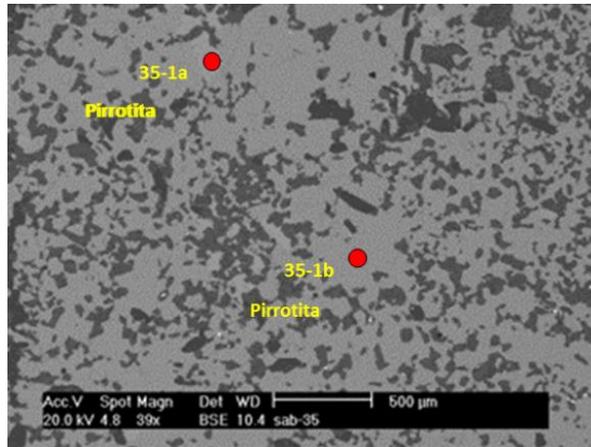


Figura 8.69 MEB Pirrotita SAB-035, Imagen con electrones retrodispersados mostrando pirrotita.

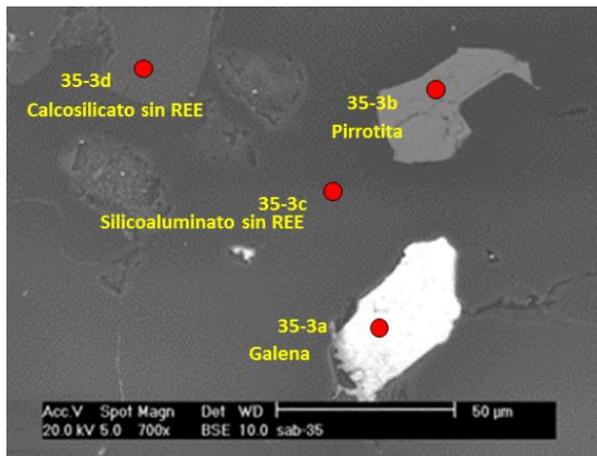


Figura 8.70 MEB Calcosilicato y silicoaluminato sin REE, pirrotita, galena SAB-035, Imagen con electrones retrodispersados mostrando calcosilicato y silicoaluminato sin tierras raras, pirrotita y galena.

9. Difracción de Rayos X.

El estudio de rayos X se realizó sobre 10 muestras, para el reconocimiento de fases minerales no clasificables al microscopio óptico o bien para precisar variaciones mineralógicas. La lectura del análisis fue realizada con tubo de cobalto 1.789010Å.

Los resultados registrados se resumen en la tabla 9.1 y permite confirmar algunas fases minerales, como son la esfalerita pura y sus variantes con hierro, cadmio o bien manganeso.

Se determina una nueva fase mineral no reportada con anterioridad que corresponde a la ferrokesterita (Figura 9.1 y 9.6), la cual es una fase que contiene estaño en su fórmula estructural, lo que torna la firma del yacimiento siendo el estaño es evidencia de una contaminación cortical.

La complejidad de la interpretación es que el yacimiento contiene generalmente fases minerales en solución sólida, lo que da esquemas de variación de los ejes de las intensidades en hkl.

Se confirma que el granate va de andradítico a grosularítico ferrífero (Figura 9.2, 9.9 y 9.10) y la presencia de calcita, pero es de gran importancia que la estructura mineral es de gran tendencia a contenidos de magnesio, por lo que se tiene una gran presencia de dolomita con variaciones a calcita manganesica, (Figura 9.8). Es importante mencionar que esta fase mineral al microscopio es imposible determinarla dado que es una solución sólida que no presenta diferencias ópticas; también se confirma la galena pura, con variaciones a galena bismutinífera y la presencia de tetrahedrita (Figura 9.3), covelita (Figura 9.4) y wollastonita (Figura 9.5).

Muestras Analizadas por DRX (Difracción de Rayos X)		
Muestra	Clasificación	Fases Detectadas por DRX
SAB-010	Skarn de granate con sulfosales y calcopirita.	Esfalerita con cadmio, esfalerita pura, ferrokesterita, esfalerita con manganeso.
SAB-024	Skarn en contacto con intrusivo con sulfosales.	Grosularita ferrífera.
SAB-025	Skarn de actinolita, calcopirita.	Tetrahedrita, calcopirita.
SAB-027	Skarn de granate sericitizado y silicificado.	Covelita, dolomita.
SAB-032	Skarn de granate con diópsida, anfíbol y vetillas de sulfuro de cobre.	Esfalerita pura (wurtzita), wollastonita, dolomita.
SAB-038	Skarn de grano muy fino con mx de cobre bandeada.	Ferrokesterita.
SAB-039	Cuerpo mineralizado en zona de skarn, relictos de granate y anfíboles, pirrotita.	Galena pura, galena bismutinífera, esfalerita ferrífera.
SAB-042	Skarn de grano muy fino con mx tardía en calcita de galena.	Calcita manganesífera, andradita ferrífera.
SAB-047	skarn triturado, mineralización tardía: arsenopirita, esfalerita, calcopirita, plata nativa filiforme y argentita.	Andradita ferrífera.
SAB-049	Sigmoide relleno de calcita con sulfosales de cobre en fracturas.	Dolomita.

Tabla 9.1 DRX Muestras para difracción de rayos X para determinar fases no detectadas con MEB.

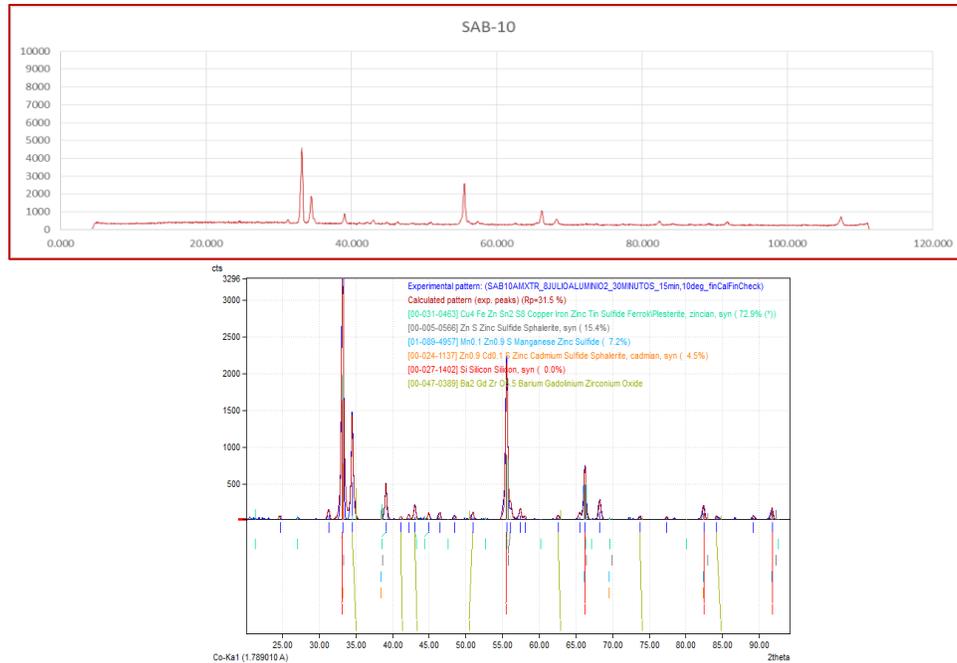


Figura 9.1 DRX Muestra SAB-010. En la determinación de los patrones de difracción, este espectro es complejo, sin embargo, se reconoce ferrokesterita ($\text{Cu}_4\text{FeZnSn}_2\text{S}_8$) en un 72.9% lo que reviste suma importancia, dado que en el MEB se detectó casiterita, lo que implica que el sistema de skarn también está contaminado por estaño. El Sn, se detectó en otra muestra en calidad de cristales de óxido de Sn que se observa se emplaza en fracturas y oquedades. Así mismo, se detecta esfalerita con cadmio ($\text{Zn}_{0.9}\text{Cd}_{0.1}\text{S}$) en un 4.5%, esfalerita pura (ZnS) en un 15.4% y esfalerita manganesífera ($\text{Zn}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{S}$) en un 7.2%. La importancia también la reviste el hecho de encontrar una gran gama de variación en la esfalerita del skarn. Por ser un análisis semicuantitativo se descarta la esfalerita con cadmio por ser un porcentaje bajo.

Esfalerita con cadmio (hkl generados por entrada de software).

d [Å]	Int.	hkl
3.133000	100	1 1 1
1.921000	50	2 2 0
1.638000	30	3 1 1

Esfalerita pura (hkl generados por entrada de software).

d [Å]	Int.	hkl
3.123000	100	1 1 1
1.912000	51	2 2 0
1.633000	30	3 1 1

Ferrokensterita (hkl generados por entrada de software).

d [Å]	Int.	hkl
3.134000	100	1 1 2
1.919500	45	2 0 4
1.636500	25	3 1 2

Esfalerita con manganeso.

d [Å]	Int.	hkl
3.137900	999	1 1 1
1.921560	501	2 2 0
1.638710	293	3 1 1

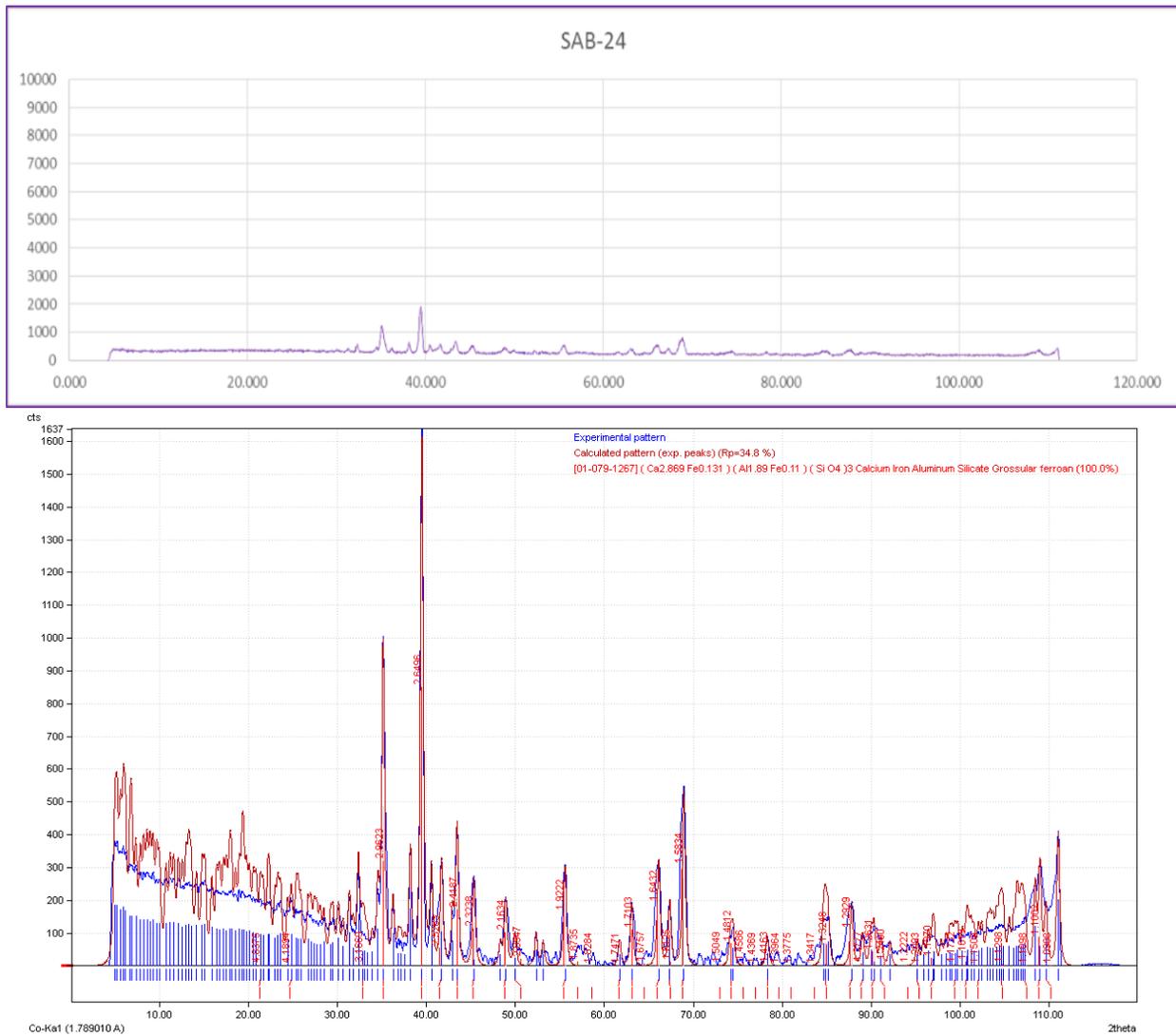


Figura 9.2 DRX Muestra SAB-024. En esta muestra, el espectro muestra la presencia de grosularita ferrífera (Ca_{2.869}Fe_{0.131}) (Al_{1.89}Fe_{0.11}) (SiO₄)₃. Existen algunos reflejos de Ti en la grosularia, la muestra permite reconocer en el sistema de skarn la presencia de grosularita ferrífera, pero realmente varía a andradita ferrífera en otras muestras.

Grosularita ferrífera.

d [Å]	Int.	hkl
2.962330	377	4 0 0
2.649580	999	4 2 0
1.583430	361	6 4 2

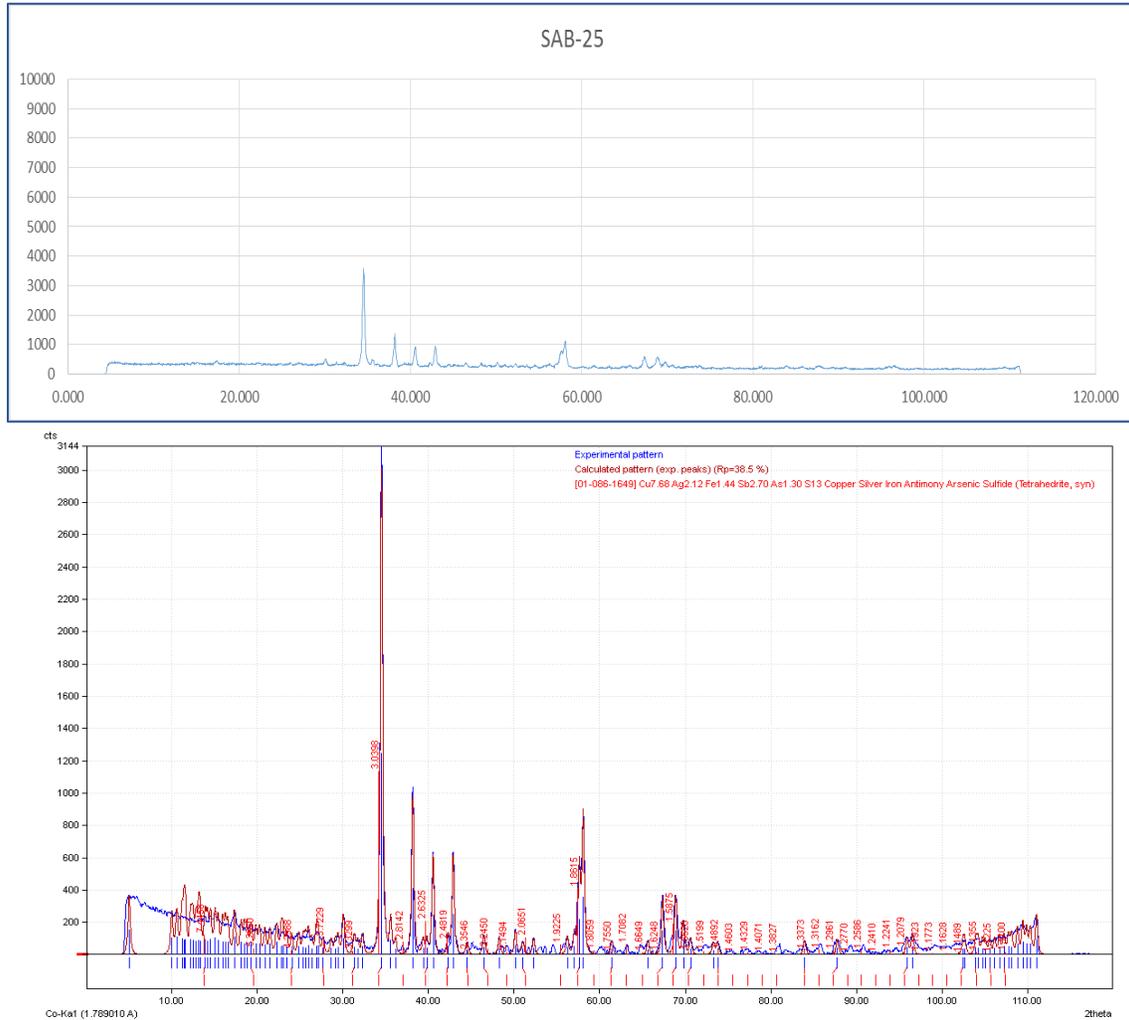


Figura 9.3 DRX Muestra SAB-025. En esta muestra, el espectro refleja la presencia de abundante tetrahedrita que por las características de la ficha que empata los picos de la distancia interplanar la fórmula más cercana es $\text{Cu}_{7.68}\text{Ag}_{2.12}\text{Fe}_{1.44}\text{Sb}_{2.70}\text{As}_{1.30}\text{S}_{13}$. Se detecta también calcopirita, pero enmascarada por los picos de la tetrahedrita. Esta muestra presenta claramente la presencia de tetrahedrita y calcopirita. Dicha tetrahedrita, en otras muestras presenta un enriquecimiento en plata por lo que al microscopio óptico se observa una superficie rayada por su contenido de plata y corresponde a freibergita.

Tetrahedrita.

d [Å]	Int.	hkl
3.039750	999	2 2 2
1.861460	360	4 4 0
1.587460	168	6 2 2

Calcopirita (hkl generados por entrada de software).

d [Å]	Int.	hkl
1.852600	16	2 2 0
1.836500	32	2 0 4
1.577400	20	3 1 2
1.066500	16	4 2 4

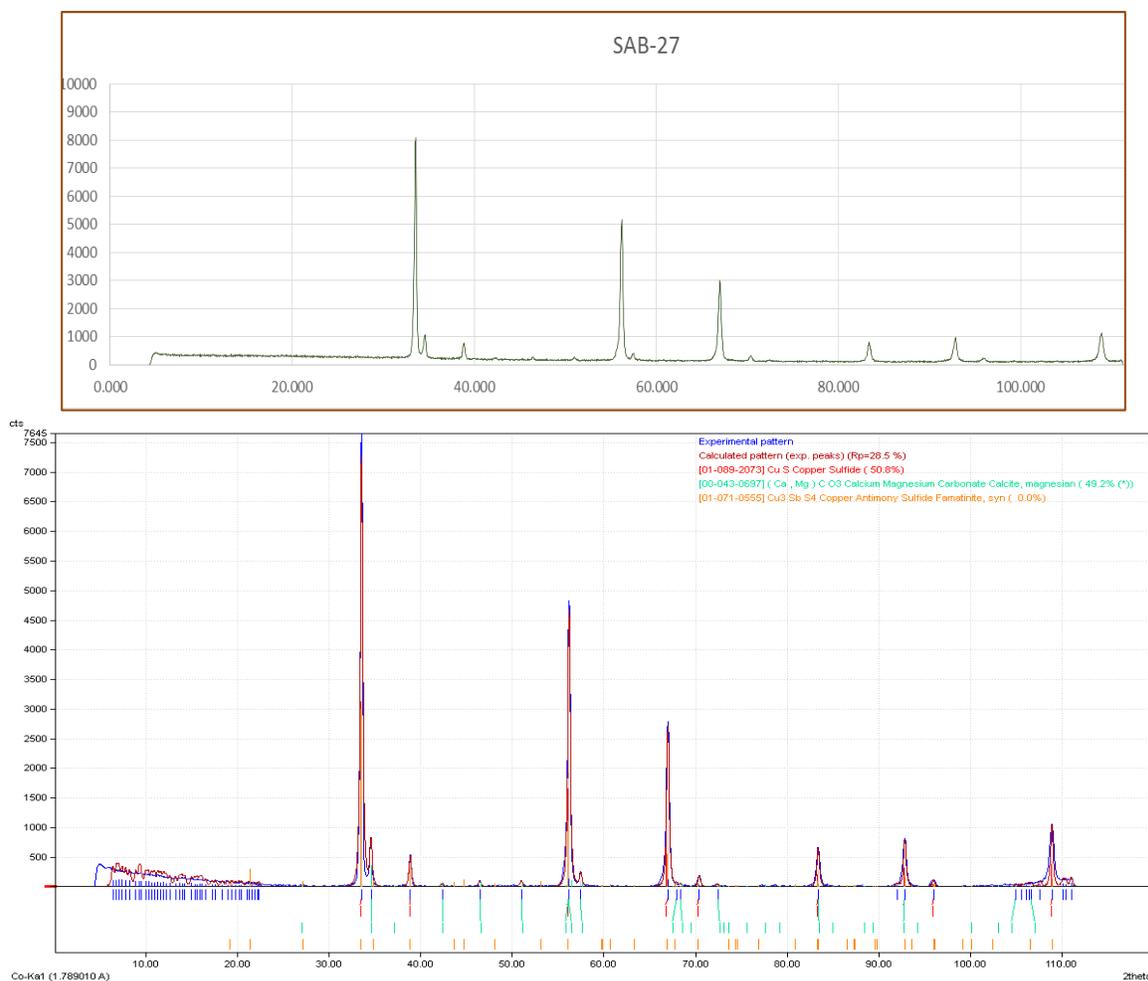


Figura 9.4 DRX Muestra SAB-027. En la determinación de los patrones de la difracción, el espectro muestra la presencia de covelita (CuS) y dolomita $(\text{CaMg})\text{CO}_3$ en una proporción cualitativa del 49%, la importancia es la confirmación de la presencia de dolomita en cristalización tardía acompañando a la calcita en relleno de oquedades y fracturas. En esta muestra se reconoce la presencia de la covelita, así como de la constante presencia de dolomita.

Covelita.

d [Å]	Int.	hkl
3.110190	999	1 1 1
1.904590	531	2 2 0
1.624240	316	3 1 1

Dolomita.

d [Å]	Int.	hkl
3.018190	999	1 0 4
2.272170	176	1 1 3
1.901030	181	0 1 8
1.864700	189	1 1 6



Figura 9.5 DRX Muestra SAB-032. El espectro de esta muestra presenta como mineral transparente dolomita (Ca,Mg)CO₃ en un 51%, Wollastonita en un 44% y esfalerita en un 5%, por ser un análisis semicuantitativo, se descarta de este análisis la esfalerita, sin embargo es presente al microscopio óptico. En esta muestra se confirma la presencia de wollastonita y dolomita, así como esfalerita libre de hierro.

Esfalerita (Wurtzita, por no contener Fe).

d [Å]	Int.	hkl
3.300420	596	1 0 0
2.916860	999	1 0 1
1.905500	365	1 1 0
1.758480	364	1 0 3

Dolomita (Mg_{0.06}Ca_{0.94})(CO₃).

d [Å]	Int.	hkl
3.011550	999	1 0 4
2.267150	178	1 1 3
1.896870	179	0 1 8
1.860600	186	1 1 6

Wollastonita CaSiO₃

d [Å]	Int.	hkl
3.517000	23	0 0 2
3.318000	29	-2 0 2
3.090000	22	2 0 2
2.977000	100	3 2 0

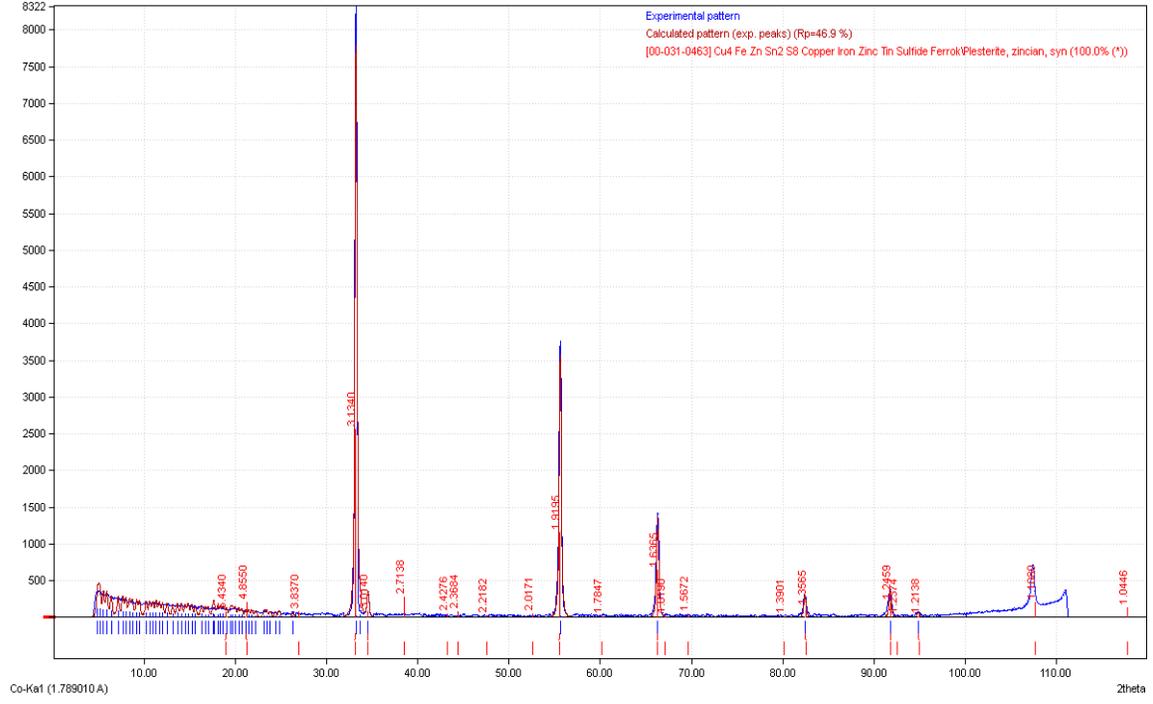
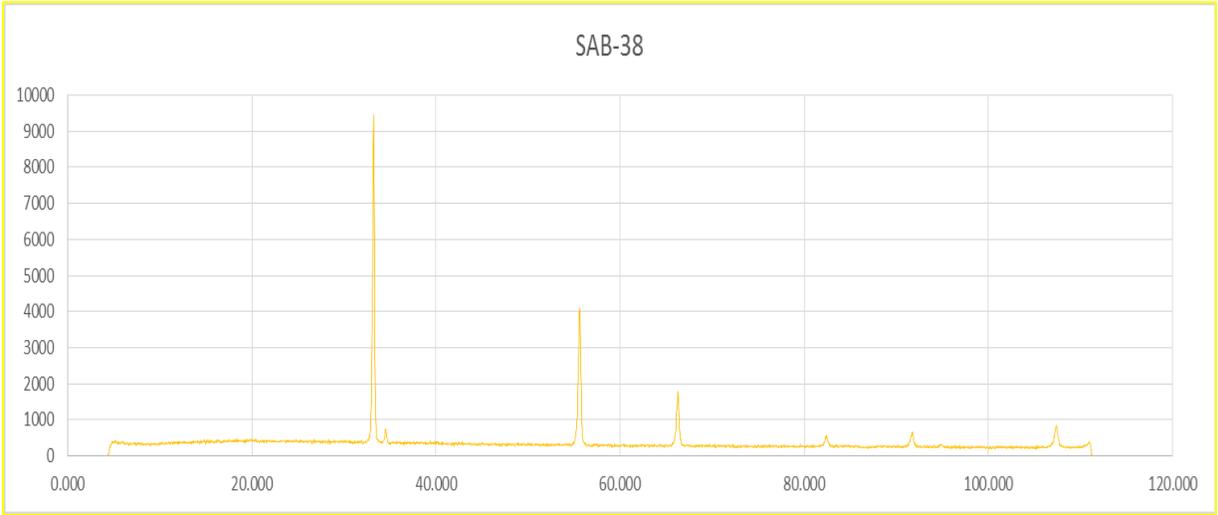


Figura 9.6 DRX Muestra SAB-038. En la determinación de los patrones de difracción el espectro muestra la presencia de una ferrokesterita, la cual tiene como fórmula $Cu_4FeZnSn_2S_8$ lo que reviste suma importancia, dado que en el MEB se detectó casiterita, lo que implica que el sistema de skarn también está contaminado por estaño. Esta muestra se vuelve importante dado que aquí en este skarn se confirma la presencia de ferrokesterita.

Ferrokesterita (hkl generados por entrada de software).

d [Å]	Int.	hkl
3.134000	100	1 1 2
1.919500	45	2 0 4
1.636500	25	3 1 2

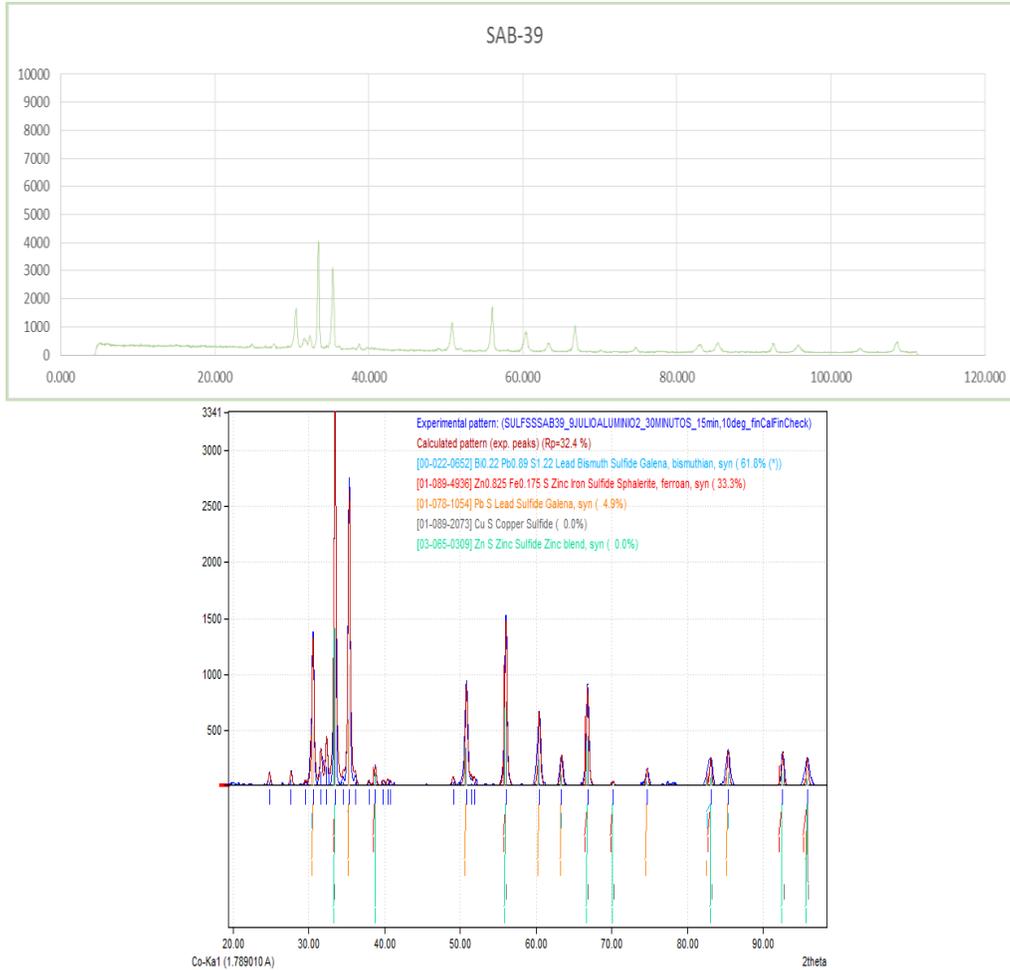


Figura 9.7 DRX Muestra SAB-039. En la determinación de los patrones de difracción, el espectro muestra como fases mayoritarias galena bismutinífera y esfalerita ferrífera, como fase minoritaria se tiene a la galena pura, En esta muestra se pone en evidencia la presencia de galena pura, galena bismutinífera, así como de esfalerita.

Galena bismutinífera (hkl generados por entrada de software).

d [Å]	Int.	hkl
3.410000	90	1 1 1
2.954000	100	2 0 0
2.089000	70	2 2 0

Esfalerita ferrífera.

d [Å]	Int.	hkl
3.126410	999	1 1 1
1.914530	502	2 2 0
1.632710	291	3 1 1

Galena.

d [Å]	Int.	hkl
3.414620	942	1 1 1
2.957150	999	2 0 0
2.091020	667	2 2 0
1.783230	391	3 1 1

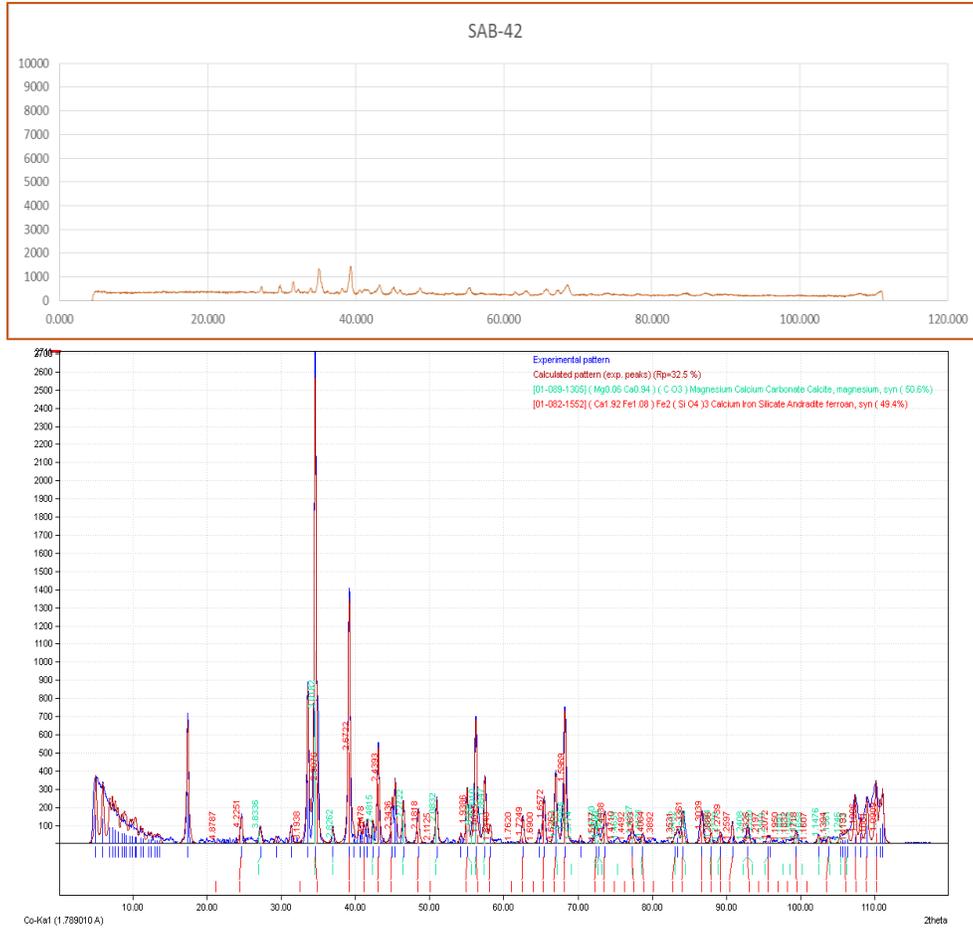


Figura 9.8 DRX Muestra SAB-042. El espectro de esta muestra confirma la presencia de calcita manganesífera que según la ficha concordante muestra una estructura cristalina con poco manganeso ($Mg_{0.06}Ca_{0.94}$) (CO_3), donde se determina que existe desde verdadera dolomita hasta calcita, siempre con manganeso (solución sólida); así mismo, se comprueba la presencia de andradita ferrífera que según la ficha concordante su composición estructural es muy cercana a $(Ca_{1.92}Fe_{1.08})Fe_2(SiO_4)_3$. En esta muestra se pone en evidencia la presencia de calcita manganesífera, es decir con contenidos de manganeso, así como de andradita ferrífera.

Calcita magnesianiana.

d [Å]	Int.	hkl
3.018190	999	1 0 4
2.481500	136	1 1 0
2.272170	176	1 1 3
2.083170	145	2 0 2
1.901030	181	0 1 8
1.864700	189	1 1 6

Andadita ferrífera.

d [Å]	Int.	hkl
2.987580	669	4 0 0
2.672170	999	4 2 0
2.439340	659	4 2 2
1.657210	256	6 4 0
1.596930	657	6 4 2

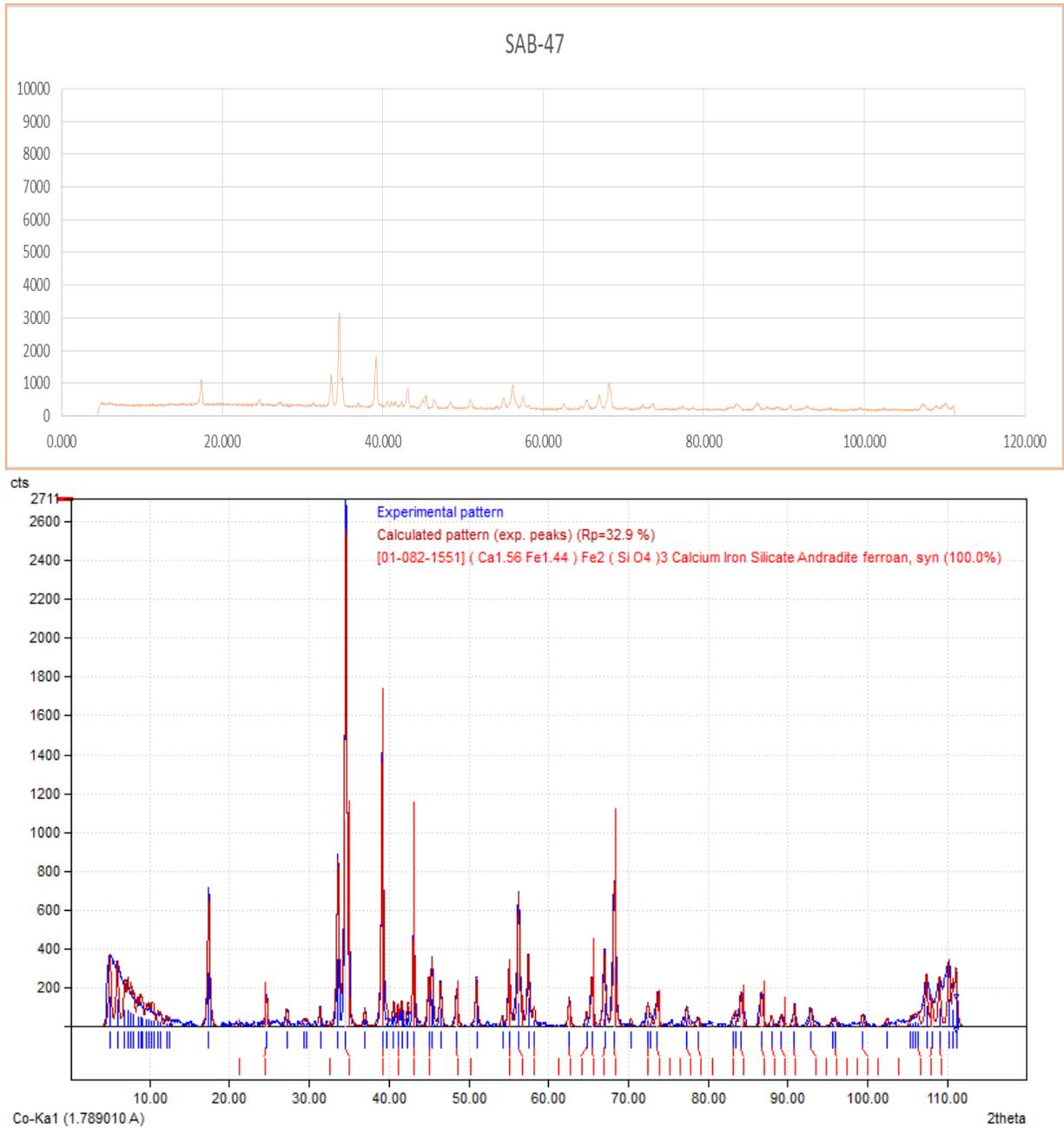


Figura 9.9 DRX Muestra SAB-047. El espectro de esta muestra confirma la abundante presencia de granate tipo andradítico. En esta muestra se pone en evidencia la presencia de andradita ferrífera.

Andradita ferrífera.

d [Å]	Int.	hkl
4.212590	130	2 2 0
2.978750	665	4 0 0
2.664270	999	4 2 0
2.432140	662	4 2 2
1.592210	642	6 4 2

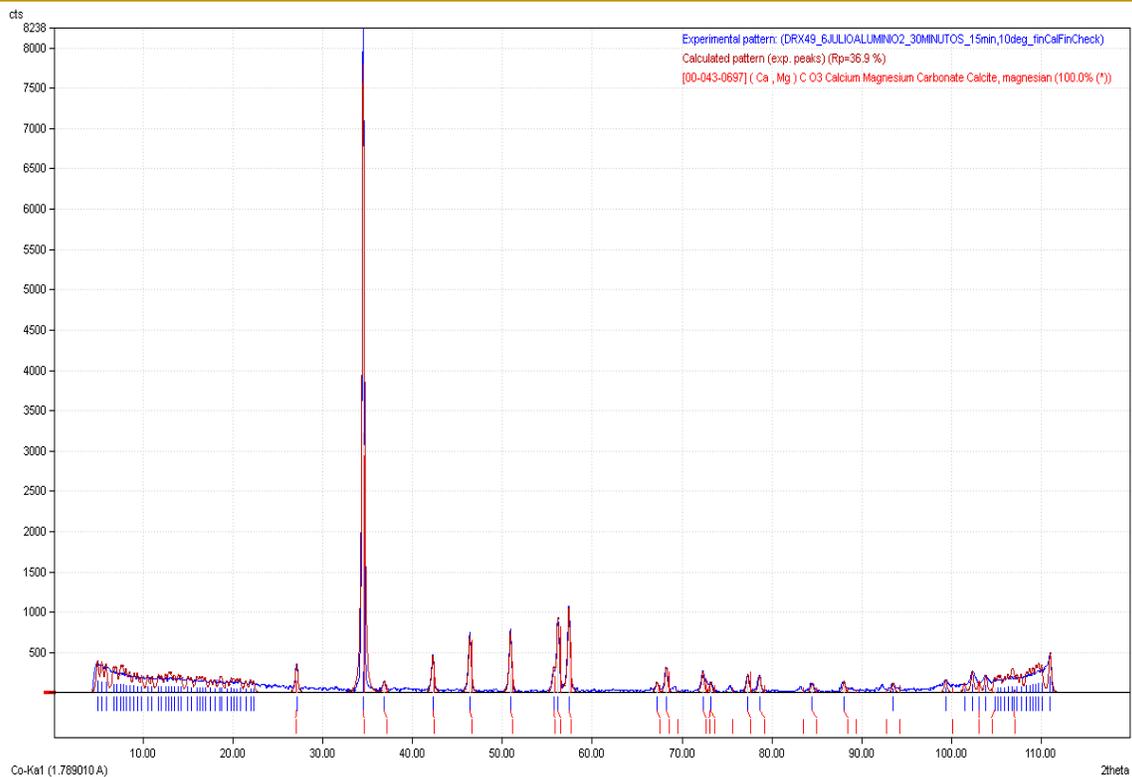
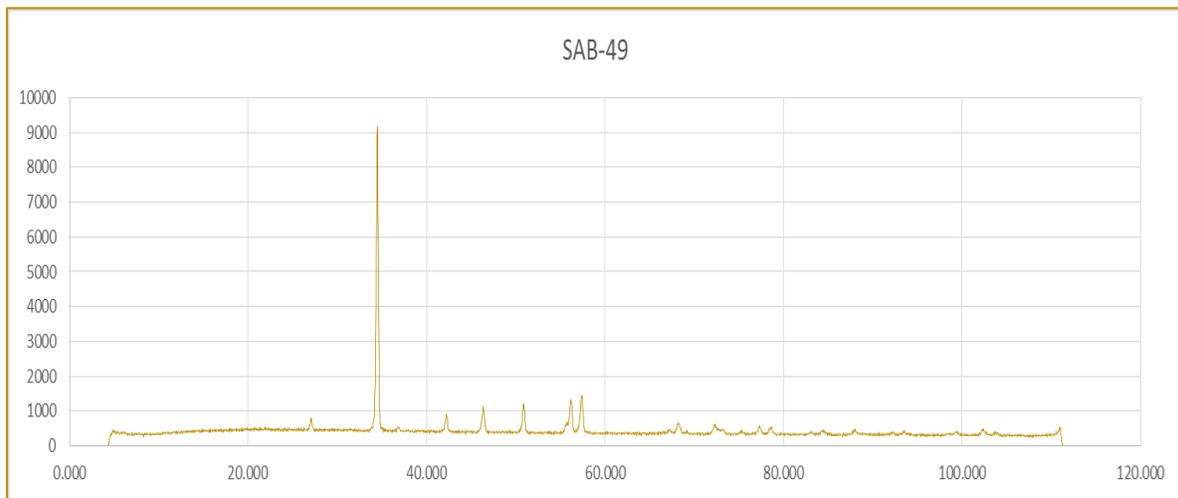


Figura 9.10 DRX Muestra SAB-049. Esta muestra corresponde a un sigmoide que presenta un relleno en exsolución marmorizado de dolomita $(Ca,Mg)CO_3$ en su totalidad, es decir que el sigmoide es monominerálico, al microscopio, se determinó sus puntos triples (al microscopio no es posible determinar si es calcita o dolomita, por lo que se clasificó como calcita). En esta muestra se pone en evidencia la presencia de dolomita.

Dolomita.

d [Å]	Int.	hkl
3.004200	100	1 0 4
2.262510	22	1 1 3
1.889150	28	0 1 8
1.855280	21	1 1 6

10. Caracterización Estructural.

Estructuralmente, la secuencia se encuentra afectada por una fuerte deformación dúctil, lo cual se ve reflejado en plegamiento, asociado a la formación de sigmoides que se encuentran rellenos de calcita recristalizada con puntos triples que al microscopio se clasifican como mármol y remarca su foliación una abundante epidota. Dichos sigmoides, van de un tamaño micrométrico hasta de hectométrico, los cuales a nivel minado están considerados como vetas o mantos de reemplazamiento dada sus dimensiones en largo y espesor, (Figura 10.1) (muestra SAB-033; rebaje en mina). Existe evidencia de una deformación dúctil/frágil mostrada en las zonas de cizalla como es el caso de la muestra SAB-031.

Generalmente, cuando la litología es reemplazada por minerales metálicos, como es el caso de la pirrotita descrita en el hornfels, el plegamiento queda totalmente enmascarado, sin embargo, dada la variación de composición rítmica se logran apreciar fantasmas del plegamiento, sobre todo en niveles altamente silicificados o bien ya transformados en pedernal (Figuras 10.2 y 10.3) (muestras SAB-030 y SAB-035).

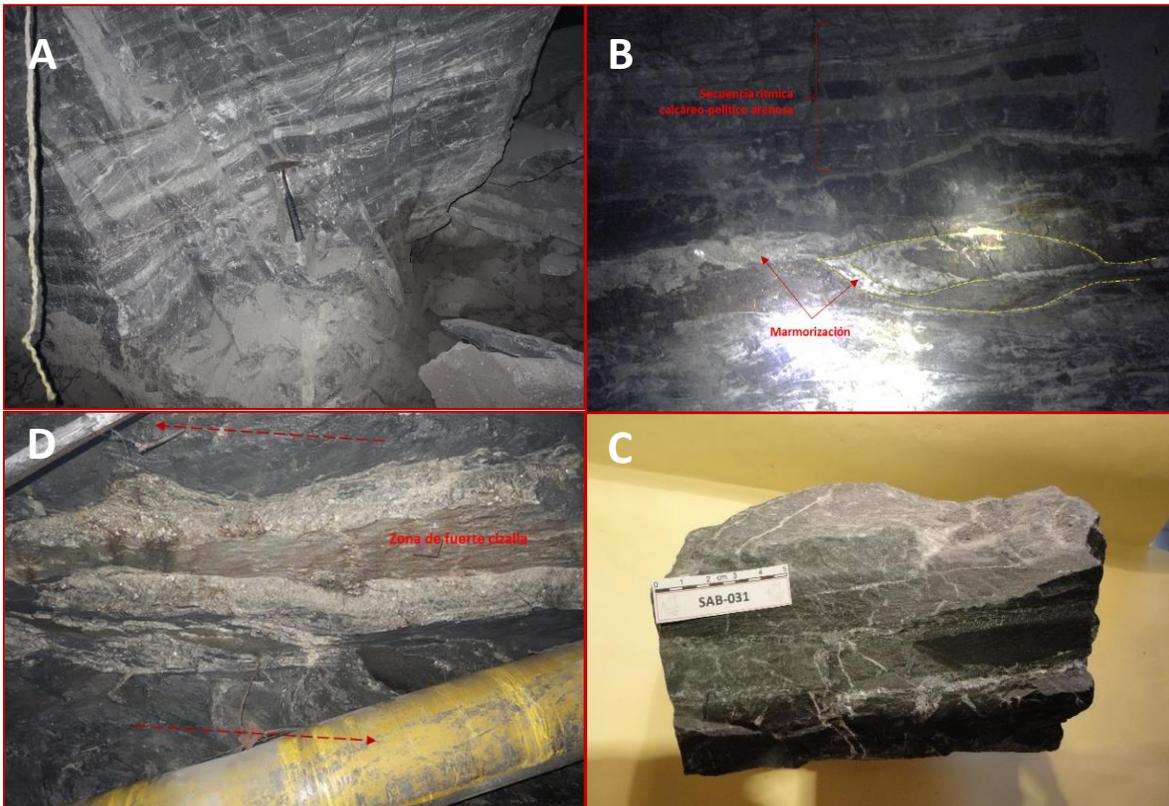


Figura 10.1 Estructuras sigmoidales y cizalla en mina, en las diferentes obras mineras se puede observar lugares donde se aprecian: en A) la ritmicidad típica en la secuencia skarn cálcico/hornfels; en B y C fuertes zonas de cizalla en efecto dúctil totalmente que conforman sigmoides y fracturamiento en echelon, plegamientos y cizalla en fase frágil dúctil. Es importante denotar que cada uno de los niveles intercalados responde de diferente forma a la deformación. Sin duda alguna existen más de dos etapas de deformación, pudiendo evidenciarlo en D) fotografía inferior izquierda, donde hay deformación remarcada por relleno de calcita que posteriormente es cortada por el efecto de cizalla.



Figura 10.2 Megascópicamente el detalle de estructuras sigmoidales observadas en mina, también se ve reflejado microscópicamente, obsérvese un sigmoide con un relleno de calcita recrystalizada con puntos triple, siendo un mármol, por lo que cuando el sigmoide es hectométrico y de amplio espesor se puede confundir con una veta y sobre todo cuando contiene mineralización como es el caso de SAB-033.



Figura 10.3 Estructuras de plegamiento en hornfels reemplazado por pirrotita observas en las muestras SAB-030 y SAB-035, Roca masiva compacta de cuerpo mineral de grano fino a muy fino. Está constituida por horizontes bandeados. Las bandas preferencialmente son de magnetita y pirrotita alternada con otras bandas ricas en galena (punta de aguja), otras de galena-pirrotita de grano muy fino. Estas bandas alternan con bandas delgadas de pedernal y caliza y hornfels recrystalizado (estratos) de color negro; dentro de estas zonas intercaladas de roca se aprecian una perfecta deformación dúctil. Presenta calcita en escasos agregados y diseminada. La calcita presenta una coloración verdosa por estar asociada a epidota y clorita. En algunos horizontes se observa galena de grano más grueso con calcita en agregados más grandes. Otro horizonte está constituido en su mayoría por pirrotita. En los planos del bandeamiento se observan estrías de falla (espejo de falla) con oxidación de hierro (limonita) y escasa presencia de Mn. Microscópicamente, la muestra se compone de finas capas de metálicos, interbandeados con pequeños niveles de roca de roca deformados (pedernal), los cuales sólo se pueden definir megascópicamente ya que su proporción es poca, dentro de los cuales sólo se puede clasificar de manera certera al pedernal, el cual presenta un bandeamiento evidenciando la deformación dúctil. Los metálicos están compuestos principalmente magnetita que es el más antiguo en el depósito, el cual en ocasiones desarrolla una foliación que es interrumpida por la pirrotita ya que ésta atraviesa la foliación o bien se deposita en cualquiera zona de debilidad como son fracturamiento y clivaje; así mismo se le observa en conversión a marcasita, y en algunos pequeños puntos que la conversión alcanza a formar pirita. La galena se emplaza en las oquedades y zonas de debilidad tanto de la magnetita como de la pirrotita; en especial en esta muestra la galena tiene contenidos de plata lo que es detectado por su textura blanda con respecto a la pirrotita y magnetita ante el pulido; la galena se asocia a pequeñas

inclusiones de sulfosales de cobre. Es importante subrayar que en esta muestra la magnetita presenta foliación y que es cortada por la pirrotita, lo que da evidencia de su cronología. Por las características microscópicas, esta muestra corresponde a parte de un cuerpo mineralizado bandeado con abundante pirrotita/magnetita reemplazando, galena y sulfosales tardías.

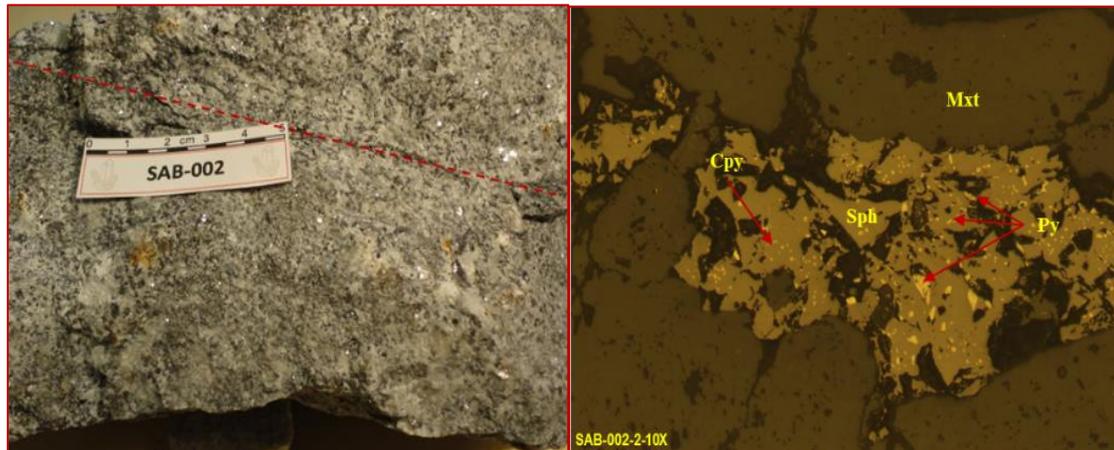


Figura 10.4 Estructuras de fallamiento en intrusivo, muestra de mano SAB-002 de color gris verdoso, de textura granular de grano medio calcitizado, silicificado y cloritizado con algunas manchas de oxidación limonítica; se aprecia fracturamiento el cual se encuentra relleno por calcita asociada a galena y esfalerita, menor calcopirita y pirita. En algunas zonas la muestra está fuertemente tectonizada y se observa una ligera orientación de cristales por efecto del fallamiento. Se agregó una fotografía de la sección pulida, para mostrar que el emplazamiento de la galena está relacionada a todas las zonas de debilidad provocadas en la junta de los minerales debido al tectonismo.



Figura 10.5 Estructuras espejo de falla en intrusivo y en skarn mineralizado, la muestra de mano SAB-003 es de color gris, verdoso, blanquecino, de textura granular de grano medio, se muestra fuertemente argilizada, al grado que da la apariencia de que el cuarzo presente está cementado por plagioclasa argilizada, se observa caolinita, clorita y epidota, así como calcopirita, bornita pirita y galena diseminadas en las oquedades y en las fracturas, así como espejo de falla presente. La muestra SAB-054 es del cuerpo mineral con granulometría fina a media, donde la mineralización se presenta en forma bandeada (tipo skarn/reemplazamiento), está constituida por galena, pirita, calcopirita, bornita y cristales de calcita, también se pudo observar el espejo de falla con mineralización que presenta escasa clorita-epidota.



Figura 10.6 Estructuras de cizalla en intrusivo y hornfels en las muestras SAB-015 y SAB-031, en ambas muestras se observa un fallamiento semiparalelo, evidenciando el reflejo de una cizalla. El intrusivo presenta la estructura rellena de epidota y clorita asociadas principalmente a calcita y menor cuarzo. Mientras que el cizallamiento en el Hornfels se encuentra relleno de calcita, principalmente donde se aprecian dos etapas de deformación compresiva.

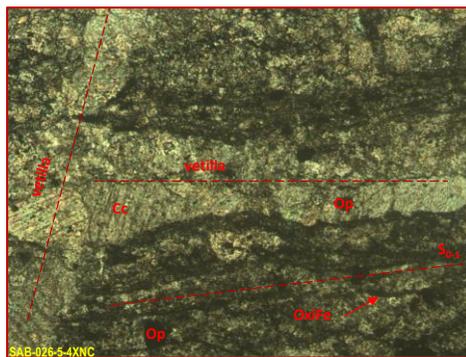


Figura 10.7 Estructuras de fracturamiento ortogonal sobre planos de foliación en la muestra SAB-026, la imagen permite mostrar que el fracturamiento, cual sea su origen, forma vetillas tanto ortogonales como siguiendo planos de foliación que pueden estar rellenos de mineralización, por lo anterior, el análisis de las texturas del relleno es importantes para definir si corresponde a una falla o a una exsolución metamórfica en sigmoides o planos de foliación.



Figura 10.8 Estructuras de fracturamiento de extensión o deformación frágil, la muestra SAB-023 presenta en detalle el fracturamiento en el hornfels relleno de calcita bien cristalizada en textura de relleno de cavidades, así mismo se parecía la formación de brecha, mientras que en la muestra SAB-041 también en el hornfels, se observa el mismo tipo de fracturamiento pero además presenta un halo de silicificación en los bordes de las fracturas, lo que confirma un proceso de silicificación tardío.



Figura 10.9 Estructuras de fracturamiento que pone en contacto al skarn y hornfels en la muestra SAB-046 evidencia que no todos los contactos del skarn son de forma transicional, sino que algunos se encuentran en contacto por fallamiento.

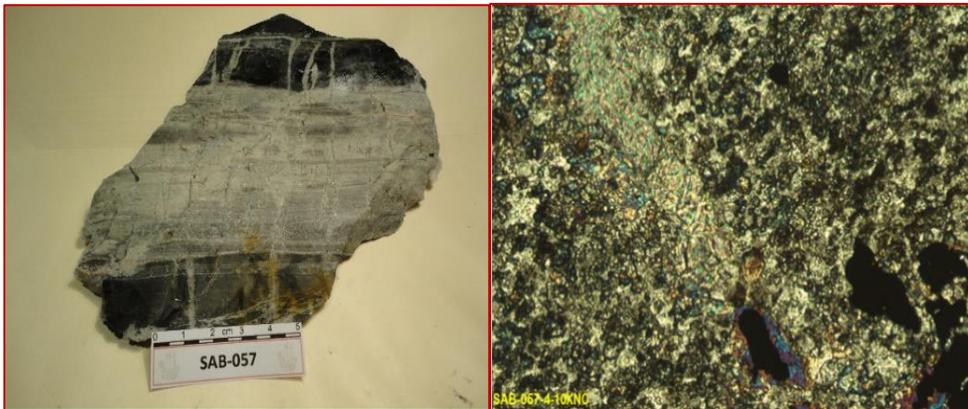


Figura 10.10 Estructuras de fracturamiento de extensión ortogonal a las bandas de skarn y hornfels, la muestra SAB-057 presenta el bandeamiento entre skarn y pedernal, que se encuentra fracturado ortogonalmente con relleno de calcita. Microscópicamente se aprecia que dichas fracturas están rellenas de calcita asociada a opacos y a sericita, en una matriz de granate de grano muy fino con calcita tardía en las oquedades.

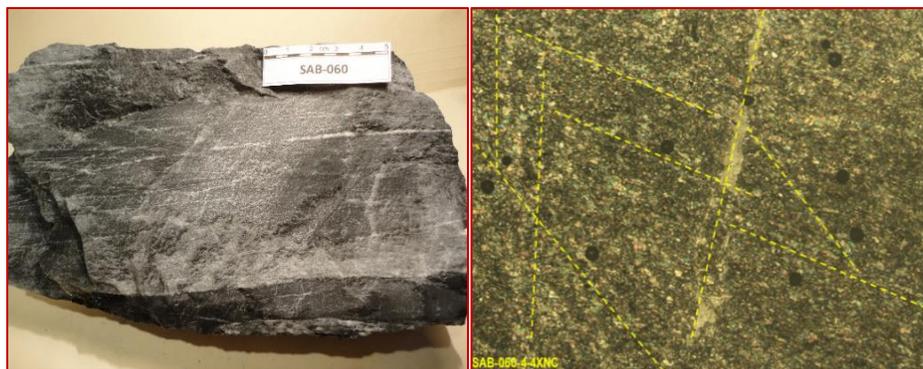


Figura 10.11 Estructuras de fracturamiento relacionado a zona de cizalla, la muestra SAB-060 como reviste gran importancia ya que es clara la existencia de una zona de cizalla frágil-dúctil, en una zona de denso fracturamiento semiparalelo ondulado, microscópicamente la muestra presenta una recristalización de grano grueso de calcita con puntos triples asociada a algo de sericita.

11. Paragénesis.

El yacimiento de Sabinas ha sido tipificado por referencias bibliográficas como un yacimiento de tipo skarn, que presenta vetas, dentro del halo de mineralización, entre el intrusivo y la secuencia sedimentaria, no importando el nombre adjudicado a dicha secuencia (Indidura, Cuesta del Cura, Caracol, etc). Sin embargo, si existen vetas dentro de la secuencia sedimentaria, como por ejemplo Veta La Noria y Veta San Luis, pero dentro del halo de skarn, no son estrictamente vetas, sino más bien son delgados mantos de reemplazamiento como VGA y VGB, sí como grandes oquedades rellenas con mineralización, algunas de ellas pueden estar dentro de sigmoides (Vetas Cholitas), estos además de la mineralización relacionada al skarn y a reemplazamiento del hornfels por pirrotita-magnetita.

En el presente estudio, se hizo un rastreo detallado del perfil litológico, de las estructuras y texturas, así como de la mineralogía, elementos que son parte de la presencia de un skarn cálcico mineralizado interestratificado con hornfels (algunos niveles de ellos con andalucita, lo que evidencia de un alto grado metamorfismo con tendencia alumínica) y niveles de pedernal, donde se pudiera incluir los Skarn APZ o ENSK.

En el yacimiento se tiene bandas de mineralización pre-Laramídica dada la deformación que presenta la pirrotita y de pirrotita-magnetita. La pirrotita tiene una reconversión a marcasita y pirita, la cual en ocasiones se le observa foliación que la corta y que se continúa al hornfels.

Se establece una etapa de deformación compresiva regional que provoca la intrusión de un cuerpo ácido/intermedio que es en promedio cuarzomonzonítico, y por metamorfismo de contacto forma un skarn cálcico selectivo el cual asocia niveles rítmicos de skarn cálcico y hornfels, donde el skarn cálcico se caracteriza principalmente por granate andradítico-grosularítico-wollastonita-actinolita; los niveles de hornfels, son de grano muy fino, conservan sólo los rasgos de foliación y una pseudoestratificación, donde el total se encuentra calcitizado (calcita magnésica a dolomita). Asociado a este proceso se denota la presencia de un metasomatismo, es decir el sistema pasa a ser abierto ya que intervienen los líquidos hidrotermales circulantes que provocan una alteración, por lo que los minerales existentes se alteran generando una argilización que, por la proporción de los minerales resultantes, se observan zonas caolinizadas, sericitizadas, cloritizadas y epidotizadas.

El skarn pasa a un proceso retrógrado donde en principio hay una pérdida de volumen por enfriamiento del sistema, lo que provoca fracturamiento y oquedades interminerálicas, apreciándose perfectamente el depósito y en ocasiones reemplazamiento de minerales transparentes; arsenopirita en parte transformada a lollingita, escasa pirita, abundante esfalerita y galena. En el orden cronológico citado, el reemplazamiento de arsenopirita es generalmente por los minerales aciculares (actinolita).

Con la exhumación cortical, inicia la etapa de distensión que es la que caracteriza a la Sierra Madre Occidental, con la efusión de rocas volcánicas, que en la zona de estudio son ácidas (riolíticas); Esta distensión, ha provocado una deformación frágil que afecta a toda la columna, sirviendo las zonas de debilidad como conducto para generar una segunda alteración al sistema, sobre todo cálcica (con Mg) y en la que se han depositado sulfuros base (escasa esfalerita, abundantes galena pura y bismutinífera, calcopirita, bornita, y sulfosales de Cu y Ag,

dentro de las cuales se reconoce roquesita, estromeyerita, freibergita, naumannita, mckinstryita, miharaita, minerales complejos de Ag/Se (posible aguilarita alterada), casiterita.

Dentro de la etapa de enriquecimiento supergénico se reconoce un incremento de cobre (digenita/covelita); enriquecimiento de plata por la alteración de las sulfosales de plata, dando fases complejas de Pb/Ag/Cu/In/Se y plata nativa. Son de relevancia en el contexto geodinámico tres puntos que no han sido especificados en la paragénesis dado que no se tienen relaciones texturales.

La detección de la ferrokesterita en la DRX (muestra SAB-038) no ha permitido ubicarla en la paragénesis, dado que no fue detectada ni MOP ni al MEB, no pudiendo establecer sus relaciones texturales. Esta fase es muy importante por la implicación que puede tener dado que está asociado a la depositación de casiterita en las fracturas.

La presencia de tierras raras en las menas metálicas está relacionadas a sulfuros de Cu e In, así como fosfatos (monazita) y calcosilicatos con La, Ce y Nd.

La persistente alteración de las sulfosales de plata dando fases complejas enriquecidas en plata, hasta llegar a la plata nativa; es particularmente importante por la analogía con los yacimientos epitermales de las vetas de Fresnillo y Francisco I. Madero, así como las vetas de Guanajuato. Estas contienen minerales con selenio y bismuto (aguilarita y galenobismutinita) en el evento epitermal superpuesto al skarn.

A pesar de que el yacimiento está calcitizado, la supergénesis de los sulfuros de cobre no tienen tendencia a formar carbonatos de Cu, sino enriquecimientos de plata por oxidación.

La paragénesis basada en las estructuras, texturas y mineralogía de las muestras estudiadas del yacimiento se expone en la siguiente Tabla 11.1, involucrando los grandes eventos geodinámicos a los cuales está sujeto el yacimiento:

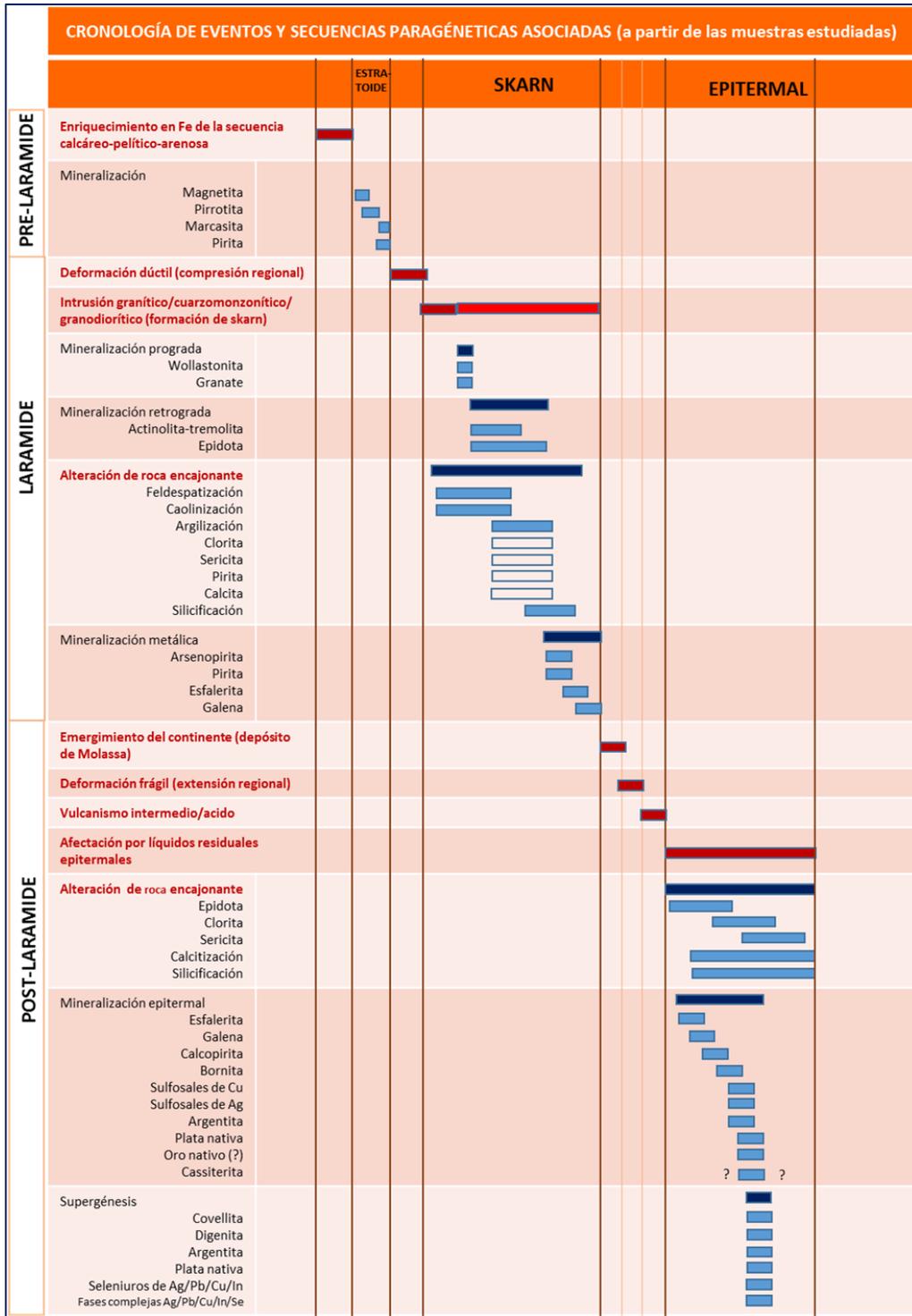


Tabla 11.1 Eventos geológicos y paragénesis del yacimiento del mineral de Sabinas. La cronología del depósito de mineralización que caracteriza al yacimiento con base a las muestras estudiadas, permite distinguir el evento pre-Laramide, Larámide y post-Laramide, pudiendo atribuir mineralización en todos estos eventos y que se caracterizan por tres tipos: reemplazamiento de estratos de hornfels por pirrotita-magnetita, emplazamiento intermineralico de en evento skarn y relleno de cavidades en fracturamiento de régimen extensivo. Dentro de la cronología, no se registra el conglomerado oxidado que representa la guía de la exhumación ya que no aflora en el entorno del yacimiento.

12. Evolución del Yacimiento.

En los capítulos anteriores del presente trabajo, se hizo una descripción detallada del yacimiento, desde el punto de vista litológico, estructural y mineralógico caracterizado por:

Un intrusivo de edad de 46.2 ± 1 Ma (Damon et al., 1981 y 1983) y confirmada una edad similar a partir de la segregación de molibdenita en fracturas del mismo intrusivo 43.7 ± 0.3 Ma y 44.0 ± 0.2 Ma (Camprurí, et al., 2015), con una gran variación textural, donde se considera que lo importante es la evidencia de que existe una zona de asimilación y deformación reconocida por las texturas gráficas presentes. Este proceso incluye feldespatización, escasa presencia de cuarzo, fracturamiento donde se deposita principalmente, galena, plata como sulfosales y cobre en sulfuros en forma de calcopirita, bornita, idaíta, digenita y covelita. En el yacimiento está casi ausente la presencia de carbonatos de cobre.

El Skarn presenta un bandeamiento, donde las bandas muestran diferente afectación del metamorfismo de contacto, que va desde una recristalización total de los elementos litológicos originales, hasta la formación de granates y algo de actinolita muy fina.

En el hornfels, es donde se observa mucho mejor la deformación dúctil, la cual es compresiva y de cizalla con fracturamiento. El sistema litológico y mineralizado, está totalmente calcitizado, en ocasiones se asocian a epidota, sin embargo, dicha calcitización está acompañada invariablemente por un componente magnésico que en ocasiones llega a ser dolomítico.

Con respecto al tipo de mineralización, el yacimiento presenta tres tipos reconocible; una por el reemplazamiento pirrotita-magnetita; otra relacionada al skarn rica en zinc y otra más superpuesta epitermal rica en Pb y Ag. El metalotecto es el fracturamiento y oquedades pre y post-deformación dúctil, así como enriquecimiento en estos elementos, más cobre en las zonas de hornfels reemplazadas por pirrotita-magnetita.

De acuerdo con la información obtenida del muestreo realizado en campo, la preparación de láminas delgadas, secciones pulidas, resultados de análisis por difracción de Rayos X (DRX) y la microscopía electrónica de barrido (MEB), sirvieron para realizar las caracterizaciones estructurales, texturales y mineralógicas de las diferentes rocas presentes en el yacimiento de Sabinas. La definición de la paragénesis permitió poder simular la posible evolución del yacimiento de Sabinas, la cual se describe de la siguiente forma:

a.- Para poder establecer la relación espacial, con respecto a los eventos geológicos y mineralógicos, se utilizó como referencia los niveles de la Mina de Sabinas, de tal manera que se pueda representar los diferentes eventos observados en campo y en los diferentes análisis que se realizaron para el presente trabajo (Figura 12.1).



Figura 12.1 Representación esquemática de los Niveles en la Mina de Sabinas, en el N-0 se localiza la rampa de acceso y el nivel más profundo desarrollado es el N-960, para este trabajo el muestreo de campo se realizó entre el N-890 y Superficie.

b.- La roca huésped del yacimiento es una secuencia de origen sedimentario compuesta por una alternancia rítmica de capas calcáreo-pelítico-arenosas, que en la zona se le conoce como Fm. Cuesta del Cura y/o Indidura, (Cretácico Inferior 130 Ma) (Figura 12.2).

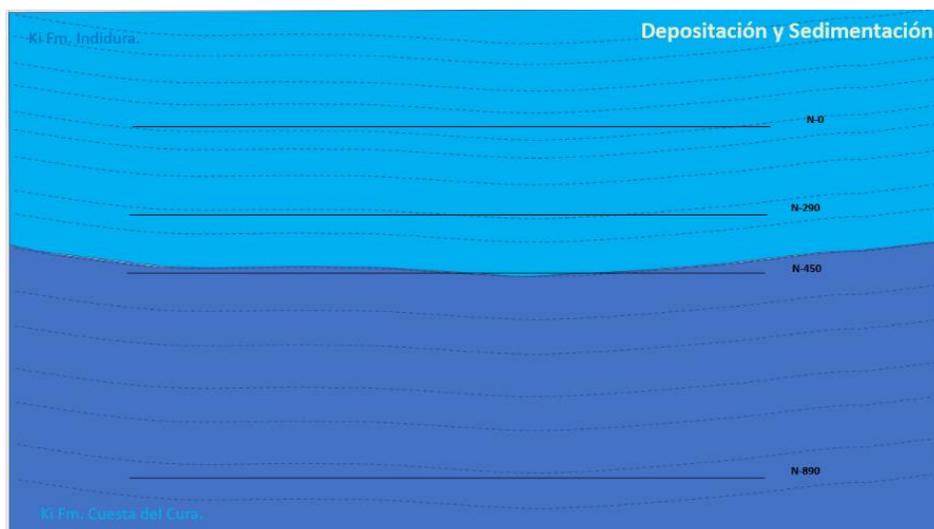


Figura 12.2 Representación esquemática de la posición estratigráfica original, de las Formaciones Indidura y Cuesta del Cura de edad Cretácico Inferior.

c.- Aproximadamente entre 80 y 70 millones de años atrás, inicio el proceso geodinámico compresivo Laramídico, que con la deformación dúctil, fue muy importante para la preparación del terreno para facilitar la intrusión en la zona del yacimiento de Sabinas-San Martín (Figura 12.3).

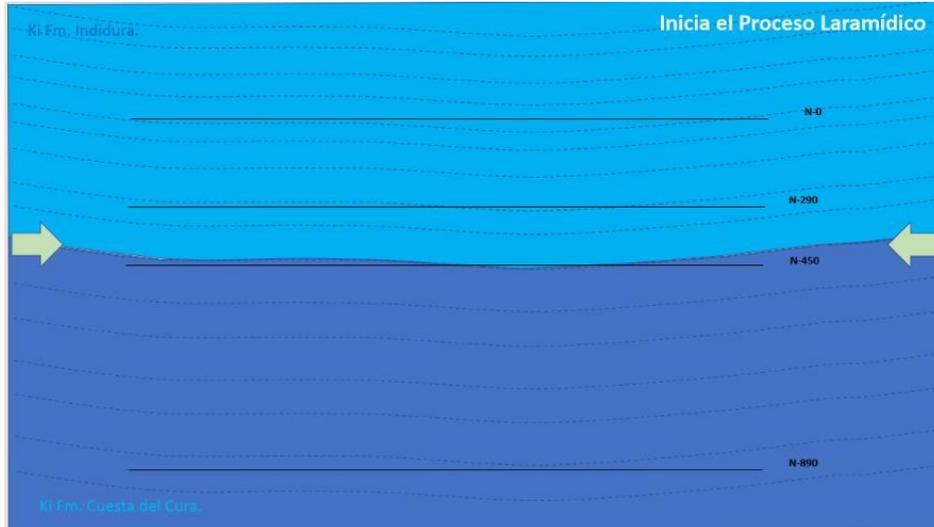


Figura 12.3 Representación esquemática, del proceso Laramídico.

d.- Durante la Orogenia Larámide la deformación dúctil tiene como principal componente de esfuerzo a la presión, generando en la roca encajonante plegamiento, foliación, sigmoides, fallamiento inverso y fracturamiento. En este periodo de acuerdo con las diferentes caracterizaciones que se realizaron, se puede estimar que hubo mayor Presión con respecto a la Temperatura ($>P$, $<T^{\circ}$) (Figura 12.4).

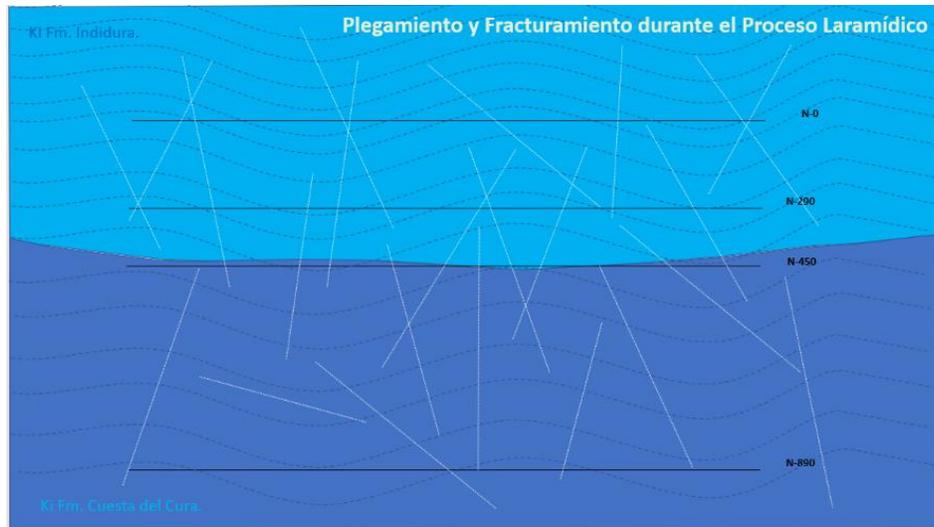


Figura 12.4 Representación esquemática del plegamiento y fracturamiento de la roca encajonante durante el proceso Laramídico.

e.- Conforme continúa evolucionando el proceso compresivo, aproximadamente hace unos 46 Ma, se presentó una Intrusión (Cerro La Gloria), de composición Cuarzomonzonítico-Granítico, con textura que va de equigranular a porfídica, gráficas y anatéxicas. Incluye fracturas por pérdida de volumen rellenas de molibdenita; el ambiente durante esta etapa se caracterizó por presentar un incremento en la Presión y la Temperatura ($>P, >T^{\circ}$) (Figura 12.5).

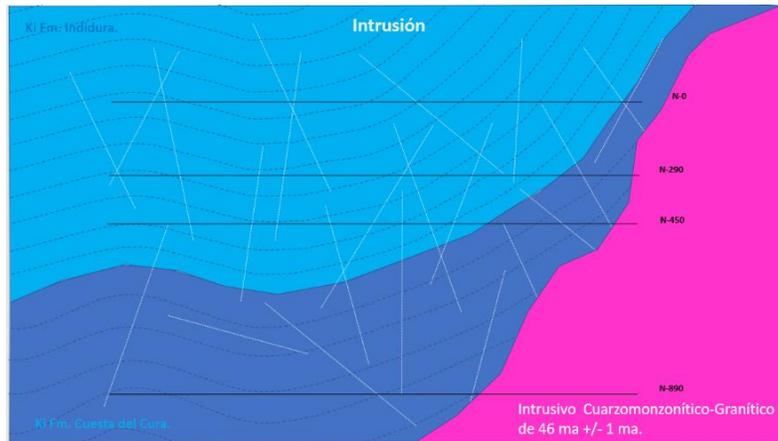


Figura 12.5 Representación esquemática de la intrusión Cuarzomonzonítica-Granítica, en el N-890 en mina, se puede observar que la secuencia sedimentaria actualmente tiene un rumbo y echado paralela a la intrusión.

f.- Por efecto de la intrusión magmática, la secuencia sedimentaria, donde los horizontes con niveles más calcáreos o zonas con deformación dúctil fueron preparados tornándolas potenciales para la recepción de la mineralización, con una evidente calcitificación y recristalización. Esta zona es donde se alojarán los mantos de remplazamiento como Veta Grande del Alto (VGA) y Veta Grande del Bajo (VGB), mientras que los horizontes con mayor contenido de líticos tienden a presentar mayor silicificación, esta etapa se caracteriza por condiciones de menor Presión y mayor Temperatura ($<P, >T^{\circ}$, reactividad de fluidos) (Figura 12.6).

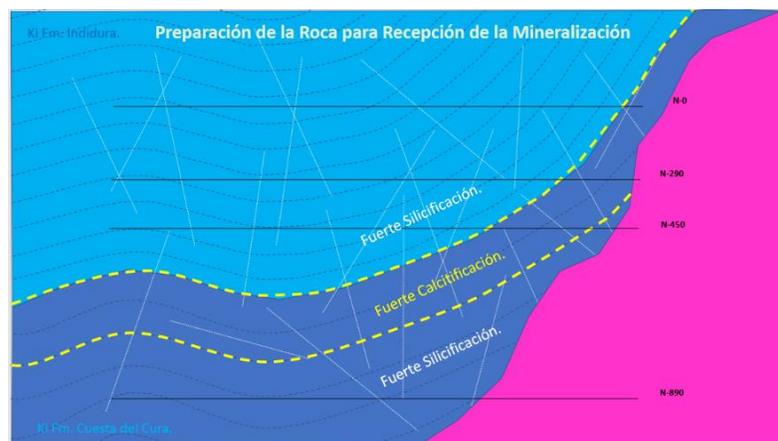


Figura 12.6 Representación esquemática de la preparación de la roca encajonante, con su respectiva alteración reconocida ampliamente en los diferentes Niveles de la Mina.

g.- Simultáneamente a el punto anterior, se produce una reacción fisicoquímica del intrusivo donde el componente principal es la temperatura ($<P,>T^{\circ}$), generando una transformación mineralógica, compuesta de capas de hornfels/skarn cálcico de granate, de wollastonita-hedenbergita (fase prograda del Skarn), actinolita-tremolita, seguido de epidota (fase retrograda del Skarn) y mineralización metálica del skarn (principalmente arsenopirita y esfalerita). Las capas u horizontes de alta capacidad de captación de metálicos se encuentran cerca del contacto con el intrusivo (Figura 12.7 y 12.8).

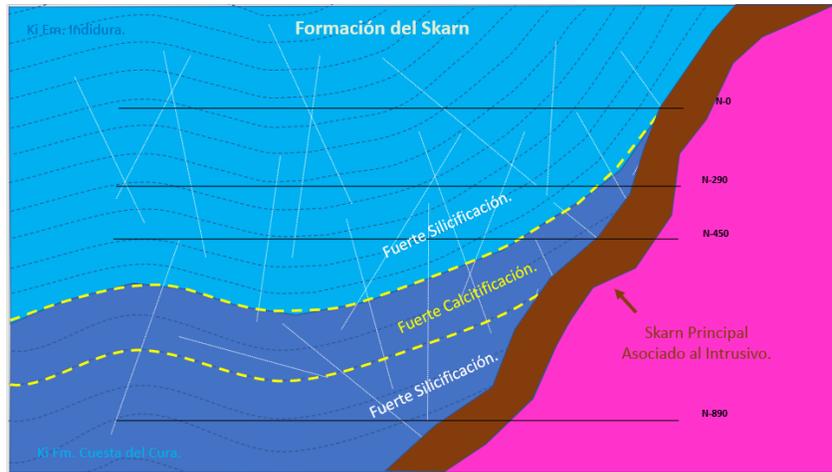


Figura 12.7 Representación esquemática de la formación del Skarn principal asociado al intrusivo y alteración en la roca encajonante.

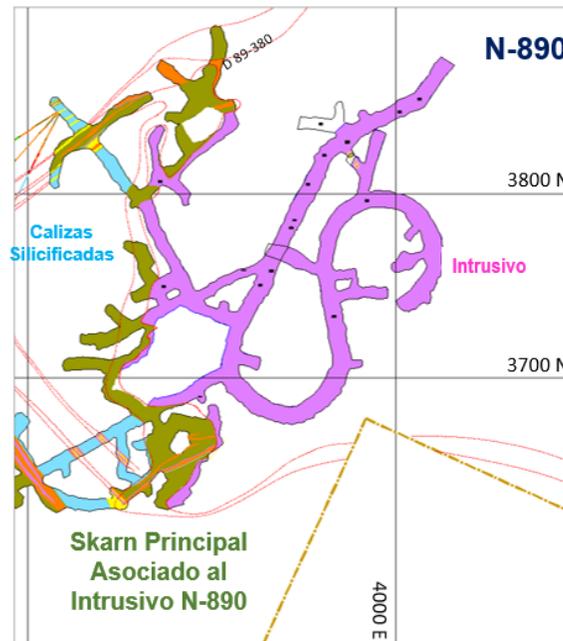


Figura 12.8 Levantamiento Geológico N-890, donde se puede observar el Skarn Principal en contacto entre el Intrusivo y las Calizas de la Fm. Cuesta del Cura, con dimensiones variables.

h.- El ambiente geológico continúa evolucionando. Como parte del proceso geodinámico distensivo, se presentan dos efectos, el primero se manifiesta como una deformación frágil extensiva que provoca fosas y pilares por medio de fallamiento normal sobre la secuencia huésped del yacimiento, con mayor ($>P, <T^\circ$), que posteriormente será el espacio abierto donde se emplazarán los cuerpos tipo veta como son V. La Noria y V. San Luis (Figura 12.9).

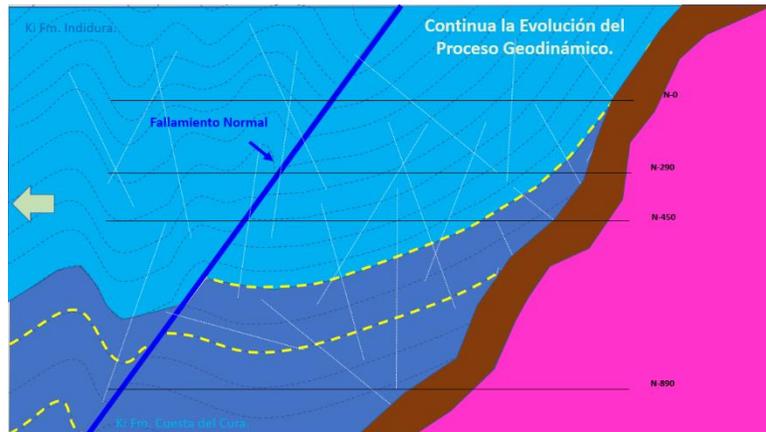


Figura 12.9 Representación esquemática del fallamiento normal en la secuencia sedimentaria, provocado por la evolución del proceso geodinámico.

i.- El segundo efecto está evidenciado en la región por un vulcanismo ácido. Se desarrolla en forma de paquetes tabulares riolíticos, emplazamiento de diques asociados afectando a la secuencia huésped del yacimiento y lixiviación por líquidos residuales tardíos en la secuencia del yacimiento de skarn (estos líquidos residuales silicifican fuertemente al sistema litológico, ($<P, >T^\circ$) y $>Zn, >Cu$ y $<Pb$). Tal mineralización puede ser observada en diferentes niveles donde hay obra minera (Figura 12.10).

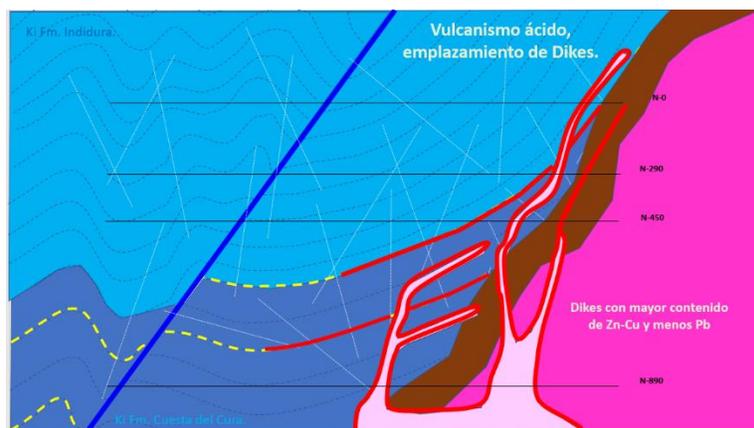


Figura 12.10 Representación esquemática del emplazamiento de Dikes ácidos, con mineralización presente de mayor contenido en Zn y Cu y en menor proporción de Pb, principalmente en las zonas cercanas y dentro del intrusivo, Skarn principal y el cuerpo ENSK.

k.- Conforme el sistema comienza a enfriarse, se deposita la mineralización epitermal y superpuesta a la mineralización de skarn, en toda zona de debilidad como son fracturas, oquedades y en fallas, siendo las vetas La Noria y San Luis. La mineralización metálica es rica en sulfuros base de Pb, Cu, Ag, enriqueciendo al sistema en sulfuros y sulfosales que son las concentradoras de Ag. En este proceso también existen horizontes del hornfels/skarn más permeables donde la silicificación fue penetrativa, habiendo otra zona calcitizada que fue preparada formando en este evento los mantos VGA (Veta grande del Alto) y VGB (Veta grande del Bajo) (<P,>T°, reactividad de fluidos residuales) (Figura 12.13).

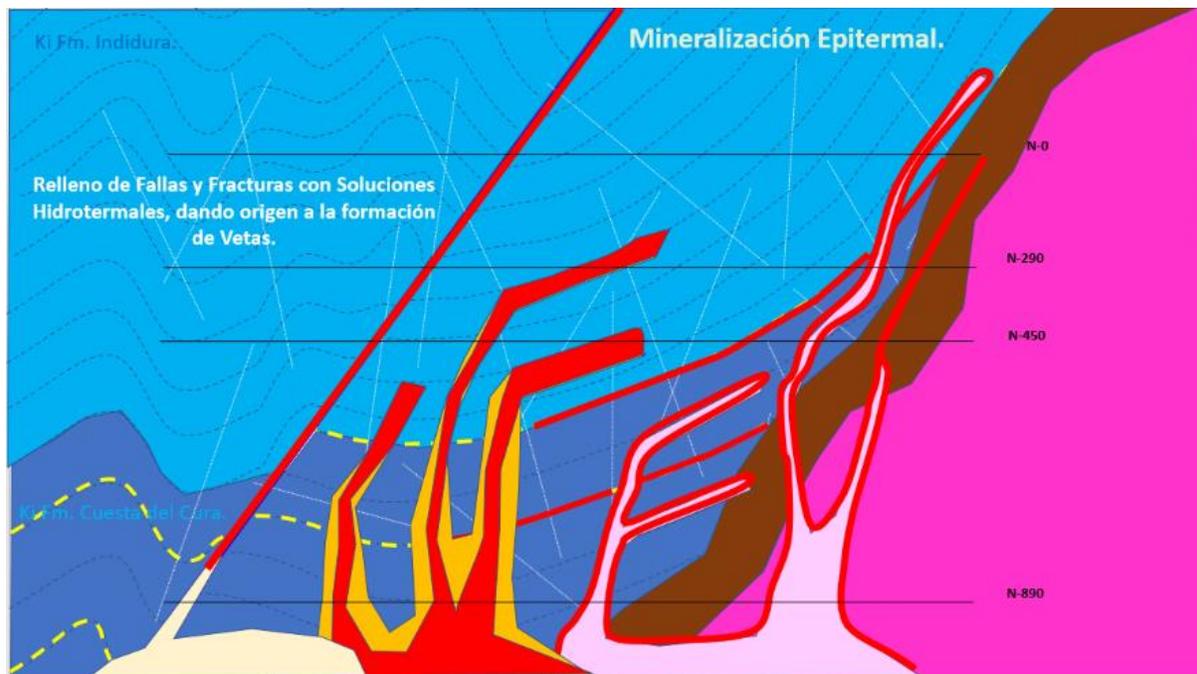


Figura 12.13 Representación esquemática del depósito de mineralización epitermal en las zonas de debilidad, ricas en Pb, Zn, Cu y Ag, la estructura más representativa es Veta La Noria.

l.- Como último evento identificado en el yacimiento de Sabinas, es el de supergénesis mineral, derivado de la percolación de aguas meteóricas asociadas a aguas connatas, elevación de temperaturas, lixiviación y generación de celdas convectivas. Esto genera la liberación de metales de los minerales químicamente más débiles como son los sulfuros de cobre y sulfosales, formando covelita/digenita y disociación de sulfosales, generando liberación de la plata hasta llegar a plata nativa filiforme y laminar (<P,<T°, > reactividad de fluidos, fugacidades de O/S). En interior de Mina, las láminas de plata nativa se pueden observar dentro del Skarn principal de Cu, de manera más evidente en las zonas con mayor presencia de sulfuros de Cu y Fe (Bornita), principalmente entre los Niveles del 700 y 450 (Figura 12.14, 12.15 y 12.16).

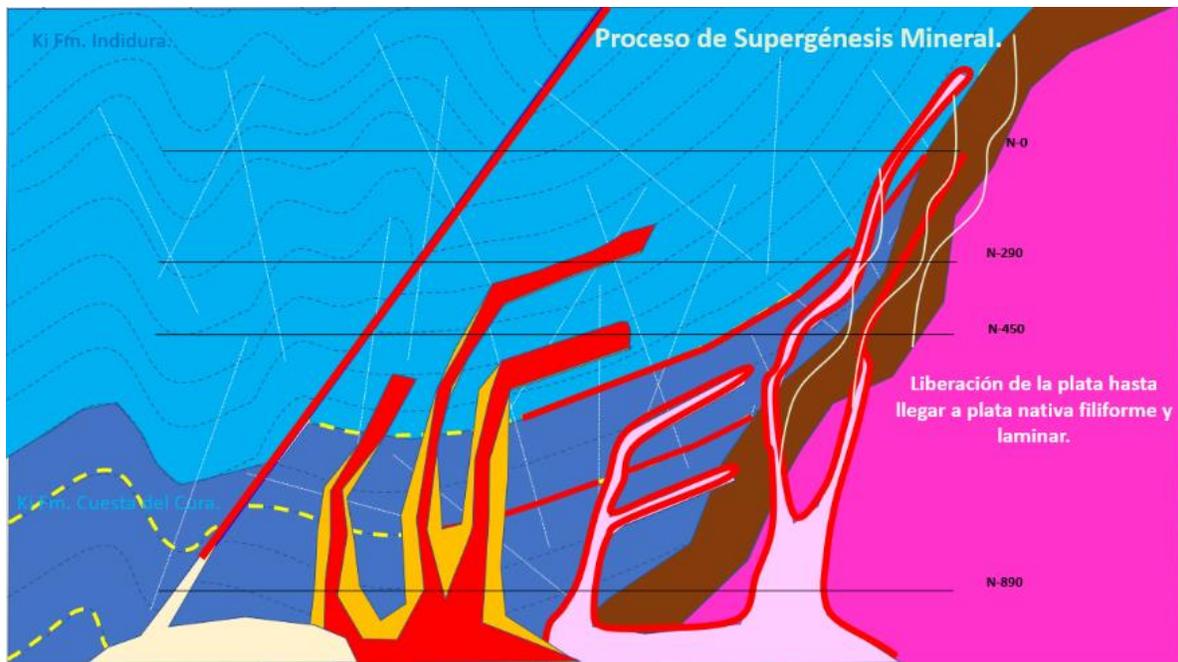


Figura 12.14 Representación esquemática del depósito de plata nativa entre las fracturas presentes en el Skarn principal con mayor presencia de Bornita.



Figura 12.15 Láminas de Plata Nativa filiforme en Bornita. Muestra tomada entre los N-540 y 590 de la Mina Sabinas.

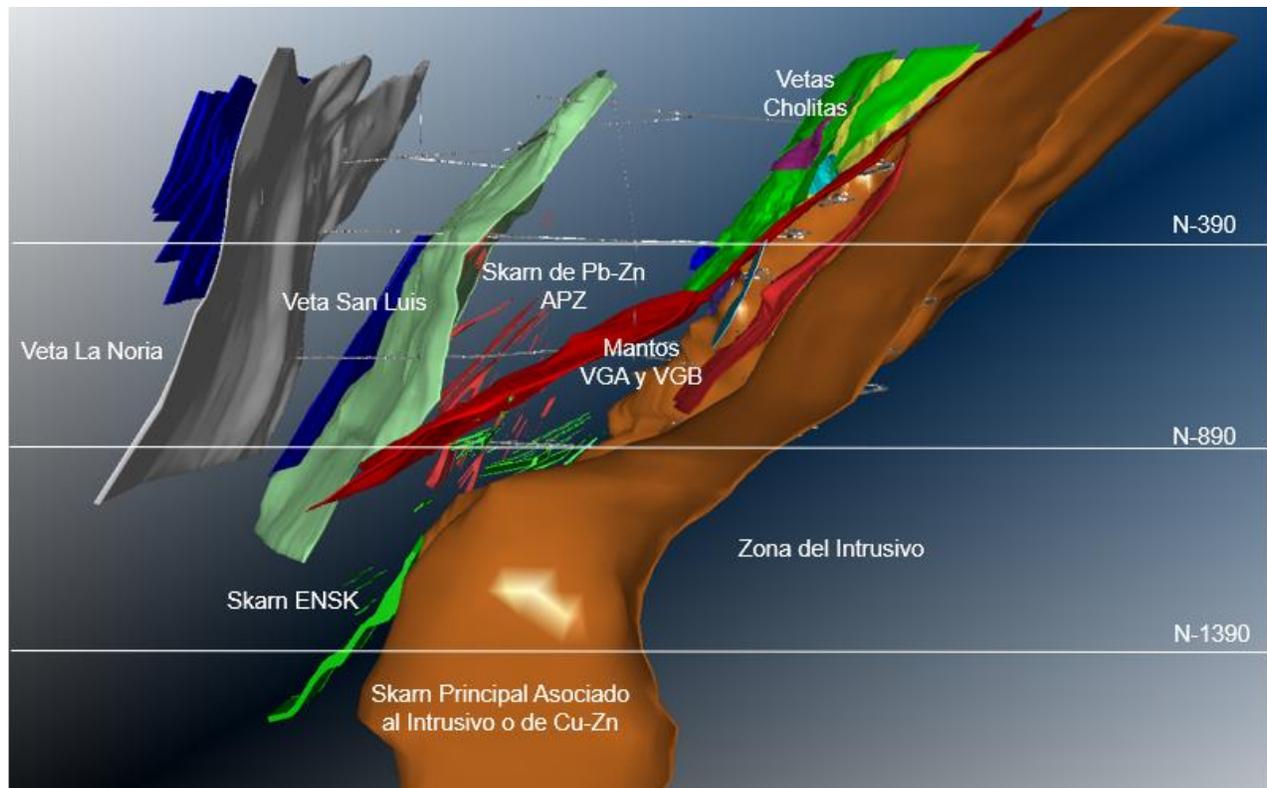


Figura 12.16 Modelo 3D, con la posición y forma real de los diferentes cuerpos mineralizados que conforman el Yacimiento de Minera Sabinas. Fuente Minera Sabinas.

13. Conclusiones.

Una vez que se han concluido los trabajos de campo y de laboratorio, tratando de cumplir con el principal objetivo de este trabajo, se pudo definir algunas de las guías que permite establecer las diferentes etapas evolutivas de la mineralización del yacimiento. Los resultados obtenidos permitirán enfocar o dirigir de una mejor manera la futura exploración del yacimiento, identificar nuevos bloques de recursos minerales e incrementar la vida operativa de la Mina de Sabinas, destacándose las siguientes conclusiones:

1- Desde el punto de vista litológico, el yacimiento se encuentra encajonado en un skarn selectivo cálcico, caracterizado por un intrusivo con una gran variación textural. Se considera que existe una zona de asimilación y deformación reconocida por las texturas gráficas observadas, el intrusivo presenta feldespatización, escasa presencia de cuarzo, un fracturamiento que reviste gran importancia, porque permite el depósito principalmente de galena, plata como sulfosales y cobre en sulfuros de cobre bajo la forma de calcopirita, bornita, idaita, digenita y covelita. En análisis de campo y en laboratorio casi está ausente la presencia de carbonatos de cobre.

2- El bandeamiento de hornfels, tienen diferente afectación del metamorfismo de contacto, que va desde una recristalización total de los elementos litológicos originales, hasta la formación de granates y algo de actinolita muy fina. En el hornfels se observa mucho mejor la deformación dúctil, la cual es compresiva y de cizalla con fracturamiento.

3- Todo el sistema litológico y mineralizado, está totalmente calcitizado, así mismo como también los sigmoides que en ocasiones se asocian a epidota, sin embargo, dicha calcitización está acompañada invariablemente por un componente magnésico que en ocasiones llega a ser dolomita.

4- Con respecto al tipo de mineralización, el yacimiento presenta tres tipos de mineralización reconocible: reemplazamiento pirrotita-magnetita, otra relacionada al skarn rica en zinc y otra más superpuesta epitermal rica en Pb/Ag. El metalotecto es el fracturamiento y oquedades pre y post-deformación dúctil, en otras palabras, el metalotecto de plata es toda aquella fractura, oquedad y zona de debilidad, sin embargo, el enriquecimiento de las zonas ricas en sulfosales de plata y cobre así como su asociado galena que tiene variaciones a galena argentífera, son las zonas de reemplazamiento de hornfels por pirrotita/magnetita.

5- El sistema mineralizado, no presenta desarrollo supergénico carbonatado en el cobre, sino de oxidación, evidenciando la presencia de digenita y covelita, así como la evolución de sulfosales definidas a fases complejas enriquecidas en plata nativa.

6- Mineralógicamente, el yacimiento se conforma de un conjunto de capas intercaladas rítmicamente de espesores muy variables que van de más de un metro hasta milimétricos y, compuestos por skarn cálcico a hornfels. La naturaleza de la variación mineralógica de la roca inicial condiciona la variación mineralógica de las capas intercaladas en este conjunto litológico; originalmente, conformaron un paquete rítmico de calizas, y niveles intercalados calcáreo-pelítico-detriticos, afectados por metamorfismo de contacto provocado por un intrusivo ácido/intermedio.

La transformación mineralógica y textural provoca la formación de capas de skarn cálcico intercalado con hornfels que presenta desde una recristalización hasta el desarrollo de incipientes sílico-aluminatos y calcosilicatos donde se puede apreciar menor actinolita-tremolita y en ocasiones escaso granate de grano muy fino. Se tiene el desarrollo de mármol en los sigmoides que caracterizan a la secuencia de skarn selectivo que es el resultado de la deformación compresiva dúctil, la mineralogía de los niveles cálcicos (Skarn cálcico) y representada principalmente por granate, actinolita-tremolita, menor wollastonita y en ocasiones se aprecia piroxeno, dentro del cual se distingue diópsida. Los niveles hornfélsicos se componen de mineralogía inicial totalmente recristalizada a calcita, donde se observan milimétricas capas de arcillas, materia orgánica y fragmentos totalmente calcitizados, existen niveles con un perfecto desarrollo de andalucita.

En todo el sistema, tanto en intrusivo como en skarn/hornfels existe una silicificación superpuesta a una calcitización, que enmascara ampliamente la mineralogía. La epidota, clorita y sericita asociadas representan una argilización tanto en el intrusivo y es evidente tanto en skarn cálcico como en el hornfels.

La deformación dúctil es más evidente en los niveles hornfésicos, donde se aprecian los rasgos de plegamiento y los sigmoides con exsolución de calcita recristalizada de manera isoquímica transformada a mármol. Estas estructuras van desde milimétricas hasta hectométricas y en las zonas más deformadas, se observa salbanda dando la apariencia de conformar un fallamiento que por contener mineralización metálica se le adjudica el nombre de veta o vetilla, sin embargo, en efecto es una mineralización tardía incluida en una zona de cizalla.

Se observa la superposición de una deformación de carácter distensivo, que va desde una apertura de fracturas por posible deshidratación del sistema, así como grandes fallas (escasas) son muy importantes porque ahí la mayor parte de la mineralización económica (Pb/Ag/Cu) se encuentra depositada. Dicho fracturamiento es de dos tipos: uno generalizado, que corta a la secuencia metamorfoseada multidireccional, que en ocasiones es tan densa que forma estructura enrejada tipo stockwork. El otro tipo de fracturamiento intercrystalino, y en el que en ocasiones tritura a los minerales y aloja mineralización económica (Pb/Ag/Cu). La mineralización más rica en zinc se encuentra menos relacionada a fracturamiento, formando morfologías mantíferas.

7- La estructura de depósito de la mineralización metálica se encuentra bajo tres esquemas:

7.1- Mineralización cogenética al skarn de arsenopirita, emplazado en los huecos del intrusivo, siempre es de tipo euhedral que cuando se encuentra asociado a otros minerales se encuentra preferencialmente embebido en ellos, conservando su hábito euhedral mismo si se encuentra fracturado. También se puede encontrar arrastrado por calcita en oquedades, la arsenopirita se encuentra reemplazando calcosilicatos aciculares en el skarn, además, se observa a la esfalerita en mantos de diferente espesor, que se concentra de manera más relevante en los niveles de skarn, sin haber encontrado texturas que evidencien su relación cogenética con el skarn.

Arsenopirita, generalmente es de tipo euhedral fracturada y arrastrada por calcita y otros minerales metálicos que la embeben, se detectaron texturas de reemplazamiento de calcosilicatos en los niveles de skarn cálcico. Este mineral tiene una relación muy estrecha con la lollingita que deriva en un proceso de supergénesis. La arsenopirita también presenta un derivado con altos contenidos de antimonio bajo la fase mineral Gudmundita. Estas tres fases minerales de arsénico con antimonio son abundantes en el yacimiento.

Esfalerita, este mineral generalmente se dispone en estructura manteada en el skarn, sin embargo, las texturas muestran dos tipos de esfalerita, una rica en fierro y otra deficiente en fierro, de tipo anhedral que se presenta de manera escasa pero con algunas inclusiones de calcopirita. Por las relaciones texturales, se infieren dos generaciones de esfalerita, una relacionada a la etapa de depósito de sulfuros del skarn y una tardía relacionada al inicio del proceso epitermal.

7.2- Mineralización de pirrotita/magnetita reemplazando niveles de hornfels ricos en materia orgánica y arcillas, la cual presenta el microfracturamiento, donde tardíamente se depositan los minerales económicos, preferencialmente sulfuros y sulfosales de Pb/Ag/Cu. La presencia de pedernal y algunos niveles muy delgados de hornfels totalmente plegados es asociado a su porosidad, así como una textura de interminerálica, siendo este intrincamiento el principal tipo de mineralización (pirrotita/magnetita) que está relacionado a la gran cantidad de sulfuros y sulfosales de Pb, Cu y Ag. Las principales características de estos minerales son las siguientes:

Pirrotita, se encuentra en masas de tipo anhedral porosa, desarrollada en el hornfels con minerales calcitizados que además presentan conversión a marcasita y pirita.

Magnetita, cristalización de hábito irregular embebida por la pirrotita, sin embargo, no se aprecia su relación cronológica.

7.3 Mineralización epitermal, es la que representa la riqueza de elementos económicos en el yacimiento, principalmente por sulfuros de plomo, sulfuros de cobre y fierro, así como sulfosales complejas de cobre y plata, también es la que presenta una alta supergénesis que enriquece en plata al yacimiento. Esta mineralización reviste una gran importancia, ya que se encuentra en cualquier fracturamiento y relleno de oquedades y se encuentra siempre relacionada a calcita; en ocasiones se asocia a escaso cuarzo de textura epitermal el cual representa un depósito por sobre saturación que parte de la silicificación de todo el sistema. Está totalmente relacionado a fracturamiento que se constituye por sulfuros de plomo y de cobre, así como sulfosales de plata y/o cobre; dichos minerales tienen una tendencia a la supergénesis hasta llegar a la plata nativa. La mineralización que caracteriza al yacimiento.

Esfalerita, este mineral se ubica como partida del depósito de este evento ya que se encuentra embebido en los sulfuros de cobre

Bornita, de hábito anhedral, que presenta sus reflexiones internas y una relación muy estrecha con ciertos manchones de idaita, así como una supergénesis a covelita y digenita, generalmente en borde de cristales o en los bordes de las oquedades. La idaita tiene una estructura supergénica, sin embargo, al microscopio, se aprecia su color de interferencia típicamente naranja.

Calcopirita, este mineral de hábito anhedral, presenta una relación textural tardía con respecto a la bornita, se le observa generalmente emplazada en el fracturamiento de los minerales preexistentes.

Sulfosales de cobre, corresponden principalmente a tetraedrita, con una variación en los contenidos de plata, por lo que de aquí deriva la riqueza en freibergita en este yacimiento, las sulfosales enriquecidas en cobre presentan una supergénesis que derivan en sulfosales complejas de cobre con plata como es el caso de la abundante estromeyerita hasta llegar a la plata nativa.

Sulfosales complejas de plomo con selenio, presenta contenidos variables de selenio y azufre que, por contener elementos químicos que definen soluciones sólidas, llegan a presentarse como seleniuros, se detectó un poco de estroncio, pero como impureza.

Roquesita, este mineral es muy importante ya que no había sido identificado con anterioridad en el yacimiento. Si bien en este proyecto se desconoce si se beneficia, su presencia sin embargo es relevante y está relacionado a la bornita.

8- Como último punto, después de conjuntar la información obtenida en los trabajos de campo y de laboratorio, donde se destaca la toma de 64 muestras, el levantamiento geológico y la modelación 3D de los diferentes cuerpos explorados en interior mina, así como los estudios de microscopía óptica, difracción de Rayos X y microscopía electrónica de barrido (MEB), permitió establecer las diferentes características mineralógicas del yacimiento, para poder simular las diferentes etapas de la evolución del yacimiento de Sabinas, de tal manera que en futuras exploraciones que se desarrollen, permita generar nuevos recursos minerales e incrementar la vida operativa de Minera Sabinas.

14. Referencias.

- Aranda G., J. J., 1978, Metamorphism, mineral zoning, and paragenesis in the San Martín mine, Zacatecas, Mexico. Tesis Maestría, Golden, Colorado, Sochool of Mines, 90 p.
- Barthelmy, D., 2015, Mineralogy Data 1997-2014, <http://webmineral.com>
- Camprurí, A., González P., E., Valencia, V. A. y Barra, F., 2015, Geochronology of Mexican mineral deposits. I: the San Martín polymetallic skarn, Zacatecas. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, V. 67, No. 1, p. 119-122
- Cuevas, P., E. 1980, Geología de la región de San Martín, Sombrerete, Estados de Durango y Zacatecas, México. Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. XXXII, n.2, pp. 59-74.
- Damon, P. E., Shafiqullah, M. y Clark, K. F., 1981. Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, volumen 5, p. 223-238.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Clark, K.F., 1983, Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, 20, 1052-1071.
- Flores O., J., de la Vega, M., Kuntz, F., S. y Alizal, L., 1996, Breve Historia de Zacatecas, Fondo de Cultura Económica/El Colegio del México/Fideicomiso Historia de las Américas. ISBN 96-16-4670-3, México, xxp.
- Haynes, F. M. y Kesler, S. E., 1988, Compositions and sources of mineralizing fluids for chimney and manto limestone-replacement ore in Mexico. Economic Geology. v. 83, n. 8, diciembre, p. 1985-1992.
- Hintze Arenas Othon, E., 1988, Exploitation of a skarn-type copper-silver deposit at the San Martin Mine of Industrial Minera Mexico, S. A. de C. V.
- Imlay, R. W., 1936, Evolution of Coahuila Peninsula, Mexico: Part IV, Geology of the western part of the Sierra de Parras. Boletín de la Sociedad Geológica de América (Geological Society of America Bulletin), v.47, n 7, julio, 1091-1152
- Jones, T. S., 1938, Geology of Sierra de la Meña and paleontology of the Indidura Formation, Coahuila, Mexico. Boletín de la Sociedad Geológica de América (Geological Society of America Bulletin), v.41, n 1, enero, 69-149
- Kelly, W. A., 1936, Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico: Part II, Geology of the mountains bordering the valleys of Acatita and Las Delicias. Boletín de la Sociedad Geológica de América (Geological Society of America Bulletin), v.47, n 7, julio, 1009-1038
- Megaw, P. K. M., Ruiz, J. y Titley S. R., 1988, High-temperatura, carbonate-hosted Ag-Pb-Zn (Cu) deposits of northern Mexico. Economic Geology. v. 83, n. 8, diciembre, p. 1856-1885.

- Rubin, J. N. y Kyle, J. R., 1988, Mineralogy and geochemistry of the San Martin deposit, Zacatecas. *Economic Geology*. v. 83, n. 8, diciembre, p. 1782-1801.
- Sillitoe, R.H., 1993, Epithermal models: genetic types, geometrical controls and shallow features, en Kirkham, R.V.
- Starling, T., et al., 1997, Nuevos Conceptos que definen los controles estructurales y la Evolución del Yacimiento de San Martín, Zacatecas, México, trabajo para Grupo México.