



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Comparación de la disposición mineralógica y
microtermométrica de las estructuras del skarn Quebradillas
para su ubicación temporal dentro de la mineralización de La
Parrilla, Durango.**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Jesús Aguilar Plascencia

DIRECTOR DE TESIS

Augusto Antonio Rodríguez Díaz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 26 de Agosto del 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FIRST MAJESTIC
S I L V E R C O R P

La presente tesis de investigación fue sustentada y posible por las facilidades otorgadas por:

Compañía Minera First Majestic Silver Corporation, Departamento de Servicios Técnicos .

¡Muchas Gracias!

DEDICATORIA

A ti madre por tu apoyo incondicional en todo momento, por siempre estar a mi lado y creer en el camino que he elegido, por guiarme a lo largo de mi vida, por escucharme, aconsejarme y ser un ejemplo a seguir.

A mis compañeros y amigos, que han hecho de esta etapa una de las mejores experiencias de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser la casa que me formó y enseñó desde el bachillerato. Y por toda la gente que puede conocer gracias a esta.

A la Facultad de Ingeniería por brindarme los mejores profesores y las herramientas necesarias para desarrollarme como Ingeniero.

A mi asesor de Tesis el Dr. Augusto Rodríguez Díaz , por su apoyo, dedicación, esfuerzo, tiempo y todos los conocimientos que me ha brindado a lo largo de la elaboración de este proyecto.

A mis sinodales, por su tiempo y valiosas sugerencias a la tesis, los cuales ayudaron y contribuyeron al mejoramiento del presente trabajo; así como a mi desarrollo profesional.

A los ingenieros Jesús Quintanilla, Jose Navarro, Alfredo López y Juan García, así como al Departamento de Servicios Técnicos por el apoyo brindado durante la estancia en la Unidad La Parrilla.

Al Instituto de Geofísica e Instituto de Geología de la UNAM por las facilidades para utilizar sus instalaciones, en especial a la Maestra Edith Fuentes por su tiempo y apoyo.

ÍNDICE

Índice de Figuras	ii
Índice de Tablas.....	v
Resumen	6
1. Introducción.....	8
1.1 Skarn	8
1.2 Objetivos.....	10
1.2.1 Principal.....	10
1.2.2 Particulares	10
1.3 Hipótesis.	10
1.4 Minería Durango.....	11
1.5 Justificación.	12
1.6 Ubicación de la zona de estudio	14
2 Metodología.....	14
2.1 Campaña de campo y muestreo	15
2.2 Petrografía y Mineragrafía.....	16
2.3 Microscopio electrónico de barrido	17
2.4 Microtermometría	19
3 Contexto Geológico.....	23
3.1 Geología regional.....	23
3.1.1 Mesozoico.....	26
3.1.2 Cenozoico.....	27
3.2 Geología Local.....	28
3.2.1 Mesozoico.....	28
3.2.2 Cenozoico	30
3.3 Marco Tectónico	32
4 Geología del Yacimiento	33

4.1	Características de la roca encajonante y relación con estructuras mineralizadas	33
4.2	Caracterización de las asociaciones minerales	34
4.2.1	Cuerpo 460	35
4.2.2	Cuerpo Norte-Sur	37
4.2.3	Cuerpo 9-55	39
4.3	Alteración.....	41
4.4	Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	42
4.5	Microtermometría de Inclusiones Fluidas	45
5	Discusión	51
5.1	Asociación mineral y texturas.....	53
5.2	Microtermometría de Inclusiones Fluidas	56
6	Conclusiones.....	60
7	Importancia Social.....	62
8	Referencias	63
	Anexos.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 .-	Generalización de las etapas de formación de un yacimiento de tipo Skarn	8
Figura 1.2.	Ubicación de la Unidad Minera de La Parilla, tomado de First Majestic, 2016. Este distrito minero se encuentra en la carta SGM F13-B23	14
Figura 2.1.	Modelo 3D cortesía de First Majestic, en este se muestra los diferentes rebajes muestreados a las diferentes cotas de cada estructura.....	15
Figura 2.2.	Microscopio Axiolab ubicado en el Laboratorio de Petrografía y Microtermometría.....	17
Figura 2.3.	Equipo SEM Hitachi TM-1000.....	18
Figura 2.4.	Mecanismos de formación de inclusiones fluidas. Crecimiento plumoso (A). Crecimiento subparalelo (B). Disolución parcial (C). Fracturamiento y atrapamiento de inclusiones fluidas (D). Crecimiento irregular (E). Sombras de crecimiento (D).....	20

Figura 2.5. Equipo utilizado para el análisis de microtermometría, ubicado en el laboratorio de microtermometría del Instituto de Geología de la UNAM	23
Figura 3.1 Ubicación de La Parrilla dentro de las provincias fisiográficas, adaptado de Campa y Coney 1983.	24
Figura 3.2 Ubicación de La Parrilla en el límite de la Mesa Central con la Sierra Madre	25
Figura 3.3 Formación La Cuesta, secuencia rítmica de caliza color gris y lutitas.	29
Figura 3.4 Caliza parcialmente reemplazada por sulfuros. Miembro perteneciente a la Formación Indidura	30
Figura 3.5 Intrusivo granodiorítico plegando horizonte caliza con lutitas fuertemente silicificadas pertenecientes a la Formación Indidura.....	31
Figura 3.6. Esquematación de la Falla San Luis Tepehuanes (SL-T), esta separa la región septentrional y meridional de la Mesa Central (MC), es en el límite de la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central donde se ubica La Parrilla. (Tomado de Nieto Samaniego 200	33
Figura 4.1. En la fotografía “A” se observa la secuencia lutita - caliza arcillosa aflorando, esta es muy característica de la Formación Indidura. En la fotografía “B” se presenta la típica alteración que sufre la secuencia de la Formación Indidura en zonas proximales a plutones granodioríticos, en el caso de las lutitas, estas son alteradas localmente como horizontes de hornfels.	34
Figura 4.2 “A” representa una muestra de reemplazamiento característica del cuerpo “9-55”, “B” representa una muestra de reemplazamiento característica del cuerpo “460” y “C” representa una muestra característica de reemplazamiento del cuerpo “Norte-Sur”. En las 3	35
Figura 4.3 Vetilla de cuarzo (Qz) cortando una vetilla propilítica compuesta por epidota (Ep), clorita (Chl) y sulfuros (Sulf). PPL, zoom 20x.	36
Figura 4.4 Estructura de anfíbol (An) cloritizada y con presencia de arcillas, junto a esta se observa una vetilla de sulfuros (Sulf). PPL, zoom 10x.....	36
Figura 4.5 Esfalerita (Sp) exsolviendo calcopirita (Cpy) con sulfosales (Sf) vermiculares. Estos sulfuros se encuentran en la vetilla de la ilustración 3. PPL, 20x. .	37
Figura 4.6 Tremolita-actinolita (Tr) con clorita en matriz de cuarzo, esta representa la fase inicial de la alteración retrograda. PPL, Zoom 20x.	37

Figura 4.7 Intercrecimiento cristalino entre galena (Gal), esfalerita (Sp) y marcasita (Mar). NPL, 20x	39
Figura 4.8 Cuarzo plumoso (Qz) de probable evento epítermal cortando galena (Gal). NPL, 20x.....	39
Figura 4.9 Sulfuros en vetilla propilítica, se observan dos generaciones de marcasita. Con intercrecimiento de a sulfosal (Sfl) y esfalerita (Sp), en la esfalerita se observa la exsolución de calcopirita. Zoom 4x, PPL.....	39
Figura 4.10 aglomeración cristalina de pirrotina (Pirr), esfalerita (Sp) y galena (Gal), reemplazando calcita, NPL, 20x.....	39
Figura 4.11 Vetilla propilítica compuesta por clorita (Chl), epidota (Ep), calcita (Cc), cuarzo (Qz) y sulfuros (Sulf). NPL, Zoom 4x.....	40
Figura 4.12 Arsenopirita (Apy) reemplazada parcialmente por tetraedrita, se observa intercrecimiento con esfalerita (Sp) y cuarzo (Qz). PPL, zoom 20 x.....	40
Figura 4.13 Marcasita intercrecida con esfalerita, calcopirita y sulfosal (tetraedrita). Esta asociación es muy característica del pulso mineralizante de las vetillas de cuarzo de baja cristalinidad. PPL, zoom 20x.....	40
Figura 4.14 Cuarzo de baja cristalinidad (Qzl) en una matriz de cuarzo criptocristalino (Qzc) y calcita recristalizada (Cc). Se observa una serie de sulfuros (Sulf) aglutinados en la matriz como parte de una vetilla. PPL, zoom 4x.....	40
Figura 4.15 Del lado derecho se observa un skarnoide proximal a intrusivo granodiorítico, del lado izquierdo se presenta una lutita con abundante presencia de clorita y fuertemente silicificada.	41
Figura 4.16 Típica aglomeración de sulfuros como galena (Gal), esfalerita (Sp), y calcopirita (Cpy). En estos tipos de asociaciones minerales se observa cristales de sulfosales (Te) de la serie freibergita – tetraedrita.	43
Figura 4.17 La gráfica “A” representa la composición química de la especie de plata típicamente encontrada en la estructura Norte/Sur. En la gráfica “B” se observa la composición química de la especie de plata encontrada en la estructura 460. La gráfica “C” correspo	44
Figura 4.18 Histogramas acumulativos de temperaturas de homogenización, temperaturas de fusión y salinidad.	48

Figura 4.19 Inclusión fluida en calcita, esta se encuentra intercrecida con cloritas. Del lado izquierdo se presenta un zoom por 50x a inclusión primaria. En la imagen del lado derecho se observa el intercrecimiento cristalino (Clorita/Calcita), zoom 10x, PPL.....	49
Figura 4.20 Gráficas %wt NaCl vs Th, estos presentan los datos microtermométricos conjuntos por estructura que se realizaron.	50
Figura 5.1 tipos de skarn, alteraciones asociadas y morfología según la profundidad. D. Meinert, Lawrence, 2008.....	51
Figura 5.2 (A) representa la idelaización general del comportamiento morfológico de las estructuras estudiadas. (B) Fin de la continuidad de la mineralización de un rebaje, muy típico de Quebradillas. (C) Mapeo de rebaje en el cual se presenta la mineralización. (D) Mineralización encajonada en calizas recristalizadas, en esta se observa el acuñaamiento de la estructura.	52
Figura 5.3 Th promedio obtenidas de las diferentes muestras correspondientes a la estructura “460”. Th = 158 °C silicificación, TH= 215, 250 °C propilítica/subpropilítica, Th=315 °C progradada.....	57
Figura 5.4 Th promedio obtenidas de las diferentes muestras correspondientes a la estructura “Norte/Sur”.....	58
Figura 5.5 Th promedio obtenidas de las diferentes muestras correspondientes a la estructura “9-55”.....	59
Figura 5.6 Comportamiento generalizado de las temperaturas de homogenización a lo largo de las estructuras analizadas.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Producción minera del estado de Durango, año 2016, SGM.	12
Tabla 4-1 Tabla resumen del análisis microtermométrico, se presentan los resultados con base en la muestra y las familias de inclusiones localizadas por fase mineral.	46
Tabla 6-1 Paragénesis mineral propuesta para la mineralización de Quebradillas.	55

RESUMEN

El Distrito minero de la Parrilla se localiza en una zona considerada geológicamente de transición, entre las provincias fisiográficas de la Mesa Central y Sierra Madre Occidental. Este contiene yacimientos minerales predominantemente hidrotermales alojados en calizas y lutitas del Cretácico Temprano que han sido intrusionadas y mineralizadas por una serie de diques de monzonita-granodiorita de cuarzo del Eoceno, diques de Oligoceno, diques y enjambres de riolita-diorita, y diques de andesita-basalto del Mioceno-Cuaternario. Adicionalmente, la zona se ubica a lo largo del Cinturón de Plata Mexicano y el sistema de fallas San Luis-Tepehuanes según lo descrito por Nieto-Samaniego et al. (2007).

La Parrilla se clasifica como un yacimiento tipo skarn, compuesto por una serie de vetas lenticulares con una dirección preferencial NW-SE. Estas vetas presentan una mineralización del tipo Pb/Zn/Ag, con una tipología de yacimiento skarn distal. Dentro de La Parrilla, específicamente en la mina de Quebradillas, se analizaron los 3 cuerpos mineralizados principales, los cuales son (1) 460, (2) Norte/Sur y (3) 955. Estos se caracterizan por presentar una mineralización muy similar, con ligeros contrastes evolutivos, los cuales se ven reflejados principalmente en los cambios composicionales de las fases de plata presentes.

El estudio de las diferentes estructuras mineralizadas a diferentes cotas permitió realizar una caracterización paragénetica de los cuerpos y poder clasificarlo como yacimiento de tipo skarn. Esto se logró por medio de un estudio petrográfico, mineralógico, composicional (SEM, SWIR) y de inclusiones fluidas. Con estos análisis se obtuvo una asociación progradada con *Th de 300 – 350(°C), retrograda con dos fases, metales base y menas de plata, y un etapa final con afinidad epitermal*. La etapa con mayor presencia de plata es compatible con una alteración subpropilítica con Th de 160 – 200 (°C), durante el análisis de las estructuras esta alteración tiene una mayor presencia hacia el nivel 11-894 de la estructura Norte/Sur y en niveles someros de la 460, en la mayoría de las zonas observadas se presenta como una sobreimposición a una alteración de tipo propilitización. El *contraste de las menas de plata entre estructuras* se hace notorio tendiendo a una variación de la serie isomorfa Tetraedrita-Freibergita, con variaciones en los contenidos de As. Esto puede implicar dos pulsos mineralizantes diferentes o la evolución del mismo a lo largo del sistema.

ABSTRACT

The Parrilla Mining District is located in an area considered geologically transitional, between the physiographic provinces of the Mesa Central and Sierra Madre Occidental. It contains predominantly hydrothermal mineral deposits housed in limestone and shales of the Early Cretaceous that have been intruded and mineralized by a series of monsoon-granodiorite quartz dykes from Eocene, Oligocene dikes, rhyolite-diorite dykes, and andesite dykes -basalt of the Miocene-Quaternary. Additionally, the area is located along the Mexican Silver Belt and the San Luis-Tepehuanes fault system as described by Nieto-Samaniego et al. (2007).

La Parillas is classified as a skarn deposit, composed of a series of lenticular veins with a NW-SE preferential address. These veins have a mineralization of the Pb / Zn / Ag type, with a typology of distal skarn deposit. Within La Parilla, specifically in the Quebradillas mine, the 3 main mineralized bodies were analyzed, which are (1) 460, (2) North / South and (3) 955. These are characterized by a very similar mineralization, with slight evolutionary contrasts, which are mainly reflected in the compositional changes of the silver phases present.

The study of the different mineralized structures at different levels allowed a paragenetic characterization of the bodies to be classified as a distal skarn type ore body. This was achieved through a petrographic, mineralogical, compositional study (SEM, SWIR) and fluid inclusions. With these analyzes a prograde association with Th of 300-350 (° C), retrograde with two phases, base metals and silver ores, and a final stage with epithermal affinity was obtained. The stage with the highest presence of silver is compatible with a subpropylitic alteration with Th of 160 - 200 (° C), during the analysis of the structures this alteration has a greater presence towards level 11-894 of the North / South structure and in shallow levels of 460, in most of the observed areas it is presented as an overlay to a propylitic type alteration. The contrast of the silver ores between structures is noticeable tending to a variation of the Tetradrite-Freibergite isomorphic series, with variations in the contents of As. This may involve two different mineralizing pulses or the evolution thereof throughout the system.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Yacimiento tipo Skarn

Skarn es un término minero sueco que se para englobar al conjunto de minerales de ganga de la ganga, concretamente a silicatos de calcio que contienen Fe (granate, dióxido, wollastonita, etc.), que están asociados con algunas menas de sulfuros (Robb, 2010). En petrología metamórfica se usa la palabra skarn para describir cualquier roca metasomática con minerales de silicato de calcio (Robb, 2010), en cambio, en yacimientos minerales, su uso es más específico. Un depósito tipo skarn hace referencia a un yacimiento mineral desarrollado en rocas carbonatadas que se han alterado hidrotermalmente a un conjunto de silicatos de calcio junto con, en algunos casos, a magnetita o silicatos de magnesio (Ridley, 2013). Este tipo de depósitos están localizados, a una distancia de aproximadamente un kilómetro del contacto de una intrusión ígnea y, aunque no es un regla, esta define las fases proximales/distales de este tipo de yacimientos.

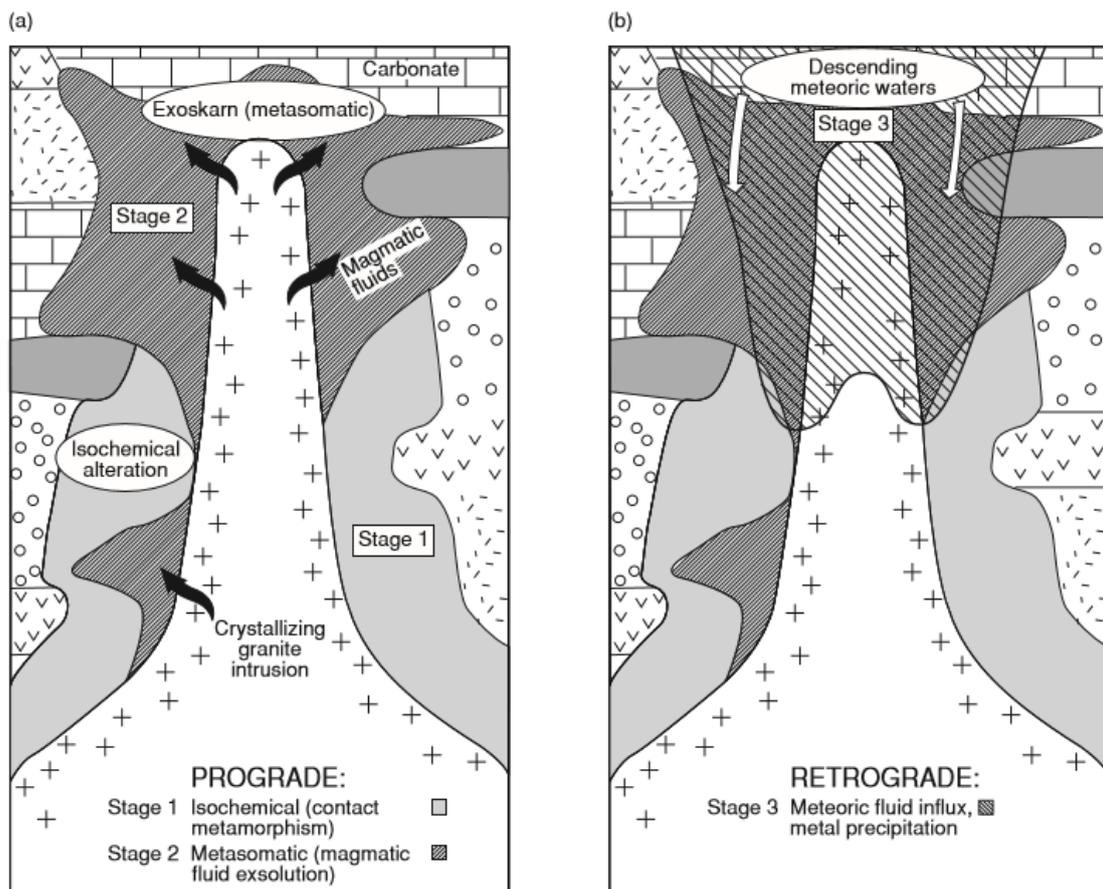


Figura 1.1.- Generalización de las etapas de formación de un yacimiento de tipo Skarn

A grandes rasgos, los yacimientos de tipo skarn se forman por la intrusión de un cuerpo plutónico, de composición intermedia a félsica, en un paquete de rocas carbonatadas donde los fluidos magmáticos interaccionaran con las rocas carbonatadas y posteriormente con fluidos meteóricos. Así que, este tipo de yacimiento se formarán en dos grandes etapas (Robb, 2010, Figura 1.1); (1 y 2) etapa progradante, isoquímica y metasomática, donde se forman la mayoría de los minerales calco-silicatados, los cuales son de más alta temperatura, y (2) etapa retrograda, de carácter metasomática-hidrotermal, donde precipitan de silicatos hidratados asociados a menas de metales base y preciosos. . Los minerales de mena se emplazan en las fracturas, discontinuidades o se diseminan a través de la roca alterada.

Dentro de los yacimientos tipo skarn, existe una variedad de depósitos de reemplazo en carbonatos. Estos son depósitos desarrollados en rocas carbonatadas que se reemplaza de forma metasomática y que generalmente carecen de minerales de ganga de silicato de calcio, pero en los cuales la mena está dominada por sulfuros. Es decir, se reemplazan por completo las secuencias de rocas carbonatadas por sulfuros, en estos la presenciade minerasles calcosilicatados va de nula a escaza. Este tipo de depósitos generalmente se forman a una mayor distancia de las intrusiones ígneas. Hay algunos distritos en los que ambos tipos de mineralización están presentes en distribuciones zonales alrededor de una intrusión, siendo los reemplazamientos los mas distales. Así mismo, son fuentes de una gran variedad de metales (e.j. zinc, plomo, cobre y metales preciosos, Robb ,2010). Los tipos de depósito skarn económicamente más importantes son clasificados según los metales contenidos, (Ridley, 2010):

- Skarns Cu, Cu – Au y Au, como en Ertsberg, West Papua, Indonesia (Mertig et al., 1994) y en las minas del área de Carr Fork del distrito de Bingham, Utah, EE. UU. (Atkinson y Einaudi, 1978).
- Skarns de W y W-Sn, como en King Island, Tasmania, Australia (Kwak y Tan, 1981) y Cantung, Territorios del Noroeste, Canadá (Mathieson y Clark, 1984).
- Skarn de Sn, como los asociados con greisens en los cinturones magmáticos mesozoicos del sur de China (Chen et al., 1992).
- Skarns de Zn – Pb y skarns de Fe, con abundante magnetitita. Estos últimos han sido fuentes de Fe, pero ni los skarns de Fe ni los de Zn – Pb tienen interés económico reciente.

- Zn – Pb – Ag y , ocasionalmente, junto con, Au en Leadville, Colorado, EE. UU. (Thompson y Arehart, 1990), minas Lark y EE. UU. En el distrito de Bingham en Utah, EE. UU. (Rubright y Hart, 1968) y Santa Eulalia, México (Megaw et al., 1988),
- Sn junto con W menor en Renison Bell, Tasmania, Australia (Kitto et al., 1997).

La producción nacional de metales base y preciosos proviene, en volumen de yacimientos de tipo skarn y epitermales (Camprubí, 2015), distribuidos a lo largo del centro y norte del país, y que están considerados como yacimientos tipo y gigantes (Laznicka, 2010). Actualmente, el estudio geocientífico detallado se ha incrementado por la importancia que tiene para fines exploratorios y para entender la influencia en los procesos tectónicos y su evolución en la distribución y acumulación de ciertas tipologías de yacimientos en regiones concretas del país (Camprubi, 2013 ; Meinert , 1987; Pinto-Línares et al., 2008)

1.2 Objetivos

1.2.1 Principal

Determinar, a través de las asociaciones minerales y el contexto geológico general del yacimiento, el origen de la mineralización de las estructuras de la mina Quebrtadillas en la distrito La Parrilla; así como las implicaciones de la variabilidad de las menas con fines exploratorios.

1.2.2 Particulares

- Caracterizar las estructuras mineralizadas y las unidades litológicas asociadas mediante un muestreo estructurado para definir el contexto geológico particular del yacimiento.
- Precisar las asociaciones minerales de mena y ganga en la estructura mineralizada y caracterizar sus texturas para definir una asociación mineral.
- Establecer un contraste en los eventos de paragénesis mineral para identificar los pulsos responsables de la mineralización económica.
- Reconocer los diferentes fluidos mineralizantes dentro del proceso de mineralización.
- Identificar criterios como guías de exploración económica para definir la continuidad de las estrucutras analizadas .

1.3 Hipótesis.

Se han propuesto dos modelos para explicar el origen de la mineralización en La Parrilla se tienen propuestos dos modelos de yacimientos minerales: i) depósitos de reemplazo de

carbonato relacionados con la intrusión, y ii) vetas mesotermales asociadas a fallas, ambos casos como una fase distal de un skarn. Esta mineralización puede estar relacionada con el enjambre de diques félsicos que afloran en la zona o por algún intrusivo que aún no se ha observado. Es por ello que podría encontrarse dos estilos de mineralización independientes que correspondieran a los modelos propuesto anteriormente. Adicionalmente, se infiere la presencia de múltiples pulsos mineralizantes, de los cuales algunos están íntimamente ligados con la presencia de menas de plata (Ag), con rangos de temperatura variables correspondientes a temperaturas de facies distales de skarn. Finalmente, por la disposición del yacimiento es factible la presencia de pulsos de baja temperatura compatibles con fases epitermales. Con base en lo anterior, se propone analizar por medio de petrografía, minerografía y microtermometría la correspondencia de dichos modelos con la información obtenida con estos análisis.

1.4 Minería en Durango

El Producto Interno Bruto (PIB) de Durango ascendió a más de 236 mil millones de pesos en 2016, de forma que aportó el 1.3% al PIB nacional (SGM, 2016). La minería aportó 11,655 millones de pesos, lo cual representa el 4.9 % del PIB del Estado de Durango (Secretaría de Economía, 2017), lo que representa una actividad económica muy importante para el Estado.

Históricamente la minería ha sido el pilar en la economía del estado de Durango y debido a ello se fundaron importantes centros de población, apoyando con esto el desarrollo del Estado. Más recientemente, y como consecuencia del incremento en el precio de los metales en los mercados internacionales, a muchas empresas les está siendo factible reactivar sus minas, lo que se refleja en el aumento en la actividad minera en los diferentes distritos mineros, destacando las minas de: Velardeña, El Herrero –La Bufa, Ciénega de Nuestra Señora, Cerro de Mercado, La Parrilla, San Rafael, Fanny, San José el Chico, El Rosario, La Dura/Minitas, Lluvia de Oro y La Platosa entre otras (INEGI, 2017). Además, de la minería de metales, el Estado cuenta con importantes zonas de explotación de minerales no metálicos ocupando los primeros lugares nacionales en la producción de mármol y bentonita (INEGI, 2018). En el Anuario Estadístico de la Minería Mexicana del SGM 2015, edición 2016, se informó, que el valor de la producción minero-metalúrgica, metálicos y no metálicos en 2016 en México fue 473,768,330,840.1 pesos. En el caso concreto de Durango, se tiene acorde a la SGM, en minerales no ferrosos, siderúrgicos y minerales no metálicos ingresos de 26,015,308,000.44 pesos (tabla 1.1), contra 27,221,128,477.42 pesos correspondientes a 2015,

con una disminución de 1,206,820,476.49 pesos participando con el 6.39% del valor total nacional.

Tabla 1-1. Producción minera del estado de Durango, año 2016, SGM.

Participación estatal de Durango en el mercado nacional				
Productos	Volumen toneladas	Valor(pesos)	Participación en volumen (%)	Posición de producción nacional
Oro	12,252.00	9,186,198,636.30	9.25	5
Plata	775,195.00	7,759,539,520.08	13.96	2
Cobre	5,049.00	458,616,582.34	.65	6
Hierro	1,844,438.00	1,093,089,508.40	15.25	4
Plomo	27,113.00	950,059,787.67	11.23	3
Zinc	108105.00	4,299,647,962.00	16.35	3
No metálicos				
Agregados pétreos	4,599,974.10	573,045,984.13	1.3	20
Arena	54,450.00	5,420,409.68	.05	27
Bentonita	8,350.00	49,519,361.86	76.48	1
Riolita	2,638,350.00	335,918,385.55	10.9	3
Rocas dimensionables	720,390.57	893,514,830.93	33.31	1
Yeso	79,650.00	13,150,433.71	1.03	16

1.5 Justificación

México es el primer productor de plata en el mundo, con una producción de 5, 600 [Ton/año] y una reserva estimada de 37, 000[Ton] en 2017 (USGS 2018). En cuanto a plomo y zinc, México se encuentra entre los diez primeros productores a nivel mundial de estos metales base claves en el desarrollo de la economía de un país. Con una producción en 2017 de 230,000[Ton] de plomo y 680,000 [Ton] de zinc (SGM, 2017). Es por ello que resulta de vital importancia la exploración, localización y caracterización de yacimientos minerales para la explotación de estos recursos.

La producción mundial de plata disminuyó en 2017 a 25,000 Ton, principalmente como resultado de una menor producción de las minas localizadas en Argentina, Australia, Bolivia,

Chile, Perú y los Estados Unidos (USGS, 2018). Las principales empresas productoras de plata del mundo sufrieron reducciones en la producción debido a problemas gubernamentales con licencias, leyes de mineral variables y huelgas generalizadas en diversos proyectos. Así mismo, la producción de plata de uso industrial disminuyó un 11% en 2017, en gran parte debido a una huelga en una de las cuatro minas de plata primarias en los Estados Unidos, que comenzó en el segundo trimestre de 2017. Por tanto, con la demanda física baja y un precio relativamente moderado para la plata, el desarrollo de nuevos proyectos mineros también se han ralentizado.

La Parrilla es la unidad minera propiedad de First Majestic, Silver Corp, que produjo en 2017 1,730,383 [Oz Ag], 1,014 [Oz de Au], 6,544,745 [Lb de Pb] y 3,944,232[Lb de Zn] (First Majestic, 2016). Con base a la información anterior se puede afirmar que la unidad minera tiene una considerable producción de *commodities* claves, lo cual implica que para continuar con un nivel de producción estable se requiere la incorporación de reservas y exploración continúa. Por esta razón se necesita la incorporación de información que ayude al entendimiento y explotación del yacimiento.

La importancia de estudiar este yacimiento radica en que, a pesar de ser un depósito que lleva un largo tiempo en producción, solo se cuenta con moderada información de carácter técnico y prácticamente nula de carácter científico donde se presumen las características del yacimiento e interpretaciones sobre su origen. Es por esta razón que resulta importante realizar estudios e incrementar la información sobre yacimientos. La finalidad de realizar más estudios de carácter técnico/científico, es para conocer el comportamiento del yacimiento desde un punto plantear estrategias de exploración en la región y en otros lugares con contextos geológicos similares. Además, la mina Quebradillas presenta problemas, tanto en la variabilidad en la recuperación de las menas durante el concentrado, como en de la variación en las leyes de Ag a lo largo del yacimiento.

La estructura Quebradillas proporciona un contexto geológico de gran relevancia desde el punto de vista científico para el estudio de los depósitos de Ag-Pb-Zn en Skarn. Debido a sus características geológicas, se justifica la realización de estudios detallados de las características de las estructuras mineralizadas, mena, paragénesis y la aplicación de técnicas determinativas para conocer las condiciones físico-químicas durante los procesos de fuente-transporte-deposito. Con base en esto se puede ampliar la información necesaria para

entender el modelo genético del yacimiento, lo cual permitiría desarrollar guías de exploración que vayan desde una escala local hasta regional.

1.6 Ubicación de la zona de estudio

La unidad minera de La Parrilla consta de 41 concesiones mineras contiguas que cubren un total de 69,478 hectáreas. Esta es propiedad y está operada por First Majestic S.A. de C.V. , esta representa una de las concesiones más grandes de First Majestic en el sur del estado de Durango. Se encuentra ubicada aproximadamente a 76 kilómetros al sureste del estado de Durango (Figura 1.2), en el municipio de Nombre de Dios. El acceso a la unidad se realiza a lo largo de la Carretera Federal No. 45, que conecta Durango con la ciudad de Zacatecas. En el marcador de 75 kilómetros, una carretera pavimentada de 4 kilómetros conduce al pueblo de San José de la Parrilla. A la mina y planta de procesamiento de La Parrilla se accede por un camino de grava de aproximadamente un kilómetro que comienza cerca de San José de la Parrilla.

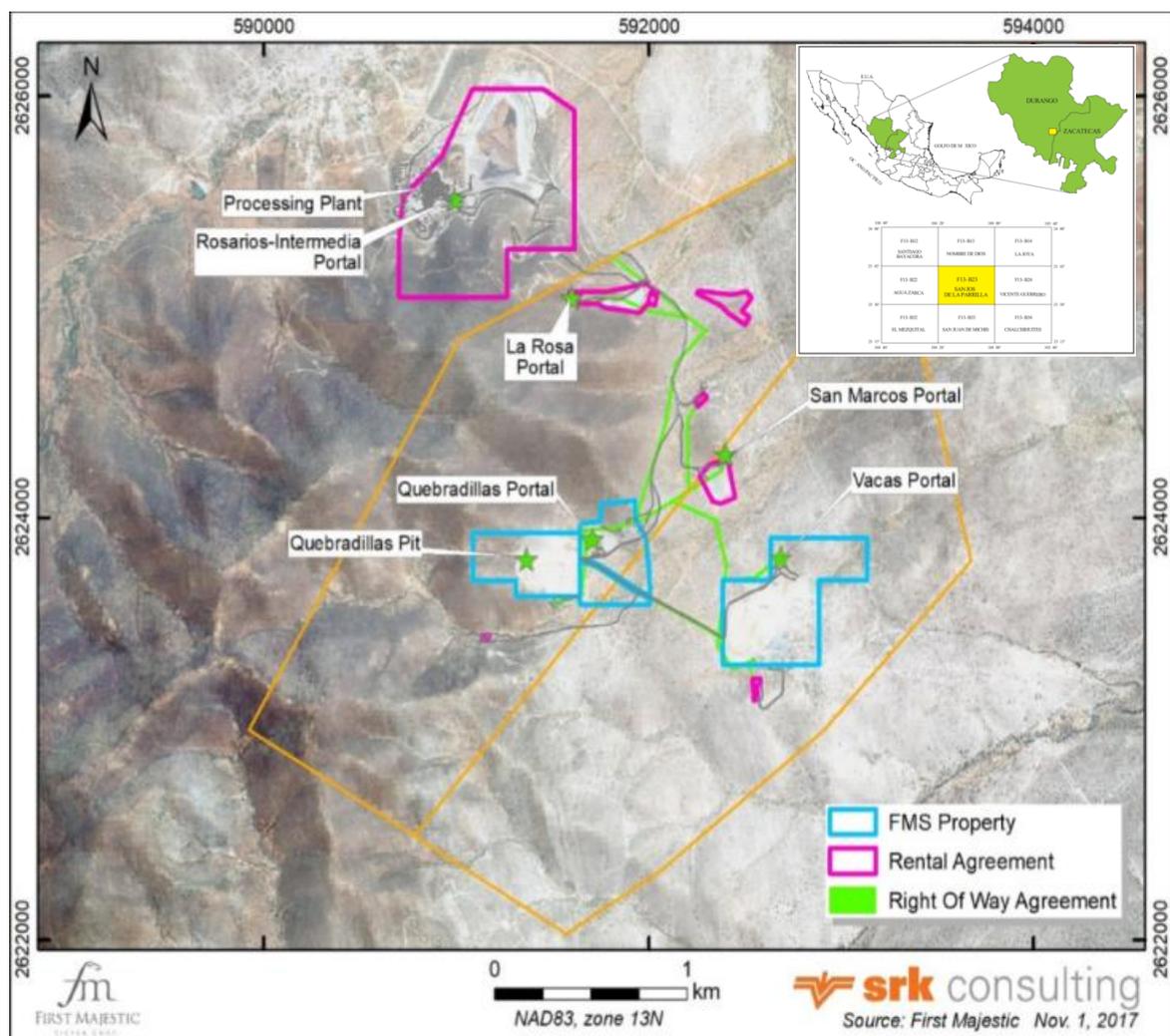


Figura 0.1. Ubicación de la Unidad Minera de La Parrilla, tomado de First Majestic, 2016. Este distrito minero se encuentra en la carta F13-B23

2 METODOLOGÍA

La investigación comenzó con la estructuración de los objetivos para cumplir con la investigación de los cuerpos mineralizados de la mina Quebradillas, en mutuo acuerdo y contando con las facilidades de la compañía minera First Majestic, proponiendo las metodologías para poder cumplirlos. Inicialmente se realizó una búsqueda bibliográfica exhaustiva donde se consultaron trabajos previos como libros, artículos, tesis, cartas geológicas y páginas web relacionados con el estado de Durango y la localidad de La Parilla con la finalidad de obtener la mayor información geológica y minera de la zona, abarcando un marco geológico regional y local. La instrumentación, técnicas y procedimientos que se utilizaron para caracterizar la paragénesis de la mineralización de la mina subterránea Quebradillas en La Unidad La Parilla se describen a continuación:

2.1 Campaña de campo y muestreo

Las muestras utilizadas para los diferentes análisis corresponden al trabajo de campo realizado en la unidad La Parilla, específicamente en la mina Quebradillas, la cual pertenece a la empresa First Majestic. Se realizó el muestreo por un período de 45 días, en el cual se trabajó utilizando mapas de rebajes a una escala 1:5000 y el mapa general de la mina escala 1:10000 (Figura 2.1), utilizado por el departamento de servicios técnicos de esta empresa. Cabe resaltar que el muestreo del presente trabajo solo abarca las 3 principales estructuras de esta mina, las cuales son conocidas como 460, Norte/Sur y 15-24/9-55. El trabajo consistió en dos tipos de muestreo, los cuales se describen a continuación:

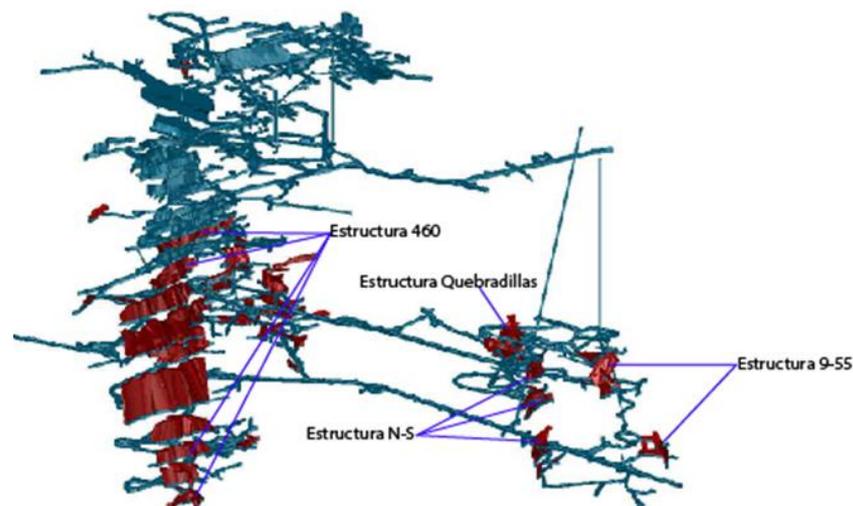


Figura 2.1. Modelo 3D mina Quebradillas, cortesía de First Majestic, en este se muestra los diferentes rebajes muestreados a las diferentes cotas de cada estructura.

1. Muestreo de barrenos.- Se utilizó la base de datos de barrenación del departamento de exploración de la Unidad La Parilla, con la finalidad de delimitar y muestrear intervalos representativos de mineralización (menas), alteración y roca caja de los tres principales cuerpos mineralizados. Con este tipo de muestreo se recolectaron 25 muestras.
2. Muestreo de rebajes (Figura 2.1).- Se tomaron muestras de los tres principales cuerpos mineralizados a diferentes cotas. Es decir, la parte más somera, intermedia y profunda de cada cuerpo, abarcando roca caja, alteración y mineralización, Con este tipo de muestreo se recolectaron 45 muestras.

Debido a que el muestreo fue muy extenso, de las 70 muestras recolectadas se consideró un total de 21 muestras representativas para realizar análisis específicos. De las 21 muestras seleccionadas, 15 fueron para realizar estudios petrográficos y mineralógicos y 6 para el estudio de inclusiones fluidas.

2.2 Petrografía y mineragrafía

El estudio petrográfico inició con una descripción macroscópica general de todas muestras, con el objetivo de seleccionar las más representativas para el estudio de la mina Quebradillas, teniendo en cuenta la mineralogía, textura, estructuras y representatividad. Las muestras fueron descritas, clasificadas y cortadas con cortadora de disco adiamantado a lo largo de las zonas mas representativas según sus asociaciones minerales, alteraciones, texturas y paragénesis. Se realizan un total de 21 láminas delgadas con acabado espejo de la Formación Indidura, mineralización e intrusivos asociados espacialmente con los cuerpos mineralizados para observaciones a través de luz transmitida y reflejada, esto último fue hecho para todas las láminas.

La identificación mineralógica (asociaciones minerales) y textural de las mismas, incluyendo mena y ganga, mediante microscopía óptica de luz reflejada y transmitida (Ramdohr, 1980; Craig y Vaugham, 1994). En las observaciones petrográficas se determinó el porcentaje modal de cada fase mineral presente utilizando tablas de estimación visual de Baccelle L. y Bosellini A. (1965).

El equipo utilizado para la petrografía con luz transmitida fue el microscopio Zeiss modelo Axiolab perteneciente al Laboratorio de Petrografía y Microtermometría del Departamento de

Recursos Naturales del Instituto de Geofísica, UNAM (Figura 2.2). Este equipo tiene un analizador de imágenes Carl Zeiss Axiocamm Emulation acoplado, que se empleó para tomar microfotografías de las diferentes asociaciones minerales presentes, con ayuda del software Axio Vision 3.1. Adicionalmente, se utilizó el laboratorio de Petrografía y microtermometría de Sistemas Petroleros perteneciente al Instituto de Geología, UNAM. En este laboratorio se utilizó un microscopio de luz reflejada y transmitida marca Zeiss modelo Nr. 3139000108, el cual tiene acoplado un analizador de imágenes Carl Zeiss Axiocamm Emulation acoplado para tomar microfotografías, con ayuda del software Imagefocus 6.3.

La descripción de fases minerales opacas se hizo de acuerdo a Fenoll Hach-Alí y Gervilla (2005), mientras que las fases minerales traslúcidas se identificaron acorde al “Atlas de Asociaciones Minerales en Lámina Delgada” de Joan-Carle Megarejo (2003). Finalmente, para la clasificación de rocas ígneas se utilizó el diagrama de rocas ígneas plutónicas de Le Maitre et al. (2002).



Figura 2.2. Microscopio Axiolab ubicado en el Laboratorio de Petrografía y Microtermometría

2.3 Microscopio electrónico de barrido

La microscopía electrónica de barrido (SEM, Scanning Electron Microscopy) por sus siglas en inglés, se basa en el principio de la microscopía óptica en la que el haz de luz es sustituido por un haz de electrones. Con esto se logran obtener resoluciones de hasta 100 [Å], las cuales son muy superiores a las de cualquier instrumento óptico. Es de gran utilidad para examinar superficies pulidas de rocas, se eliminan las limitaciones ópticas de las ondas de luz visible y cuentan con una gran profundidad de foco, lo cual permite obtener microfotografías de electrones

retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés) y análisis semicuantitativos de la composición de los minerales presentes en ella, incluso en superficies irregulares como las de fracturas (Ipohoroski, 2011).

El estudio de las muestras se puede trabajar de dos modos, del modo SE-BSE (Secondary Electrons - Backscattered Electrons) o sólo con BSE. El primero se usa para examinar materiales rugosos/relieve irregulares, poco consolidados, es decir, para estudios en los que son más importantes los aspectos morfológicos que los composicionales. El segundo se usa cuando el microscopio lleva incorporado un sistema de análisis puntual, el cual permite diferenciar componentes por sus diferentes reflectividades y determina la composición química de zonas puntuales. (Carretero-León y Pozo-Rodríguez, 2007).

Para este trabajo se utilizó el equipo SEM TM-1000, marca Hitachi, el cual se ubica en el Laboratorio de Petrografía y Mineragrafía del Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica, UNAM (Figura 2.3). Esta técnica se utilizó para identificar de forma precisa cada una de las fases minerales de plata presentes en las muestras, así como para verificar la presencia de este elemento en la galena. En total se analizaron 6 láminas delgadas pulidas, 4 pertenecientes a la propia mineralización y 2 a intrusivos alterados que fueron mineralizados. Como objetivo secundario, se verificó la composición de las esfaleritas para verificar los contrastes composicionales que presentes, asociados a las diferentes texturas/asociaciones.



Figura 2.3. Equipo SEM Hitachi TM-100

2.4 Microtermometría

La técnica de microtermometría consiste, de manera general, en el procedimiento de calentamiento y enfriamiento de las inclusiones fluidas para obtener diversos parámetros como (1) la temperatura de homogeneización, esta es la temperatura mínima de atrapamiento de las inclusiones fluidas que, en determinadas circunstancias, equivale a la temperatura de atrapamiento; y (2) la salinidad del fluido, expresada como porcentaje en peso equivalente de NaCl y, en caso de inclusiones con cristales hijos, expresada como porcentaje en peso de NaCl, KCl, MgCl₂, u otros solutos (Camprubí 2008). Esta técnica asume que las inclusiones se comportan como sistemas cerrados, isocóricos e isopléticos, de forma que durante el proceso de calentamiento y enfriamiento se observará el comportamiento de las fases atrapadas en las inclusiones.

Las inclusiones fluidas son defectos en la estructura cristalina de un mineral en los que se pueden almacenar algún tipo de fluido durante su crecimiento del mismo mineral. Estos fluidos se presentan como líquidos, gases o fundidos, los cuales almacenaran indirectamente las características ambientales en las que se encontraba el mineral durante su formación y crecimiento. La mayoría de las inclusiones miden menos de 100 μm y entre 2 y 20 μm en promedio, pero pueden ser más pequeñas al grado de ser defectos puntuales de la red cristalina del mineral.

Las inclusiones fluidas tienen distintos mecanismos de formación. Pueden formarse por un crecimiento súbito dejando una textura irregular en los bordes de un cristal seguido de un crecimiento consistente y regular dejando huecos dentro del cristal en el proceso (Figura 2.4 .A). Un crecimiento simultáneo de dos cristales subparalelos que convergen y se unen en un punto produce cavidades intercristalinas que evolucionan a cavidades intracristalinas al final de este proceso (Figura 2.4.B). La disolución parcial de un cristal previamente formado generando una textura irregular en sus bordes, seguido de la precipitación del mismo mineral nucleando a partir del cristal irregular puede formar cavidades en el cristal final (Figura 2.4 C). Similar al punto anterior, el fracturamiento de un cristal previamente formado seguido de precipitación del mismo mineral puede generar cavidades en el cristal (Figura 2.4 D). El crecimiento irregular de los cristales genera cavidades intracristalinas (Figura 2.4 E). La presencia de agentes desconocidos en el ambiente de formación obstruyen el correcto crecimiento de un cristal generando “sombras” de crecimiento (Figura 2.4 F).

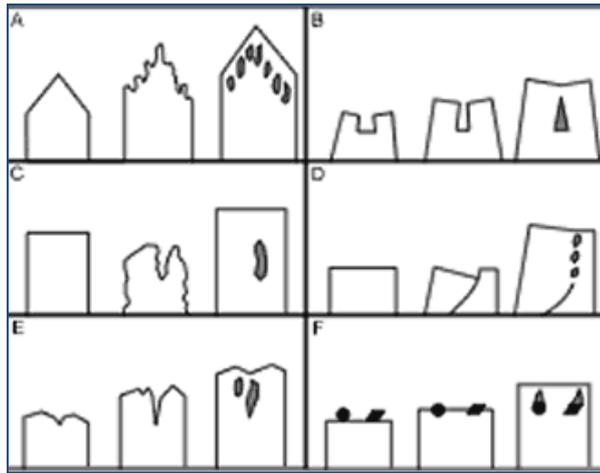


Figura 2.4. Mecanismos de formación de inclusiones fluidas. Crecimiento plumoso (A). Crecimiento subparalelo (B). Disolución parcial (C). Fracturamiento y atrapamiento de inclusiones fluidas (D). Crecimiento irregular (E). Sombras de crecimiento (D), (Roedder. E, 1984) .

Las inclusiones fluidas se pueden clasificar en función del estado de sus componentes o del momento de formación y posterior evolución de la inclusión. De acuerdo a sus componentes, las inclusiones fluidas pueden ser: i) monofásicas, es decir, que se componen únicamente de vapor o únicamente de líquido; ii) bifásicas, en las que se encuentran en conjunto vapor, líquido ó sólido en diversas proporciones; iii) multifásicas, además de líquido y vapor contienen una o más fases de cristales, ocasionalmente se puede presentar otro fluido inmiscible; iv) multisólidas, en caso de que éstas fases sólidas superen el 50% del volumen total de la inclusión. Adicionalmente, existen algunos tipos singulares de inclusiones fluidas como aquellas con líquidos inmiscibles, que se caracterizan por tener dos burbujas, o aquellas que contienen vidrio debido a la composición silicatada del fundido que quedó atrapado.

Con base en el momento de formación y evolución de la inclusión fluida estas se clasifican como primarias y secundarias. Las inclusiones primarias son las que se forman al momento de la cristalización del mineral y no se someten a ningún evento post-atrapamiento, de tal forma que se considera que contiene porciones del fluido original a partir del cual se produjo la precipitación del mineral huésped. Las inclusiones fluidas secundarias son aquellas que se formaron en un evento posterior a la cristalización del mineral o que eran inclusiones primarias que sufrieron un evento de post-atrapamiento cambiando o reemplazando al fluido original. Característicamente las inclusiones fluidas secundarias se disponen en agrupaciones alineadas, si bien, algunas veces las primarias presentan esta característica. Adicionalmente, existen las inclusiones fluidas seudosecundarias las cuales pueden estar definidas por zonas

de crecimiento. Es decir, que se formaron previamente a una etapa de sobrecrecimiento del mineral huésped de modo que su extensión está limitada por la zoneación del mineral. La característica principal de estas inclusiones fluidas pseudosecundarias radica en su extensión, ya que nunca cruzan un cristal por completo.

Una vez formadas las inclusiones fluidas pueden estar sometidas a procesos que las modifican de cierta manera. Las inclusiones con forma irregular pueden reequilibrar sus paredes a formas regulares de cristal negativo o con morfología esferoidal debido a procesos de solución interna y la precipitación a partir del fluido atrapado. A partir de lo anterior se puede dar el caso que las paredes de la inclusión la estrangulen de modo que a partir de la inclusión original se forman dos o más inclusiones de menor tamaño. La decrepitación natural es un evento en el que la inclusión fluida posee una presión interna mayor que la presión de confinamiento de modo que esta estalla formando grietas y provocando la fuga del fluido y a su vez permitiendo el relleno de la misma a partir de nuevos fluidos, una textura característica de este evento es la formación de inclusiones satélites de la inclusión decrepitada. Otros efectos que se pueden mencionar son la difusión (cuando los componentes de la inclusión pueden difundirse a través del mineral huésped), reacción (cuando la inclusión es reactiva con el mineral huésped) y la migración (las inclusiones migran en minerales altamente solubles)(Camprubí 2008).

La microtermometría de inclusiones fluidas es una técnica con multitud de aplicaciones, tanto en estudios académicos como en exploración minera (Camprubí, 2010 SGM, 2012). Esta técnica, sobre una sólida base de estudios petrográficos, permite determinar o estimar: 1) las temperaturas de formación de un depósito mineral, 2) la salinidad y contenido en diversos solutos de los fluidos mineralizantes, 3) la evolución temporal y la zonación espacial de la temperatura y la salinidad, 4) la existencia de diversos mecanismos de precipitación mineral, 5) la existencia de pulsos hidrotermales de diversa índole, 6) la presencia de canales de alimentación en un depósito hidrotermal y relacionar la posición de éstos con la distribución de mineralizaciones económicas, 7) la migración de salmueras a través de una cuenca sedimentaria y su relación con la maduración del petróleo o la formación de ciertos tipos de depósitos minerales, 8) la interacción entre fluidos químicamente contrastantes, 9) la posición de la paleosuperficie o del paleonivel freático bajo presión hidrostática, y 10) la tipología o subtipología a la que puede pertenecer una mineralización concreta, así como muchas otras cuestiones de índole metalogenética (Camprubí, 2008).

Para este análisis se determinó la secuencia paragenética de las diferentes asociaciones minerales, a partir de un estudio petrográfico convencional. En este estudio se verificó los diferentes tipos de cuarzo, calcita y de esfalerita asociados a las etapas de alteración progradada, retrograda y mineralización observables en las láminas delgadas. Para el estudio de inclusiones fluidas se utilizaron inclusiones primarias bifásicas y trifásicas, sin efectos evidentes de modificaciones post-atrapamiento.

Con este estudio se pretende obtener: i) la compatibilidad del sistema con los parámetros mesotermales, ii) verificar la sobreimposición de algún evento de menor temperatura y iii) determinar las características, temperatura y salinidad, de los principales pulsos mineralizantes y el contraste de estos a lo largo de las diferentes estructuras. Es importante entender que las variables microtermométricas de las inclusiones fluidas pueden ser reveladoras de mineralizaciones económicas, los criterios de guía en base a rangos de temperatura o de salinidad varían en función del tipo de yacimiento mineral y, en algunos casos, varían entre yacimientos distintos de la misma tipología. Con base en lo anterior, se plantearan los posibles escenarios de la evolución de la mineralización de la mina Quebradillas, procurando ubicar cada zona mineralizada dentro del modelo de yacimiento tipo Skarn.

Los análisis de microtermometría de inclusiones fluidas se realizaron en el laboratorio de Microtermometría del Instituto de Geología de la UNAM. El equipo utilizado está compuesto por un controlador electrónico de temperatura LINKAM, una platina THMSG 600 y un microscopio Axiolab (Figura 2.5). La platina utilizada tiene un rango de operación de -100 a 600 °C, el software de apoyo para el uso del equipo fue el Lynksis32 V.2.4.3. y para la captura de imágenes se utilizó el programa Scope Essential V. 22.5.

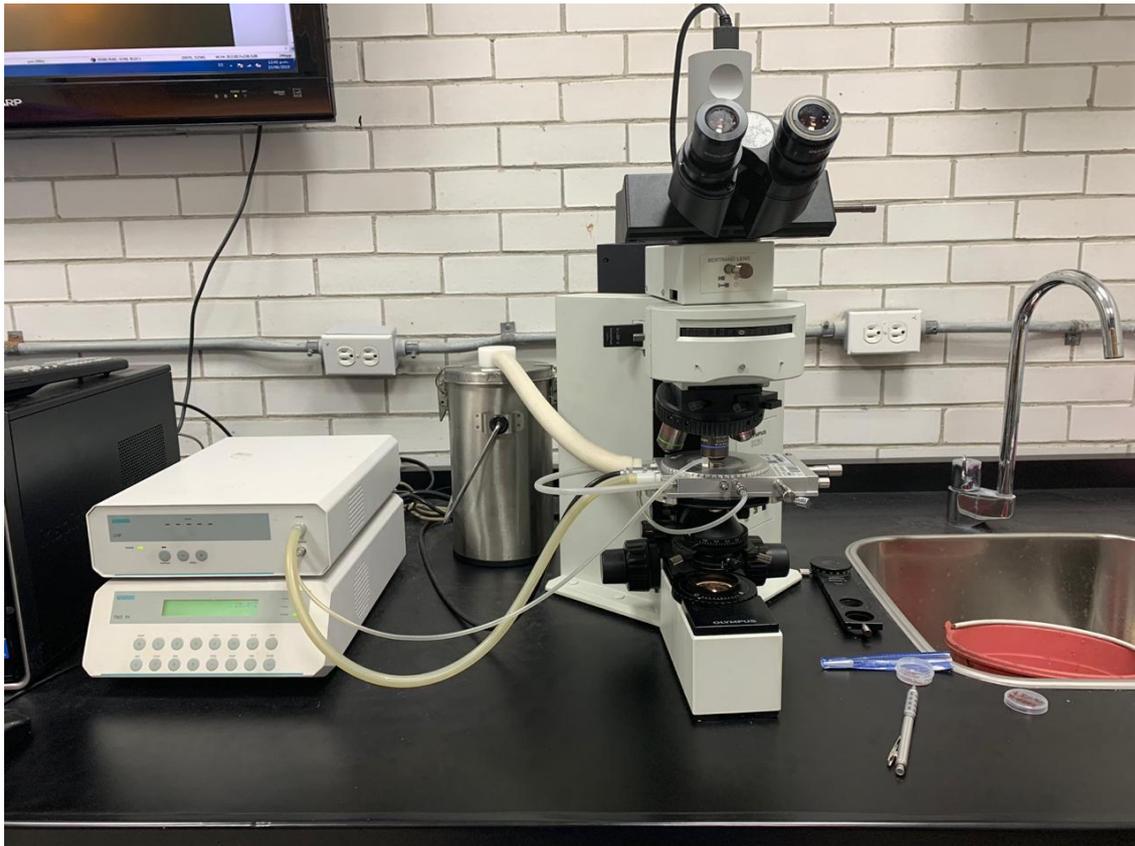


Figura 2.5. Equipo utilizado para el análisis de microtermometría, ubicado en el Laboratorio de Microtermometría del Instituto de Geología de la UNAM

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 Geología regional

La Unidad minera de La Parrilla se encuentra en los límites entre las provincias fisiográficas de la Mesa Central y Sierra Madre Occidental (Figura 3.1). El distrito de La Parrilla contiene depósitos minerales hidrotermales alojados por calizas y lutitas del Cretácico Temprano que han sido intruídas por una serie de plutones de monzonita-granodiorita en el Eoceno, y enjambres de diques en el Oligoceno de riolita-diorita, y por cuerpos de andesita-basalto del Mioceno al Plioceno (Garduño y Saldívar, 1983). Los plutones del Eoceno han transformado las rocas del Cretácico en mármoles, hornfels, skarnoides y skarns.

La Mesa Central es una meseta elevada que comprende rocas sedimentarias marinas de la Cuenca Mesozoica de México Central, al este, y dos secuencias de rocas volcanosedimentarias: el terreno Parral al noroeste y el Terreno Guerrero, al suroeste (Centeno-García et al. 2008). No se ha definido un límite claro entre los terrenos volcanosedimentarios y las rocas calcáreas de la Mesa Central, pero Nieto-Samaniego et al.

(2007) proponen que el Sistema de fallas de San Luis-Tepehuanes podría representar el límite entre ambos (Figura 3.1). Este sistema de fallas, delimita la parte suroccidental de la Mesa Central y tiene una orientación general NW-SE, afecta a rocas del Oligoceno y Neógeno cortando sistemas de fallas de orientación N-S localizados en la parte media de la Mesa Central. Además, el sistema de fallas San Luis-Tepehuanes divide los dos sectores que conforman la Mesa Central, los cuales tienen características estructurales y Geológicas distintas (Figura 3.2).

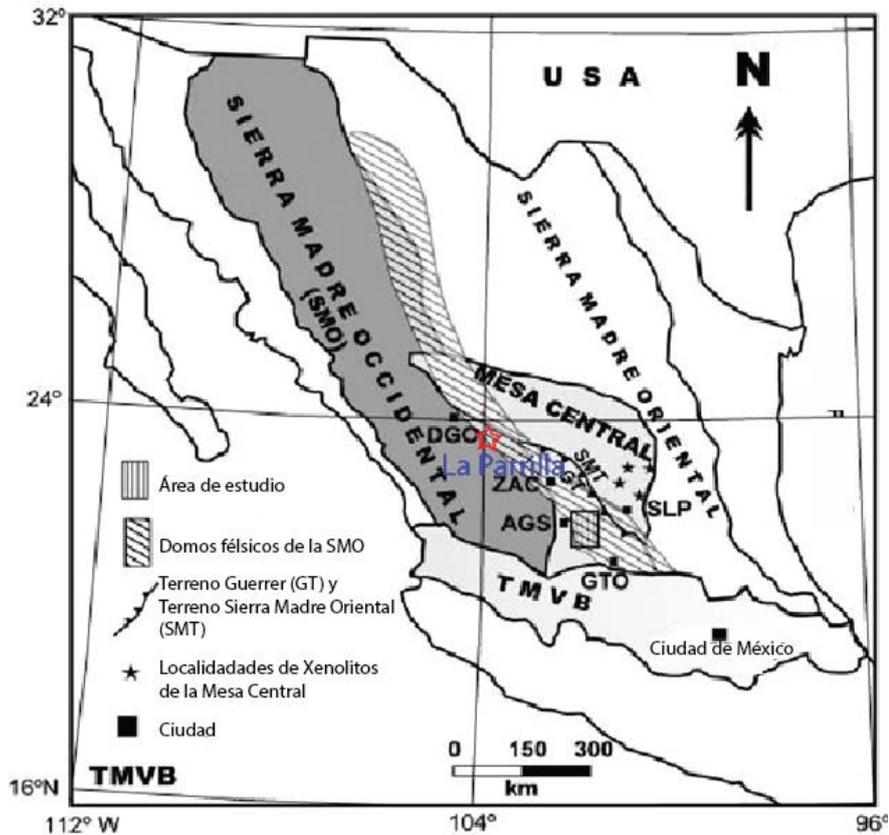


Figura 3.1 Ubicación de La Parrilla dentro de las provincias fisiográficas, adaptado de Campa y Coney 1983.

La provincia de Sierra Madre Occidental es una gran provincia volcánica que se formó como resultado de la subducción de la placa de Farallón bajo América del Norte y localmente, se superpone a las rocas de la Mesa Central. La Sierra Madre Occidental consta de cinco complejos ígneos principales (Luca Ferrari et al, 2005), desde el más antiguo hasta el más moderno, son:

- Rocas plutónicas que van del Cretácico Tardío al Paleoceno .

- Andesitas eocénicas y riolitas menores, tradicionalmente agrupadas en el Complejo Volcánico Inferior • Dos pulsos de ignimbritas silíceas ubicadas en el Oligoceno (ca. 32–28 Ma) y Mioceno temprano (ca. 24–18) Ma), y agrupados en el Super Grupo Volcánico Superior.
- Lavas basálticas/andesíticas de transición que surgieron hacia el final de, y después de cada pulso ignimbrita; correlacionada con la Cordillera Basáltica Andesítica Sur Provincia del sudoeste de los Estados Unidos.
- Rocas volcánicas posteriores a la subducción que consisten en basaltos alcalinos e ignimbritas emplazadas en el Mioceno tardío, Plioceno y Pleistoceno (McDowell y Keizer 1977, Clark et al. 1979 y Ferrari et al. 2007).

El distrito minero de La Parrilla está situada en el límite entre una secuencia sedimentaria calcárea del Mesa Central, correlacionada con las Formaciones Cretácicas de Cuesta del Cura e Indidura, y las rocas Paleógenas volcánicas-plutónicas de la Sierra Madre Occidental. Este distrito se ubica a lo largo del Cinturón de Plata Mexicano y el SLTFS Nieto-Samaniego et al. (2007).

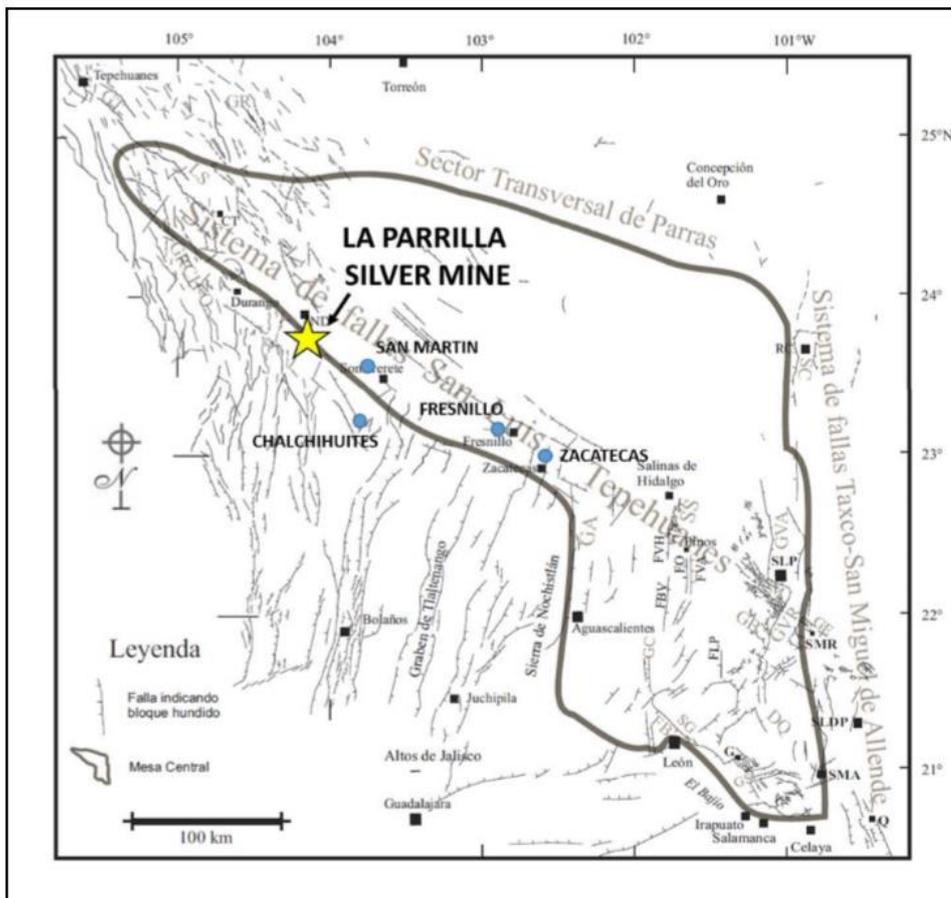


Figura 3.2 Ubicación de La Parrilla en el límite de la Mesa Central con la Sierra Madre, cortesía First Majestic 2017.

3.1.1 Mesozoico

Formación de la Cuesta del Cura : De manera general esta unidad está constituida por calizas negras con laminación que varía de delgada a mediana (Rogers et al., 1957; Clemons y McLeroy, 1962; Ledezma-Guerrero, 1967; Echanove-Echanove, 1986; Mitre-Salazar, 1989; Aranda-Gómez et al., 2000; Dávalos-Álvarez, 2003; Barboza-Gudiño et al., 2004), en algunas ocasiones la caliza se observa café grisácea, laminada y ondulada (Pérez-Rul, 1967); asimismo, contiene lutita (Rogers et al., 1957; Clemons y McLeroy, 1962; Ledezma-Guerrero, 1967; Mitre-Salazar, 1989; Barboza-Gudiño et al., 2004) y, ocasionalmente, limolita (Mitre-Salazar, 1989) como lentes y nódulos de pedernal (Rogers et al., 1957; Barboza-Gudiño et al., 2004, *Léxico estratigráfico*, SGM). Imlay (1936) menciona que esta unidad se compone principalmente de capas delgadas de caliza, con ondulaciones, y compactas de color gris oscuro a negro; incluye lutita gris y numerosos lentes de pedernal, algunas capas de caliza son finamente laminadas con bandas grises y negras intercaladas.

Formación Indidura: en la Sierra de Parras, Coahuila, Imlay (1936) describe cinco miembros de la Formación Indidura que son transicionales entre sí, el miembro 1) varía considerablemente en espesor y litología, incrementando su espesor hacia el sur y oeste, la Formación Cuesta del Cura es cubierta por capas de yeso que corresponden a este miembro; el miembro 2) consiste enteramente de lutita, por lo que es fácil de erosionar y genera pronunciadas depresiones topográficas; el tercer miembro 3) es una alternancia de lutita y arenisca, el cuarto miembro 4) consiste de lutita y pocas capas de caliza negra, (mientras que el quinto miembro 5) se compone de caliza lutítica de estratificación delgada. En el Distrito Minero de Concepción del Oro (Zacatecas) la Formación Indidura consiste en capas de espesores variables de limolita, lutita y caliza lajosa o laminada que, por lo regular, ocupa la parte baja de las laderas y se distingue en el campo o en fotografías aéreas, porque la vegetación que la cubre es muy escasa. La parte inferior de la Formación Indidura consta de una sucesión de espesor variable (hasta un máximo de 10 m de espesor) de caliza arcillosa y lutita de color gris oscuro, sobreyace a una sucesión de más de 60 m de espesor de lutita y lutita calcárea de color café claro de estratificación delgada (Enciso de La Vega, 1967). En la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, Barboza-Gudiño et al., (2004) describen que la Formación Indidura se compone de caliza arcillosa y lutita de color gris a pardo con tonalidades rojo violáceo y amarillo verdoso en superficies intemperizadas, las capas de caliza varían de gruesas en la base y hacia la cima se constituye una secuencia rítmica de capas de caliza y

arcillas con horizontes terrígenos y materiales probablemente volcánoclasticos de color café, gris claro, blanco, amarillo y rojo con abundantes Inoceramus),(Léxico estratigráfico, SGM).

3.1.2 Cenozoico.

Formación Ahuichila: esta constituida por capas de conglomerado, arenisca, lutita, caliza lacustre y toba, que afloran cerca de Ahuichila, Coahuila. El conglomerado esta compuesto por fragmentos angulosos y subredondeados de caliza, se localiza a 3 km al sur de Cinco de Mayo, Durango; en las capas de esta unidad se observa un grado moderado de deformación, lo cual contrasta con la ligera deformación sufrida por las unidades más jóvenes del terciario (Pantoja-Alor, 1962). La parte superior de ésta formación está compuesta por un conglomerado de espeso variable con fragmentos de caliza del tamaño de las gravas finas a medianas, con cantidades menores de pedernal de forma tabular, arenisca y toba riolítica, cementado por arcilla y arena calcárea de color gris, esta Formación no aflora en la mina de Quebradillas pero en superficie se observa hacia la zona de Vacas, tal como la describe (Pantoja-Alor, 1962,Léxico estratigráfico, SGM).

Cuerpos ígneos.- En La Parrilla aflora un complejo de plutones donde, el principal cuerpo una granodiorita sin ser fechada, pero se ha deducido que intruyó en el Eoceno, ya que es muy similar a la monzonita de cuarzo en el Cerro de la Gloria en San Martín, en Durango (Rubin y Kyle, 1985). El stock de Cerro de la Gloria fue fechado por K-Ar a 46.2 ± 1 Ma (Damon et al. 1983). Este conjunto de intrusiones del Eoceno es responsable de la formación de skarns y de algunas de las mineralizaciones tipo pórfido en México. Los cuerpos granodioríticos de la mina Quebradillas se presentan como diques de textura fanerítica, con alteraciones propilíticas a subpropilíticas, y microvetilleos de sulfuros que no prosperan a lo largo de estos diques. El cuerpo granodiorítico principal no aflora en la mina y no se tiene evidencias de su proximidad, pero en las muestras tomadas , para el presente trabajo, se observa una alteración moderada que varía de subpropilítica a propilítica. Las riolitas-riodacitas presentan por lo general una textura porfirítica y consisten principalmente en cuarzo y feldespatos alcalinos (sanidina-ortoclasa). Estas rocas no han sido datadas en el área, pero en Fresnillo y otras localidades en la Mesa Central, sugieren una edad del Oligoceno (Velador et al. 2010, Tuta et al. 1988). En la zona de la Parrilla, las unidades riolíticas-dacíticas se encuentran predominantemente al sur y al oeste del área de la mina. Adicionalmente, se pueden observar tobas, tobas soldadas y flujos de basalto.

3.2 Geología Local

La geología de La Parrilla está representada por la estratigrafía del distrito minero de Chalchihuites, al sureste de la zona de estudio (SGM, carta F13-B23). Las unidades más antiguas en el área son rocas calcáreas del Cretáceo inferior al Superior de la Formación Cuesta del Cura y la Formación Indidura. Sobreyaciendo a este, se encuentra el conglomerado calcáreo de Ahuichila, a su vez, está parcialmente recubierto por flujos de dacitas/riodacitas del Eoceno-Oligoceno y tobas riolíticas de la Provincia de la Sierra Madre Occidental. Los basaltos mioceno-cuaternarios representan el último evento volcánico; el resto de las unidades son representadas por secuencias volcánicas Eoceno-Oligoceno, conglomerados cuaternarios y gravas no consolidadas. Finalmente, es importante mencionar que las formaciones Cretácicas han sido intrusionadas por un enjambre de monzonitas/granodiorita del Eoceno, diques de andesita, diques de riolita-riodacita del Oligoceno y diques de basalto del Mioceno (reinterpretación SGM, F13-B35 2001).

3.2.1 Mesozoico

Formación de la Cuesta del Cura.- Esta formación aflora hacia el SW de la mina Quebradillas en superficie (Figura 3.3), y está compuesta por una intercalación rítmica de calizas grises, con espesores de 5 - 15 cm, y lutitas pardo-grisáceas, de 2-5 cm de espesor. Algunos horizontes de lutitas presentaban esporádicamente lentes de pedernal color grisáceo, la secuencias de caliza/lutitas presentaban un rumbo de Nw/Se con echados al Sw. Esta se encuentra subyaciendo a la Formación Indidura y no se observó ningún afloramiento de esta en la mina Quebradillas. Si bien, diversos autores han registrado espesores variados dependiendo de la localidad, por ejemplo se han reportado espesores mínimos de 34 m (Villeda et al., 2005), 62 m (Clemons y McLeroy, 1962), 64 m (Pérez-Rul, 1967) y 65 m (Ledezma-Guerrero, 1967); mientras que los espesores máximos son de 100-150 m (Barboza-Gudiño et al., 2004), 270 m (Rogers et al., 1957), hasta 400 m (Ledezma-Guerrero, 1967).



Figura 3.3 Formación Cuesta del Cura, secuencia rítmica de caliza color gris y lutitas.

Formación Indidura: En las inmediaciones de la mina Quebradillas la Formación Indidura se caracteriza por presentar una intercalación de calizas arcillosas, con espesores de 15-40 [cm], y limolitas calcáreas de 5-20 cm de espesor, esta intercalación presenta espesores de 10 a 15 metros, los cuales se encuentran parcialmente reemplazados por sulfuros masivos, principalmente en las calizas de los niveles más profundos. En los niveles más someros, esta Formación presenta una intercalación de caliza negra (mudstone) con lutitas de color negro a grisáceo, ambas con espesores muy variables de 10-40 cm, donde los son poco frecuentes y de menores dimensiones. Estas dos secuencias de rocas descritas, pertenecen al miembro inferior de la Formación Indidura (PEMEX, 1988b). Cabe mencionar que los afloramientos de la Formación Indidura en la mina Quebradillas presentaban una fuerte recristalización y las texturas primarias de calizas/limolitas no se encuentran bien conservadas. Esta formación en las Lomas de San Pablo en la Sierra de Parras, Coahuila la sección completa está bien expuesta y tiene un espesor de 652 m (Imlay, 1936). En la región de Concepción del Oro, Zacatecas Rogers et al., (1957) midieron 180 m de espesor en esta unidad. En el flanco septentrional de la Sierra de Parras y en las Lomas de San Pablo, LedezmaGuerrero (1967)

midió 650 m de espesor de la Formación Indidura. Su espesor es variable, con rangos de los 13 m hasta más de 2500 m (PEMEX, 1988b). El espesor de la Formación Indidura en la Sierra de Catorce (Barboza-Gudiño et al., 2004) es difícil de medir por los numerosos pliegues recumbentes que la afectan, se estiman más de 150 m.

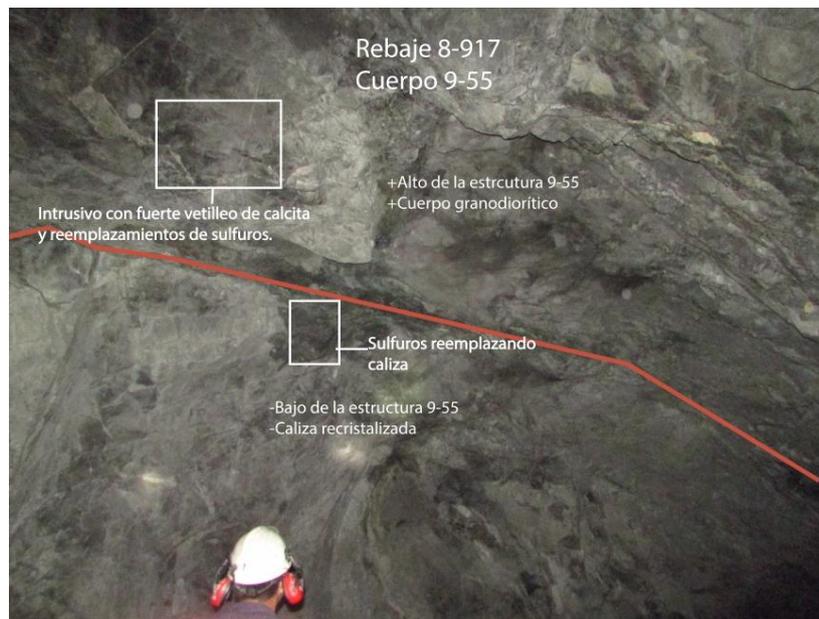


Figura 3.4 Caliza parcialmente reemplazada por sulfuros. Miembro perteneciente a la Formación Indidura, en este caso el intrusivo actúa como una barrera impermeable.

3.2.2 Cenozoico

Formación Ahuichila: Para el caso de la mina Quebradillas esta formación no aflora en las proximidades. Ledezma-Guerrero (1967) describe afloramientos de la Formación Ahuichila 5 km al norte de Ahuichila, Coahuila; en el Cerro del Cristo, Zacatecas y algunos afloramientos en el Bajío de Ahuichila que abarca parte de Zacatecas, Durango y Coahuila. Otros afloramientos se observan al norte y parte final de la Sierra de La Cadena, cerca del puerto de La Ventana (Pantoja-Alor, 1963). Aflora al norte de Alamillo de Galeana y al sur de Eugenio Zapata, cerca de Rodeo, Durango (Enciso de La Vega, 1963). La Formación Ahuichila aflora dentro de la Carta Viesca escala 1: 100 000 (Pérez-Rul, 1967), formando un afloramiento alargado desde el sur del Cerro de Los Gatos hasta el Frontón de Ahuichila en Coahuila, también aflora en el Arroyo de Juan Eugenio, Coahuila (Pérez-Rul, 1967). El conglomerado Ahuichila varía en espesor de 0 a 1600 m dentro de los cuadrángulos Torreón-Pedriceñas

(Clemons y McLeroy, 1962); Pantoja-Alor (1963) en la región de San Pedro del Gallo, Durango, reporta de 0 a 2000 m de espesor.

Cuerpos Ígneos.- Los cuerpos intrusivos muestreados en la mina Quebradillas, son enjambres de diques, de composición granodiorítica, que cortan los diferentes horizontes de la Formación Indidura. Estos se presentan como una etapa final y generan una ligera deformación de la estratificación (Figura 3.5). La mayoría de estos no presentan mineralización económica, y en los que se llega a presentar se tienen ligeros microvetilleos de sulfuros que no prosperan a lo largo de estos cuerpos. Debido al comportamiento tan restrictivo que presenta la mineralización en estos diques, se pueden considerar como barreras impermeables. Es importante mencionar que estos enjambres de diques presentan alteraciones de tipo propilítica a subpropilítica y alrededor de estos las calizas presentan una fuerte recristalización. En el caso de las lutitas/limolitas se observa una fuerte silicificación generando hornfels (Figura 3.5).



Figura 3.5 Intrusivo granodiorítico alterando horizonte caliza con lutitas fuertemente silicificadas, hornfels, pertenecientes a la Formación Indidura.

3.3 Marco Tectónico Regional

Durante el Cretácico inferior se instauró un ambiente de plataforma somera en toda la zona correspondiente a la Mesa Central, donde se depositaron potentes secuencias de sedimentos marinos que dieron lugar a la formación de paquetes de caliza intercalados con horizontes arcillosos. Estas secuencias fueron afectadas durante el Cretácico Superior hasta el Paleógeno Inferior por la Orogenia Laramide.

Posteriormente en toda esta zona, durante el Eoceno-Oligoceno se desarrolla un magmatismo calcoalcalino, relacionado con la fase final de la subducción de la placa Farrallón, el cual está representado por potentes paquetes de rocas volcánicas de composición félsica, dando origen a la Sierra Madre Occidental (Mc Dowell y Clabaugh, 1981). En el Mioceno, el retroceso (rollback) de la placa de Farallón, originó un régimen tectónico distensivo que ocasionó la formación de numerosas fallas normales, generando la zona de horst y graben, conocida como Basin and Range.

En la región del distrito minero de La Parilla se han reconocido tres eventos de deformación en la región: i) la compresión Laramide compuesta por una tendencia noreste-suroeste a este-oeste, ii) una extensión con una tendencia de norte-sur a norte-noreste y iii) una extensión de este a oeste. La deformación Laramide creó una serie de pliegues en el noroeste-sudeste de ángulo bajo y fallas inversas, además afectó a toda el área de la Mesa Central entre 90 y 37 Ma (Campa y Coney 1982, Starling 2006; Nieto-Samaniego et al. 2007). Durante el Eoceno Tardío al Oligoceno el área estaba bajo un régimen extensional con dirección norte-sur, que fue acompañada por una reactivación transtensional sinistral de las fallas inversas de bajo ángulo de tendencia noroeste, formadas por la compresión Laramílica, que produjeron fallas normales de este-oeste a noroeste y sudeste. Esto generó fracturas distensivas entre los conjuntos de fallas inversas de tendencia noroeste (Starling 2006 ; Nieto-Samaniego et al. 2007). Finalmente durante el Mioceno, otro evento de extensión produjo fallas normales de las unidades volcánicas del Eoceno y Oligoceno en el noreste y noreste. Las fallas normales se interpretan como mineralización posterior a la fecha de formación y son más representativas de la Cuenca y el Tipo de Extensión (Starling 2006 y Nieto-Samaniego et al. 2007).

El sistema de fallas de San Luis-Tepehuanes es una característica estructural importante de la Mesa Central. Este se presenta como un lineamiento con tendencia noroeste/sudeste que se extiende desde Tepehuanes, Durango hasta San Luis de la Paz en Guanajuato (Figura 3.6, Nieto-Samaniego et al. 2007). Se cree que el sistema de fallas de San Luis-Tepehuanes, se asocia y “controla” la ubicación de los depósitos minerales en el Cinturón de Plata Mexicano, como los depósitos de Real de Ángeles, Fresnillo-Juanicipio, Sombrerete (distrito de San Martín-Sabinas), Chalchihuites (Del Toro-La Colorada) en Zacatecas; y los depósitos Avino y La Parrilla en Durango.

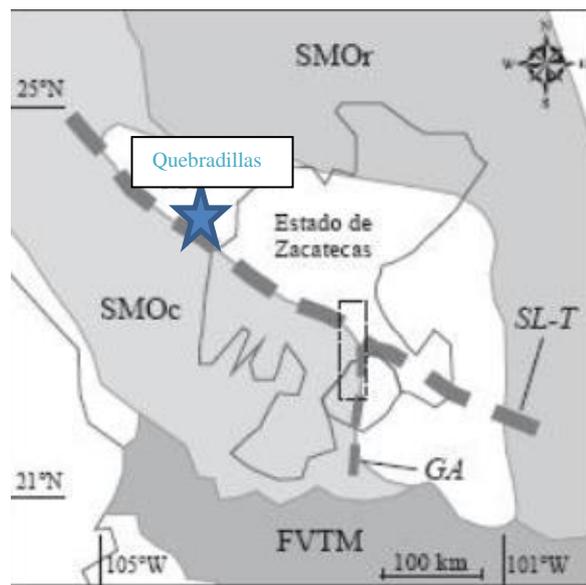


Figura 3.6. Esquema de la Falla San Luis Tepehuanes , esta separa la región septentrional y meridional de la Mesa Central (MC). El distrito minero de la Parrilla esta en el límite entre la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central. (Tomado de Nieto-Samaniego, 2008).

4 GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO

En este capítulo se detallan las características geológicas del yacimiento mineral las Quebradillas, en aspectos como: 1) características de la roca encajonante y relación con estructuras mineralizadas, 2) caracterización de las asociaciones minerales, 3) alteración y 4) estudios microtermométricos.

4.1 Características de la roca encajonante y relación con estructuras mineralizadas

La roca encajonante de los cuerpos mineralizados consiste en una sucesión de calizas arcillosas con lutitas, de color gris oscuro a negro de la Formación Indidura (Figura 4.1 A). En las zonas más proximales a los cuerpos mineralizados La Formación Inidura se presentaba como hornfels con una intercalación de horizontes color negro y gris claro (Figura 4.1 B).

Con base en lo anterior, se trata de la parte inferior de la Formación Indidura (Vega et al. 1967). la cual es descrita como una sucesión de espesor variable hasta un máximo de 10 m que comprende caliza arcillosa y lutita de color gris oscuro, de estratificación variable a muy delgada, sobreyace a una sucesión de más de 60 m de espesor de lutita y lutita calcárea de color café claro de estratificación delgada.



Figura 4.1. En la fotografía “A” se observa la secuencia lutita - caliza arcillosa aflorando, esta es muy característica de la Formación Indidura. En la fotografía “B” se presenta la típica alteración que sufre la secuencia de la Formación Indidura en zonas proximales a plutones granodioríticos, en el caso de las lutitas, estas son alteradas localmente como horizontes de hornfels.

En la mina Quebradillas, se observa que los horizontes mineralizados coinciden con zonas donde las calizas predominan sobre las lutitas, en estos horizontes las calizas son reemplazadas parcialmente por sulfuros masivos. Estos reemplazamientos proximales, se asocian con plutones granodioríticos o zonas de fallamiento/fracturamiento. Los plutones granodioríticos se presentan como un enjambre de diques de textura fanerítica, con una moderada alteración que va de propilítica a subpropilítica. Las estructuras analizadas en esta Tesis son: 460, Norte/Sur y 9-55/15-24 coinciden con el estilo de mineralización descrito anteriormente.

4.2 Caracterización de las asociaciones minerales

Las asociaciones minerales de los tres cuerpos analizados en esta tesis, consiste en un intercrecimiento cristalino entre tres fases minerales principales, las cuales son: sulfuros de hierro (marcasita, piritita y pirrotina), esfalerita (con diferentes contenidos de hierro) y galena. Estas presentan diferentes granulometrías, proporcionalidad e intercrecimientos texturales con otras fases minerales menores. En muestra de mano los tres cuerpos muestran similitudes texturales y en asociación mineral (Figura 4.2), a excepción de la pirrotina, que únicamente, se presenta en los niveles más profundos de las estructuras mencionadas.

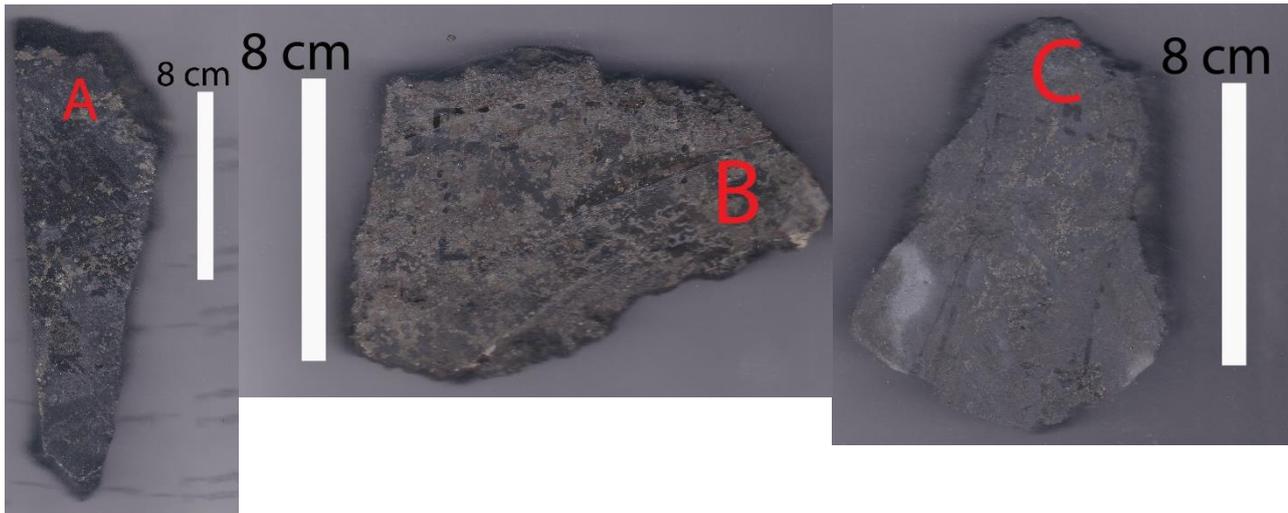


Figura 4.2 “A” representa una muestra de reemplazamiento característica del cuerpo “9-55”, “B” representa una muestra de reemplazamiento característica del cuerpo “460” y “C” representa una muestra característica de reemplazamiento del cuerpo “Norte-Sur”. En las 3 se presentan texturas y mineralogía similares en muestra de mano.

Petrográficamente, los tres cuerpos analizados presentan una serie de similitudes mineralógicas y contrastes particulares, los cuales se describen a continuación.

4.2.1 Cuerpo 460

Se caracteriza por tener cuatro asociaciones minerales principales, estas son las que se pudieron reconocer y caracterizar con mayor precisión durante el análisis.

Asociación 1 y 2.- (Figura 4.5) con calcita (50%), calcopirita (2%), cuarzo (25%), clorita/epidota (5%), arcillas (5%), esfalerita (4%), galena (1%), marcasita/pirrotina (5%) y diopsida/tremolita-actinolita (5%). La única diferencia entre ambas asociaciones, radica en la proporción entre sulfuros de hierro y tipo de esfalerita, esta última presenta un mayor contenido de hierro. La asociación uno presenta pirrotina con esfalerita rica en hierro, mientras que la asociación dos se compone por marcasitas y esfaleritas ricas en zinc. Los cristales de esfalerita, marcasita/pirrotina y galena son de granulometría fina, menor a 0.3 mm. Las cloritas se aprecian como relleno de cavidades o alterando piroxenos/anfíboles (Figura 4.3), cuarzo y calcita se presentan como cristales euedrales y como relleno de cavidad, con granulometrías de 0.1 – 1 mm. Los piroxenos/anfíboles observados se presentan como fenoblastos de 0.1 a 0.5 mm, los cuales se encuentran completamente cloritizados, la textura primaria nos indica que son parte de la alteración progradada de la roca, la cual está siendo superpuesta por una alteración retrogradada. En la asociación 1) se presenta un ligero

desarrollo de la enfermedad de la calcopirita en las esfaleritas, la cual se vuelve mayor en la asociación 2).

Asociación 3.- esta compuesta por epidota (4%), calcita (40%), cuarzo (30%), esfalerita/calcopirita (5%), galena (10%), marcasita/pirita (10%) y sulfosales (<1%<, freibergita). La esfalerita presenta un enriquecimiento en hierro, la granulometría de esfalerita y galena varían de 0.5 a 1.5 mm (Figura 4.6). En esta tercera etapa hay una importante presencia de pirrotina/marcasita/pirita con granulometrías de 0.5 a 2 mm, intercrecida con galena y ocasionalmente con esfalerita de las asociaciones (1) y (2). En esta asociación tres, se presentan sulfosales de plata diseminadas en esfalerita e intercrecidas con galena. En el cuerpo 460, los sulfuros de hierro (marcasita, pirita y pirrotina) muestran un reemplazamiento entre sí, y están intercrecidas con los dos tipos de esfalerita: (a) rica en hierro (Fe) con un fuerte desarrollo de la enfermedad de la calcopirita propia de la asociación 2) y 3); y b) rica en zinc(Zn) asociada a la asociación uno.

Asociación 4.- con cuarzo (45%), calcita (50%) y pirita (5%), esta última en menor proporción (Figura 4.4). La calcita se observa como relleno de cavidades, mientras que el cuarzo se dispone principalmente en la matriz como fase microcristalina y relleno de cavidad. En esta etapa la pirita está reemplazando a la pirrotina/marcasita y en algunas zonas como agregado cristalino de granulometría que va de 0.1 - 0.4 mm.

Estas representan las 4 texturas más representativas de esta estructura, las cuales se pueden ligar con una serie pulsos mineralizantes diferentes.

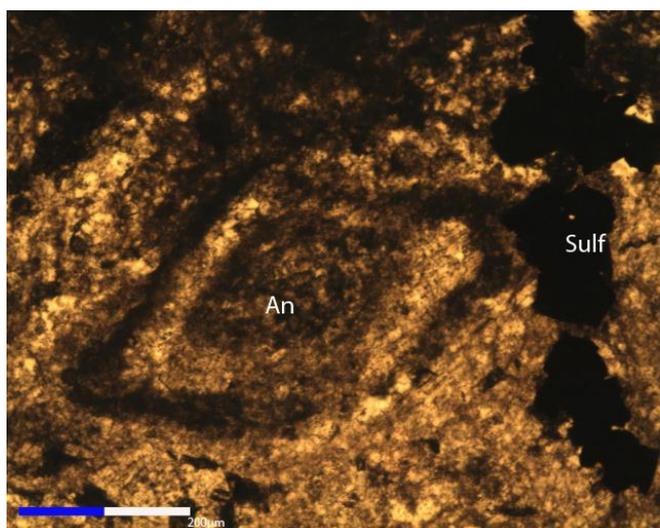


Figura 4.4 Cristal eudral de anfíbol (An) cloritizado y con presencia de arcillas, junto a este se observa una vetilla de sulfuros (Sulf). PPL, zoom 10x.

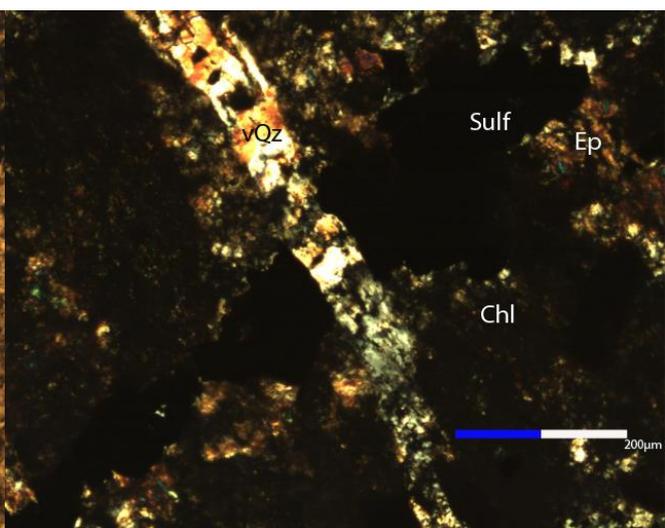


Figura 4.3 Reemplazamiento en caliza con vetilla de cuarzo (Qz) cortando una vetilla compuesta por epidota (Ep), clorita (Chl) y sulfuros (Sulf). NPL, zoom 20x.

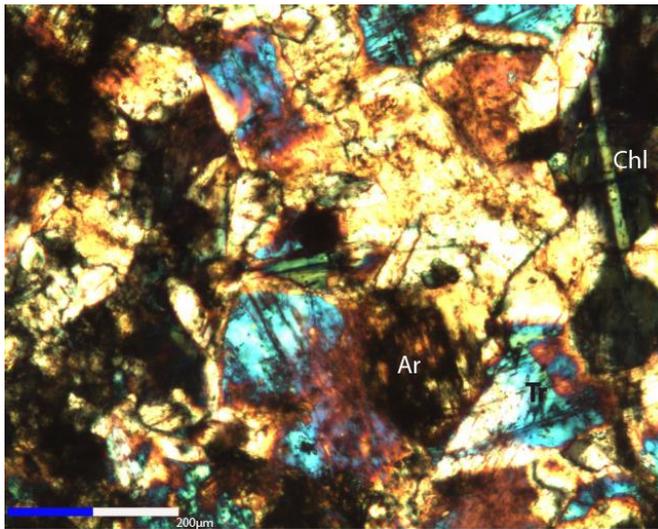


Figura 4.5 Tremolita-actinolita (Tr) con clorita en matriz de cuarzo, esta representa la fase inicial de la alteración retrograda. PPL, Zoom 20x.

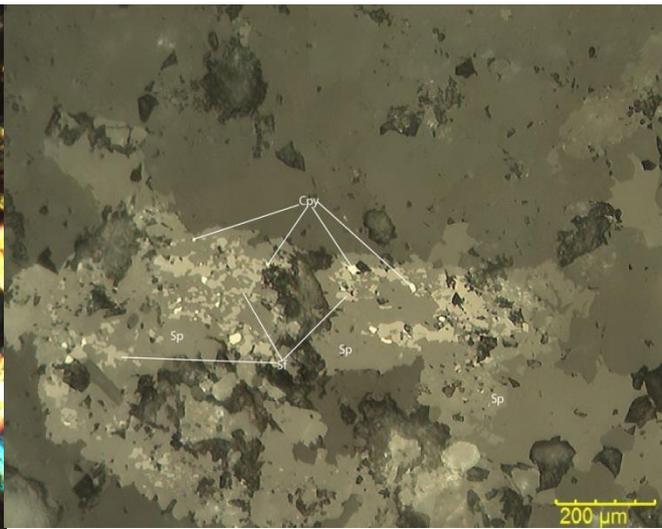


Figura 4.6 Esfalerita (Sp) exsolviendo calcopirita (Cpy) con sulfosales (Sf) vermiculares. Estos sulfuros se encuentran en la vetilla de la ilustración 3. PPL, 20x.

4.2.2 Cuerpo Norte-Sur

Este cuerpo se caracteriza por la presencia de dos asociaciones minerales (anexo clave 11-894-M4), la primera asociación se puede subdividir en dos, la cuales se describen a continuación:

- Subdivisión 1.- con arcillas (5%), calcopirita (2%), cuarzo eudral y anhedral (30%), calcita (40%), feldespatos alterandose a clorita/epidota (9%), esfalerita/calcopirita (5%), galena (3%), marcasita/pirita (5%) y tremolita-actinolita (1%). La clorita se presenta como alteración de algunos feldespatos y anfíboles/piroxenos (tremolita-actinolita), y como relleno de cavidades y en vetillas. Adicionalmente, la clorita esta intercrecida con cuarzo/calcita y diversos sulfuros, si bien no se observa una clara relación con las menas de plata. La marcasita/pirita, esfalerita y galena tienen granulometrías de 0.2 a 0.5 mm, mientras que el cuarzo y calcita la granulometría varía de 0.3 a 1 mm. En esta asociación la esfalerita se presenta intercrecida con calcopirita, sin presncia de la enfermedad de la calcopirita.
- Subdivisión 2.- con cuarzo (25%), calcita (40%), clorita/epidota (9%), calcopirita/esfalerita (10%), galena (5%), marcasita/pirita/arsenopirita (10%) y tetraedrita (1%). En esta subdivisión se observa un incremento en la granulometría de galena, esfalerita y marcasita, la cual varía de 0.5 a 1.5 mm. Se observa tetraedrita

incluida principalmente en galenas, pero también se observo en menor medida incluida en esfaleritas y marcasitas, con granulometría que va de 5 - 10 μm . Las vetillas están compuestas por epidota, cuarzo y calcita, y se presentan en los extremos de estas, la tetraedrita se observa intercrecida con galena, en las zonas donde la tetraedrita está ausente la granulometría de galena y marcasita aumenta hasta los 1.5 mm. Finalmente, es importante mencionar que se presentan una fase de calcopirita, la cual se encuentra como exsoluciones en la esfalerita y este fenómeno se presenta en conjunto con la presencia de arsenopirita (Figura 4.10).

Esta primera asociación se subdividió en 2 subasociaciones con base en la presencia de mena de plata observada, esta nunca se presenta en las zonas con relictos de tremolita-actinolita, y siempre se ve fuertemente ligada a zonas con presencia de clorita/epidota. Adicionalmente, es importante mencionar que se observa una mineralogía que se mantiene constante variando únicamente la granulometría.

La segunda asociación mineral (Figura 4.8) se caracteriza por tener cuarzo (plumoso/baja cristalinidad, 60%), calcopirita (4%), esfalerita (10%), tetraedrita (<1%<) y pirita (25%). En esta asociación se observan vetillas con cuarzo de baja cristalinidad (plumoso) y, ocasionalmente, con esfalerita y tetraedrita. En estas vetillas, se observa a la esfalerita intercrecida con cuarzo y, en algunas zonas, se muestran exsoluciones de calcopirita. En las vetillas de cuarzo de baja cristalinidad se tiene presencia de tetraedrita y esfalerita, la cual normalmente se observa cortando a la galena y sulfuros de hierro. En esta asociación la granulometría de las menas metálicas disminuyen considerablemente hasta 15 a 50 μm (Figura 4.9), y la presencia de sulfuros de plata se ve restringida a la periferia de las vetillas/microvetilleos. Es importante destacar la relación de corte entre las vetillas de la asociación mineral 2 respecto a la 1, en todas las áreas observadas la asociación 2 corta a la 1, ocasionalmente se observa una superposición de 2 sobre la 1.



Figura 4.7 aglomeración cristalina de pirrotina (Pirr), esfalerita (Sp) y galena (Gal), reemplazando calcita, NPL, 20x

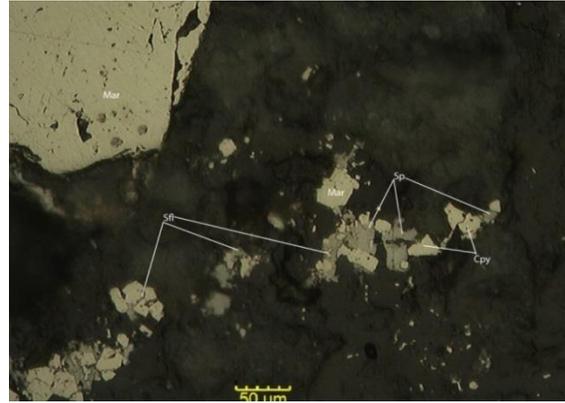


Figura 4.10 Sulfuros en vetilla propilítica, se observan dos generaciones de marcasita. Con intercrecimiento de a sulfosal (Sfl) y esfalerita (Sp), en la esfalerita se observa la exsolución de calcopirita. Zoom 4x, PPL.

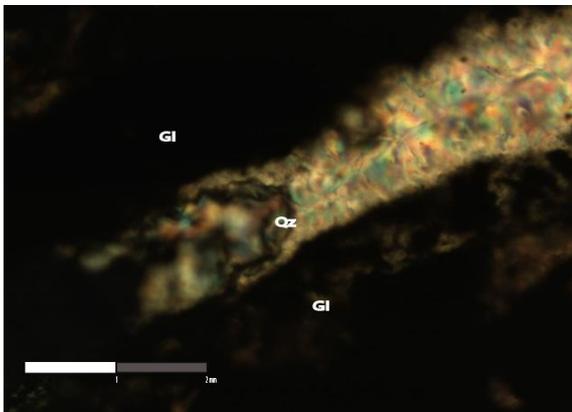


Figura 4.9 Cuarzo plumoso (Qz) de probable evento epítermal cortando galena (Gl). NPL, 20x.



Figura 4.8 Intercrecimiento cristalino entre galena (Gal), esfalerita (Sp) y marcasita (Mar). NPL, 20x

4.2.3 Cuerpo 9-55

En este cuerpo se pudo determinar la presencia de dos asociaciones minerales con un fuerte contraste entre sí. Estas se detallan a continuación:

- Asociación 1.- Se caracteriza por tener arsenopirita (<1%), calcita (25%), calcopirita (5%), cuarzo (40%), esfalerita (10%), tetraedrita (1%<) y pirita/marcasita (18%). En ésta los cristales de esfalerita presentan granulometrías que van de 0.2 a 1.0 mm. La pirita/marcasita presenta granulometrías de 0.5 a 1 mm y algunas veces, está intercrecida con esfalerita; en las zonas donde la pirita/marcasita está intercrecida con esfalerita, se observan cristales de tetraedrita de 10 a 20 μm (figura 4.13). En la mayoría de las zonas que presentan esta asociación uno, la tetraedrita se encuentra

embebida por la esfalerita, y en algunas zonas aisladas, parece estar intercrecida o reemplazando a la arsenopirita (figura 4.12).

- Asociación 2.- Se caracteriza por tener cuarzo, esfalerita, pirita y tetraedrita. En la asociación se observan cristales de esfalerita con granulometrías que van de 0.2 – 0.5 mm, con exsolución de calcopirita e intercrecidos con tetraedrita (figura 4.13). En este caso los intercrecimientos se encuentran embebidos por marcasita como parches en la matriz de cuarzo. Adicionalmente, se observa la presencia de cuarzo de baja cristalinidad, lo cual nos habla de un pulso contrastante de menor temperatura, pero no se muestra evidencia de menas de plata asociadas (4.14).

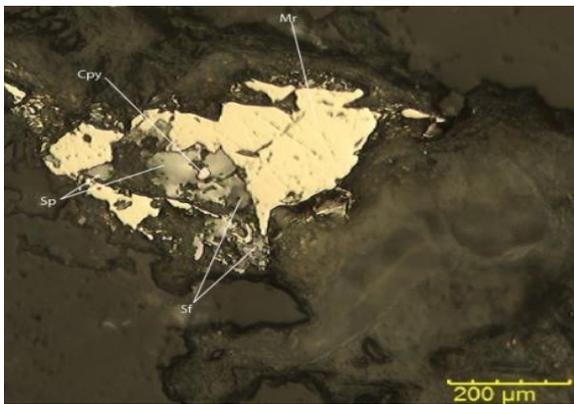


Figura 4.13 Marcasita intercrecida con esfalerita, calcopirita y sulfosal (tetraedrita). Esta asociación es muy característica del pulso mineralizante de las vetillas de cuarzo de baja cristalinidad. PPL, zoom 20x.

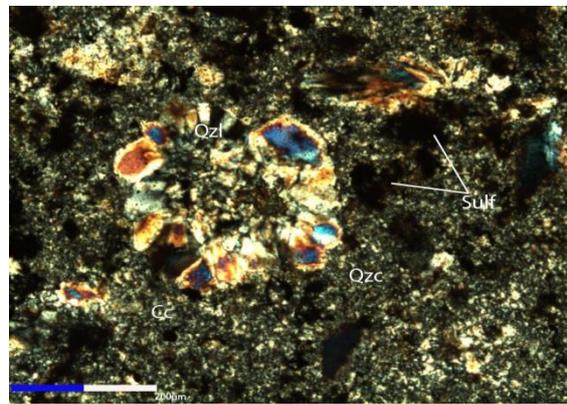


Figura 4.14 Cuarzo de baja cristalinidad (Qzl) en una matriz de cuarzo criptocristalino (Qzc) y calcita recristalizada (Cc). Se observa una serie de sulfuros (Sulf) aglutinados en la matriz como parte de una vetilla. PPL, zoom 4x.

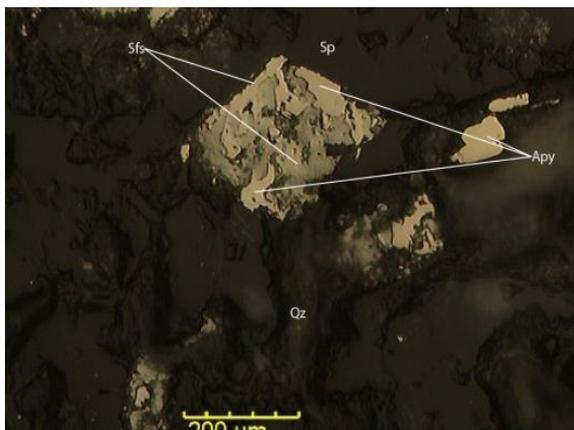


Figura 4.12 Arsenopirita (Apy) reemplazada parcialmente por tetraedrita, se observa intercrecimiento con esfalerita (Sp) y cuarzo (Qz). PPL, zoom 20 x.

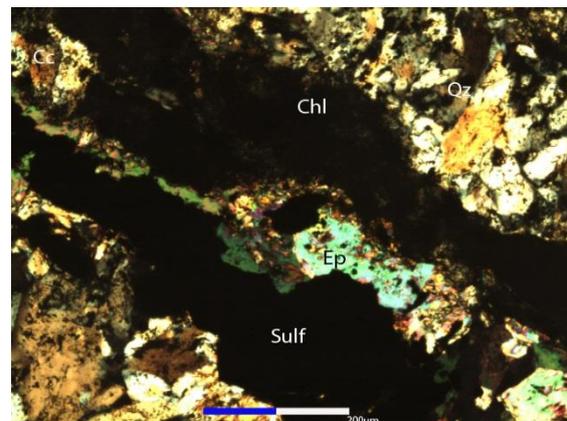


Figura 4.11 Vetilla propilítica compuesta por clorita (Chl), epidota (Ep), calcita (Cc), cuarzo (Qz) y sulfuros (Sulf). NPL, Zoom 4x.

4.3 Alteración

Revisando la disposición de las paragénesis presentes, en las zonas proximales a las zonas mineralizadas de los tres cuerpos analizados se reconocieron cuatro alteraciones principales, estas se describen a continuación:

- Prógrada.- La alteración se caracteriza por la presencia de granate (<1%<), escaso en la alteración, tremolita-actinolita (10%) (Figura 4.5), diópsido (5%) y wollastonita (15%). La alteración se localiza principalmente, en zonas de roca intrusiva y roca caja con sakarnoide o hornfels (Ilustración 4.15) y cerca de la mena en las muestras recolectadas de los niveles más profundos de las estructuras Nortes/Sur y 460, es importante mencionar que no se observó intercrecimiento cristalino con las menas de Ag, Pb y Zn. La fase progradante solo esta presente en las estructuras 460 y Norte-Sur, como remanentes, ya que la mayoría esta completamente alterados (figura 4.15). La alteración prograda tiene una coloración verde olivo a beige oscuro y café, con desarrollo espacial pequeño del orden de 10 cm centímetros a 0.5 m, siendo generalmente <15 cm. La alteración prograda puede o no estar cortada por eventos de lateración retrograda como: propilítica y subpropilítica, pero usualmente, cuando la alteración prógrada esta cortada por la alteración subpropilítica hay un cuerpo mineralizado con mena.



Figura 4.15 Del lado derecho se observa un skarnoide proximal a intrusivo granodiorítico, del lado izquierdo se presenta una lutita con abundante presencia de clorita y fuertemente silicificada.

- Propilítica.- Se caracteriza principalmente por la presencia de epidota, cuarzo, calcita, pirita, y en menor medida clorita (Figura 4.14), la cual se observa como alteración de las plagioclasas en cuerpos intrusivos o en vetillas como parte del relleno de estas. Esta lateración puede presentarse como un crecimiento intercrystalino con esfalerita y,

rara vez, con galena. En la alteración propilítica no se observa ninguna mena de plata y la calcopirita es escasa o nula, generalmente relacionada espacialmente con mena de metales base y principalmente se presenta como cristales euedrales aislados.

- Subpropilítica.- Se caracteriza principalmente por la presencia de clorita, como alteración de piroxenos/anfíboles en los cuerpos intrusivos, en vetillas como relleno y, algunas veces, intercrecida con epidotas o sobrepuesta a estas (Figura 4.14, 4.15). El conjunto de clorita, calcita y cuarzo se forma en vetillas con esfalerita y galena, las cuales llegan a presentar sulfosales como inclusiones o intercrecimientos cristalinos. La esfalerita asociada con las cloritas llega a presentar un importante desarrollo de la enfermedad de la calcopirita. En esta no se presentan cristales aislados de calcopirita, todos presentan relación directa con la esfalerita. La subpropilitización está espacialmente relacionada con mineralización de metales base y de plata. Se distingue por denotar una coloración verde claro en la roca que altera, alterando horizontes, irregulares y discontinuos menores a 1.5 m.
- Silicificación.- Esta alteración presenta como componente principal dos tipos de cuarzo, uno del tipo plumoso y otro de baja cristalinidad (Figura 4.8 y 4.12). El cuarzo plumoso se presenta como un agregado cristalino en microvetillas intercrecido con calcita en mosaico, algunas veces se llega a observar en la matriz. Ocasionalmente el cuarzo puede presentar una textura zonada al comienzo de su cristalización y plumoso hacia sus bordes. En contraste, el cuarzo de baja cristalinidad se presenta como un agregado granular en mosaico en la matriz. En esta fase no se aprecia mineralización económica, ya que esta se presenta como una superposición o cortando a las demás alteraciones.

4.4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Se implementó este método analítico y descriptivo con la finalidad de confirmar la o las especies minerales de plata, mediante análisis semicuantitativos, y microrelaciones texturales que fueron identificadas con la minerografía realizada. En este método al utilizar un analizador de energía EDS acoplado por obtener su composición SEM logra una caracterización más precisa de las fases minerales en cuestión (química composicional semicuantitativa). Es importante mencionar, que el uso de esta técnica fue utilizada como

auxiliar para identificar algunas fases minerales ,principalmente de plata, difíciles de identificar con minerografía por la disposición que presentan algunos cristales.

Para realizar estos análisis, se utilizó una muestra de cada estructura mineralizada que mostrara alguna diferencia textural con respecto a las otras (Figura 4.13). Es decir, que aunque la asociación mineral sea la misma, esta presenta al menos una variación como granulometría, abundancia, mineral huésped, etc. Para este caso se analizaron las muestras del 11-894, 5-460, 13-460 y 9-55 (Anexos SEM).

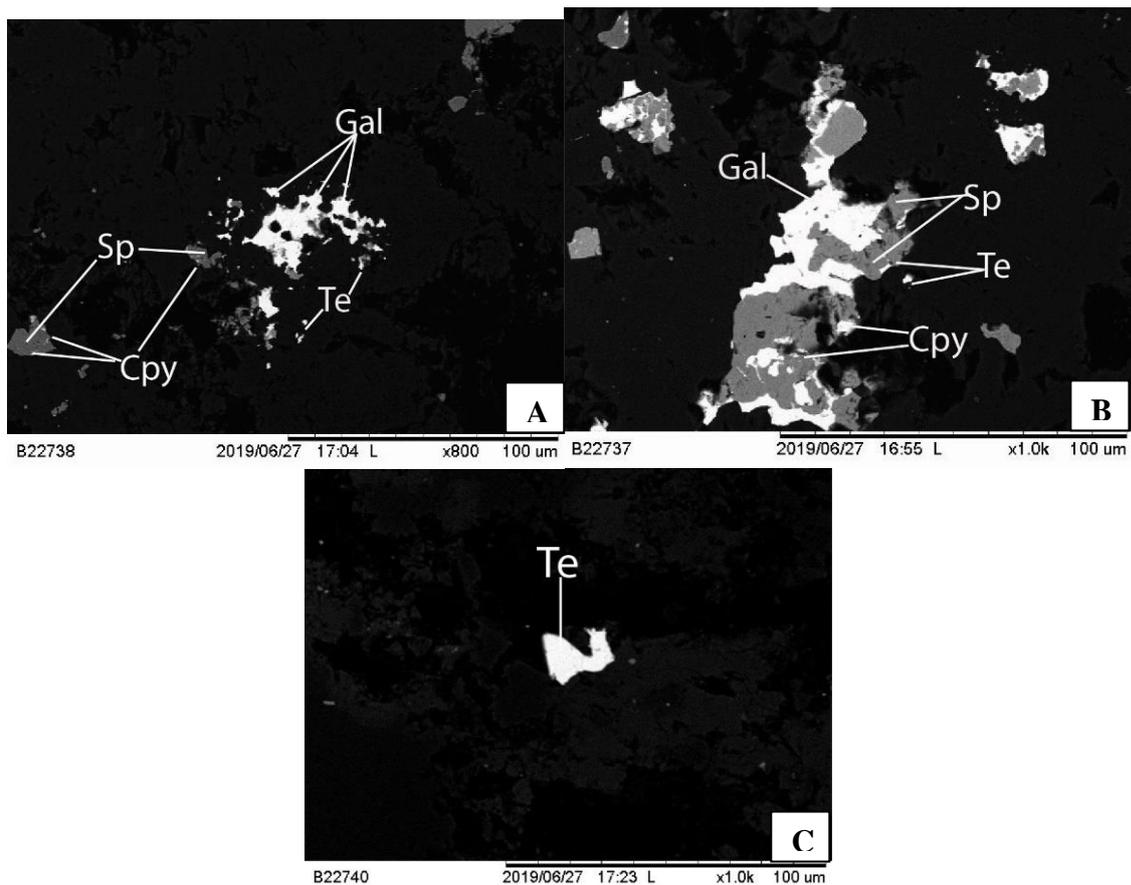


Figura 4.16 Aglomeración de sulfuros como galena (Gal), esfalerita (Sp), y calcopirita (Cpy). En estos tipos de asociaciones minerales se observa cristales de sulfosales (Te) de la serie freibergita – tetraedrita. En la imagen A se observa una aglomeración de sulfuros asociada a la alteración propilítica con escasa presencia de sulfosales de plata. En la imagen B se presenta una aglomeración de sulfuros asociada a la alteración subpropilítica, con moderada presencia de sulfosales de plata. En la imagen C se observta una sulfosal de plata con el habito más común en todas las asociaciones.

Analizando diferentes puntos se confirmó que las fases de plata presentes en la asociación galena, esfalerita y calcopirita, que corresponde a la alteración subpropilítica y con menor abundancia en la fase propilítica, se trata de la serie isomorfa que varía de freibergita a tetraedrita. Siendo la estructura 460 la que presenta mayor afinidad hacia la freibergita (Figura 4.16 A) y la estructura Norte-Sur hacia la tetraedrita (Figura 4.17 B). Respecto a la

estructura 9-55, no se han fases minerales con plata, por lo cual no se pudo caracterizar la afinidad de esta estructura por alguna fase de plata específica. Respecto al contenido de “As”, como componente de las sulfosales y arsenopirita, se observa que hacia las muestras más profundas es más abundante, llegando a presentarse sin ninguna especie de plata asociada a este.

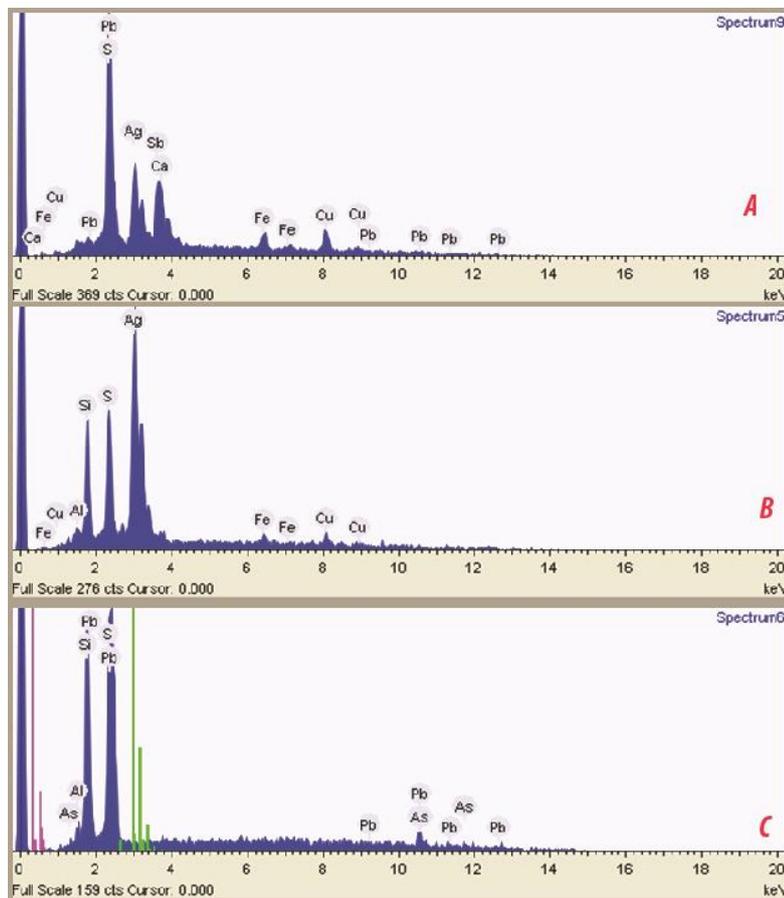


Figura 4.17. Gráficas de contenidos correspondientes a las imágenes de las aglomeraciones de la figura 4.16. La gráfica “A” representa la composición química de la especie de plata típicamente encontrada en la estructura Norte/Sur. En la gráfica “B” se observa la composición química de la especie de plata encontrada en la estructura 460. La gráfica “C” corresponde con galenas de las zonas más profundas de la estructura 460

En general, todas las asociaciones con plata están en con microvetilleos o aglomeraciones de clorita, así como, con esfalerita y calcopirita. El tamaño de las menas de plata se encuentran en el orden de 10 a 90 micras. En zonas con epidotas, wollastonita y diópsidos se presenta una asociación del tipo galena/marcasita-pirrotina/esfalerita, sin aparente presencia de fases con plata. También se observó que las fases de plata están intercrecidas y relacionadas con las esfalerita pobre en hierro.

4.5 Microtermometría de Inclusiones Fluidas

El estudio microtermométrico se basó en tres criterios para el análisis de las inclusiones fluidas: 1) tamaño de la inclusión, no se consideraron muestras menores a 6 µm; 2) se buscó únicamente medir inclusiones bifásicas del tipo primarias o pseudosecundarias, el resto se ignoraron, tanto líquidas y/o ocasionales con gas, y secundarias, así como, inclusiones con evidencias de procesos postatrapamiento también se descartaron (Rodríguez Díaz, 2016) ; 3) relación con las menas metálicas y minerales índice. También se tuvieron en cuenta las inclusiones presentes en el cuarzo de baja cristalinidad con la finalidad de caracterizar el evento con afinidad epitermal.

Con base a la petrografía de inclusiones fluidas se observaron inclusiones monofásicas de líquido (L), ocasionalmente de gas (G) y bisáfiscas de líquido y vapor, con dominio de líquido (L+V,L) con grados de relleno (F) de 65 a 90 %, siendo las más contrastantes las en las estructuras 460 y Norte-Sur con los extremos de grado de relleno reportados, pero en general se observan un patrón de relleno promedio del 75-80. Las formas de las inclusiones son de subredondeadas a irregulares, de alargadas a tabulares y, en menor medida de cristal negativo. Ocasionalmente se detectaron eventos postatrapamiento de inclusiones fluidas en cristales de calcita (anexo claves IF).

Las inclusiones fluidas en las especies minerales que se tomaron para las mediciones se agruparon en asociaciones según la textura observada y la asociación mineral. Estas asociaciones son 1) Cc1, calcita sucia, 2) Cc2, Cc2+Ep, Cc2+Cl, calcita cristalina/clorita/epidota 3) Cc/Qz, cuarzo de baja cristalinidad, 4) Cc/Woll, wollastonita/calcita, 5) Cc/Dio, diopsida/calcita/cuarzo y de forma puntual, 6) Cc/Tr, tremolita/calcita/cuarzo (Tabla 5.5.1). Los cálculos para la estimación de salinidades fueron realizadas mediante la ecuación propuesta por Bodnar (1993), la cual parte del valor de la temperatura de fusión del hielo, esta es:

$$\%NaCl = 1.78 (Tfh) - 0.0442(Tf)^2 - 0.000557 (Tfh)^3$$

Donde:

%NaCl= porcentaje de peso equivalente de halita

Tfh= temperatura de homogenización

Tf= temperatura de fusión

Tabla 4-1 Tabla resumen del análisis microtermométrico donde se presentan los resultados de las mediciones con base en la muestras y las familias de inclusiones localizadas por fase mineral.

Muestra	Mineral	n	Th (°C)			Tfh			Salinidad %wt. NaCl		
			Min	Avg	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg	Max
11-894-IF-1	Cc2	8	188.0	196.5	210	-3.6	-3.8	-4.1	5.7	6.1	6.6
11-894-IF-3	Cc1	9	130.0	137.2	150	-5.7	-6.2	-7.0	6.5	9.0	10.5
8-857-IF-3	Cc2	5	120.0	133.0	155	-2.0	-2.3	-2.7	3.1	3.9	4.5
8-857-IF-3	Cc1	3	207.0	210.6	215	-6.5	-6.7	-7.0	9.9	10.1	10.5
13-460-IF1	Cc+Woll	8	250.0	277.6	310	-3.9	-5.9	-8.0	6.3	9.0	11.7
13-460-IF1	Cc1	12	215.0	186.6	170	-5.0	-7.3	-9.5	7.8	10.8	13.1
8-857-IF-1	Cc+Dio	4	310.0	314.5	325	-6.5	-7.1	-8.0	9.9	9.2	11.7
8-857-IF-1	Cc1	5	194.0	201.0	210	-6.3	-6.6	-7.0	9.86	10.0	10.24
8-857-IF-1	Cc2	4	139.0	140.5	142	-2.0	-2.2	-2.5	3.9	3.7	4.2
8-857-IF-2	Cc/Tr	2	335.0	335.0	350	-3.0	-3.2	-3.4	6.0	5.3	5.6
8-857-IF-2	Cc/Qz	13	120.0	127.8	140	-1.4	-2.0	-3.0	2.1	3.4	5.0
5-460-IF-2	Cc1	2	315.0	320.0	325	-7.5	-7.8	8.1	11.1	11.5	11.8
5-460-IF-2	Cc2	11	158.0	162.9	170	-3.8	-6.1	-7.4	5.7	9.0	11.0
8-917-IF-1	Cc2	6	108.5	113.6	121	-1.5	-2.1	-2.5	2.6	3.4	4.2
8-917-IF-1	Cc1	4	145.0	166.8	175	-2.8	-3.7	-4.5	4.7	5.9	6.7
11-894-IF-2	Cc+Dio	3	335	339.3	345	-1.8	-1.9	-2.0	3.06	3.2	3.4
11-894-IF-2	Cc+Dio	3	270.0	274.3	278	-4.5	-4.8	-5.0	7.17	7.5	7.9
11-894-IF-2	Cc1	5	145	159.2	175	-2	-2.1	-2.3	3.71	3.7	4.3

El análisis de inclusiones fluidas reveló, de un total de 12 datos microtermométricos, con un rango de temperaturas de homogenización de entre 108 y 350 °C, donde se puede observar una serie de rangos de temperaturas muy características, los rangos se cierran en intervalos de 100 - 150, 150 - 200, 200 - 250, 250 - 300 y 300-350 °C. Estos 5 intervalos se reportan de forma constante (Gráficas 5.3, 5.4, 5.5), y continua, sin dejar rangos en los valores de temperatura de homogenización vacíos, con una distribución asimétrica segada hacia la derecha. La distribución descrita tiene una moda constreñida, siendo el intervalo modal característico de 150-200 °C, con valores máximos de 350 °C y mínimos de 120 °C. Los valores de Th [°C] asociados a las diferentes fases minerales se recopilan en las gráficas 5.3, 5.4 y 5.5, donde es importante resaltar que la mayoría de los valores obtenidos fueron medidos en calcitas, algunas asociadas con minerales índice como clorita y epidota (Tabla 4.1).

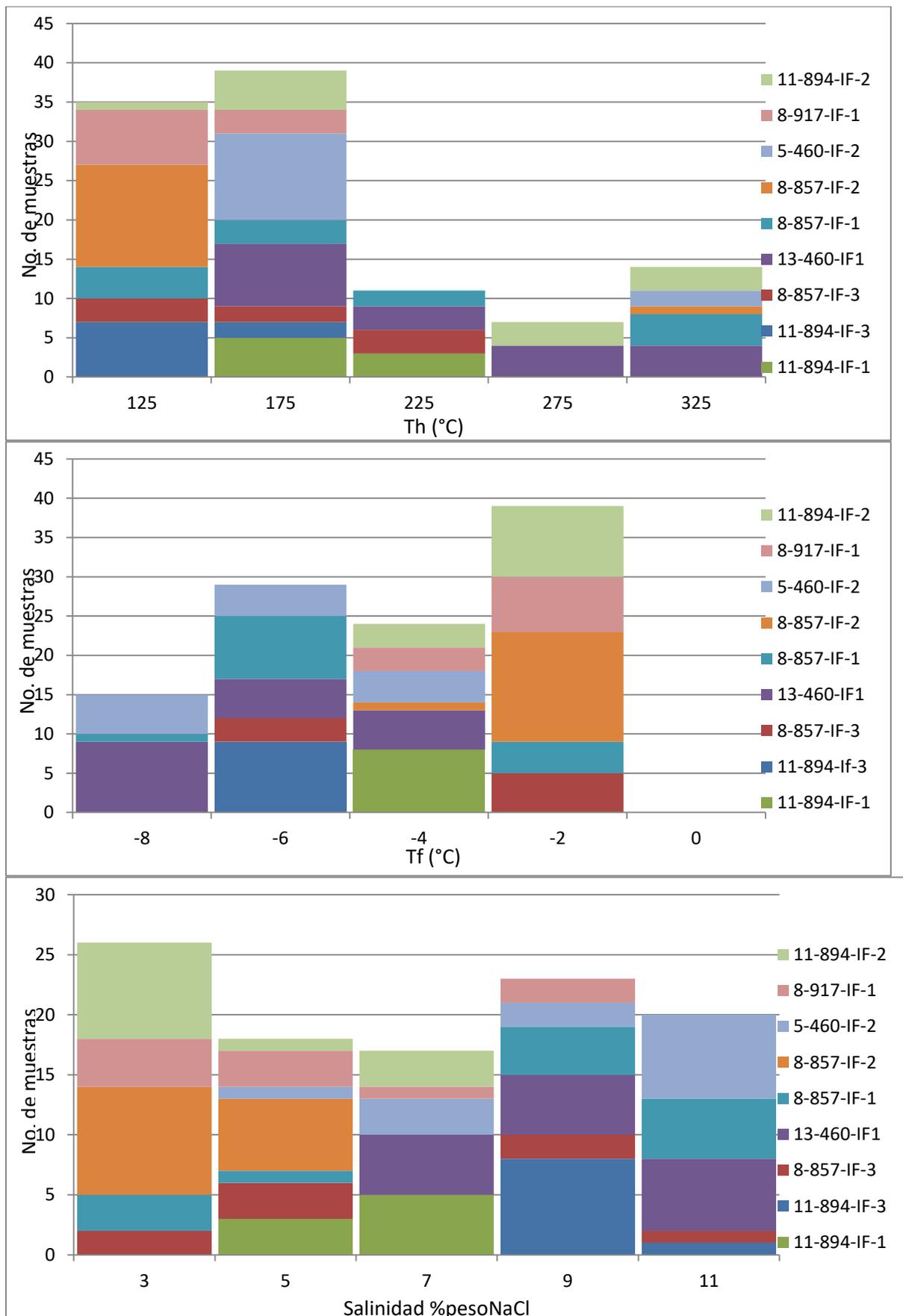


Figura 4.18 Histogramas acumulativos de temperaturas de homogenización, temperaturas de fusión y salinidad.

Las salinidades medidas, en general, muestran un comportamiento más heterogéneo (Tabla 4-1), variando desde 3.71 –a 11.8 (porcentaje en peso de NaCl equivalente). Las mayores salinidades están asociadas a calcitas intercrecidas con wollastonita/diopsida, observadas en las zonas profundas de las estructuras Norte/Sur y 460, y las menores salinidades, se asocian a zonas con cuarzo de baja cristalinidad, presentes en la estructura 9-55 .

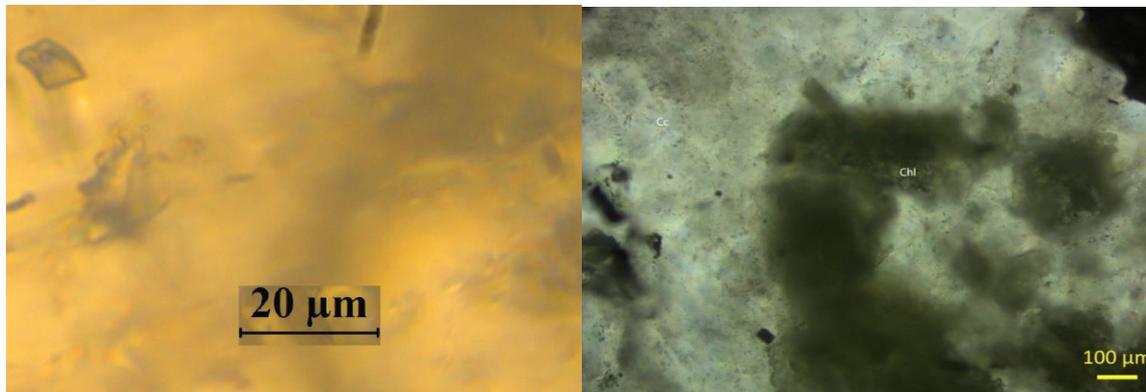


Figura 4.19 Inclusión fluida en calcita, esta se encuentra intercrecida con cloritas. Del lado izquierdo se presenta un zoom por 50x a inclusión primaria. En la imagen del lado derecho se observa el intercrecimiento cristalino (Clorita/Calcita), zoom 10x, PPL.

Por tanto , con base en las zonas muestreadas, tipo de mineralización y criterios paragenéticos, se obtuvo la nube de datos de las mediciones, de temperatura de homogeneización (Th) vs porcentaje en peso equivalente de halita (porcentaje en peso de NaCl equivalente), por cada cuerpo mineralizado. Se presentan una variedad de procesos evidenciados por tendencias de datos, con criterios paragenéticos, como ebullición, mezcla enfriamiento y dilución (Figura 4.20). Esta separación se realizó con el objetivo de comparar similitudes y diferencias entre los mecanismos de precipitación de menas , de metales base y plata, en las diferentes estructuras mineralizadas de Quebradiillas.

En el caso de la estructura 460 se puede distinguir un pulso representativo de la fase progradada con temperatura de homogenización entre 300-350 °C, un posible proceso de ebullición hasta 250 °C (anexo clave 13-460-IF1) y un incremento de la salinidad de 6 a 12 % en peso de NaCl equivalente, pudiendo representar el mecanismo de precipitación de mena principal y un pulso a menores temperaturas con mezcla de un fluido muy salino (>12 % en peso de NaCl equivalente) y uno salino (<7 % en peso de NaCl equivalente). La estructura 9-55 evidencia una tendencia de datos característica de un proceso de dilución desde una Temperatura de homogenización de 170-180 °C y salinidad alrededor de 6 % en peso de NaCl equivalente, a Temperatura de homogenización alrededor de 110 °C y salinidades alrededor de 3 % en peso de NaCl.

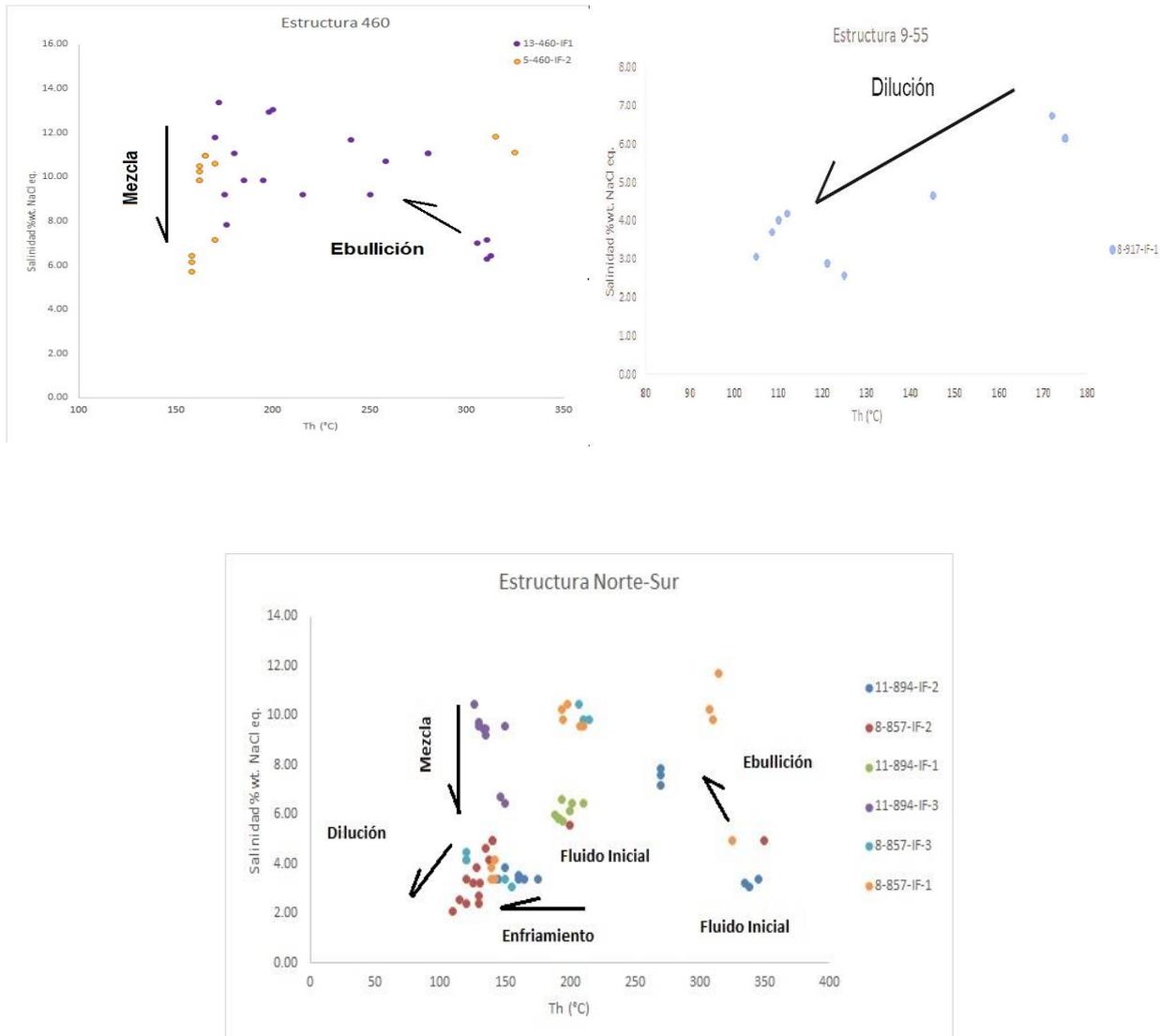


Figura 4.20 Gráficas de porcentaje en peso de NaCl vs Temperatura de homogenización, con los datos microtermométricos para cada estructura que estudiada.

La estructura Norte-Sur exhibe una serie de procesos más complejos que incluyen: i) un fluido inicial progrado evidenciado por Th alrededor de los 350 °C y salinidad entre 3 y 5 % en peso de NaCl equivalente; ii) una ebullición a rangos similares que la estructura 460, con Th alrededor de 250 °C y salinidades superiores a 6 % en peso de NaCl equivalente. iii) Un proceso de mezcla entre fluido muy salino (10% en peso de NaCl eq.) y salino (6% en peso de NaCl eq.) y en etapas finales de la mineralización, iv) procesos de dilución y enfriamiento hasta Th alrededor de los 110 °C y salinidades del 2% en peso de NaCl equivalente.

5 DISCUSIÓN

La identificación y clasificación de los depósitos del tipo skarn se basa, principalmente, en la mineralogía presente, es decir, en fases calcosilicatadas. Además, muchos minerales asociados a este tipo de yacimientos son formadores de rocas muy comunes, con variaciones en abundancias las cuales reflejan el ambiente de formación. La secuencia de desarrollo de los yacimientos tipo skarn está íntimamente relacionada con el sistema de intrusivos asociados y con la profundidad de formación, ya que a profundidades corticales someras la interacción con aguas meteóricas generarán una alteración retrograda intensa y tendrá un mayor desarrollo (Figura 5.1). En estas zonas someras las rocas carbonatadas generarán un régimen de deformación frágil, provocando que los fluidos mineralizantes migren y se depositen a lo largo del sistema estructural particular (D. Meinert, Lawrence, 2008). En el caso de La Parrilla la morfología de las estructuras analizadas, es compatible con vetas lenticulares (Figura 5.2, A), cuya continuidad está determinada por el sistema estructural y por el contenido de materia orgánica de la roca encajonante. En la carta F13-B23 del SGM (San Jose de La Parrilla, existe un sistema de vetas lenticulares con temperaturas en su fase mesotermal de 400 a 600 °C, lo cual según los análisis realizados en el presente trabajo concuerdan parcialmente, ya que adicionalmente, se tiene registro de un evento de baja temperatura en el sistema y la fase retrograda con mayor precipitación de menas es de 200 – 250 °C.

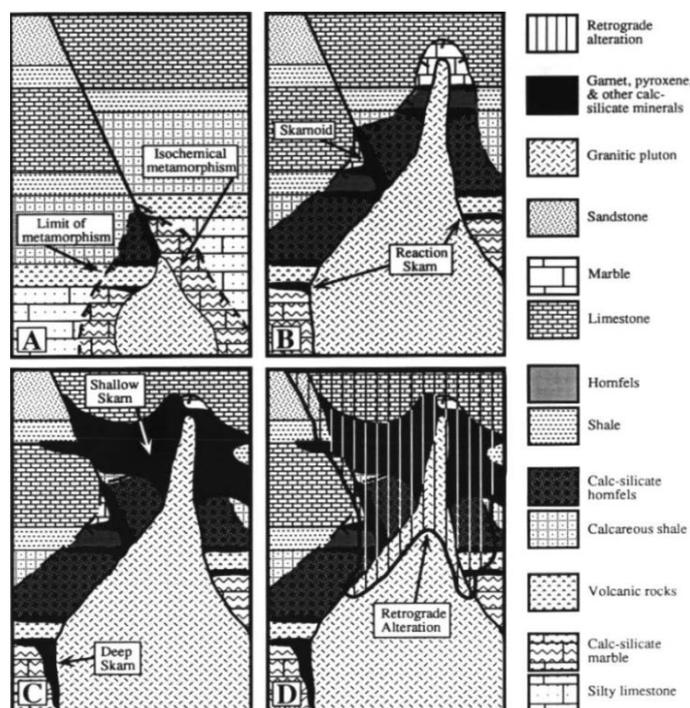


Figura 5.1 Disposición de cuerpos tipo skarn, alteraciones asociadas y morfología según la profundidad. D. Meinert 2008.

En los diferentes rebajes muestreados en las estructuras de la mina Quebradillas, se presentaron estructuras encajonadas en calizas/lutitas moderadamente recristalizadas y zonas de hornfels, sin ningún intrusivo proximal relacionado con estas. Los intrusivos, clasificados como granodioritas con textura fanerítica, en la mayoría de los casos se están alejados de las zonas mineralizadas y las trazas de mineralización (microvetilleos y diseminados) tienden a finalizar en el contacto con estos. De forma que los intrusivos funcionan como una especie de barrera impermeable. Estos intrusivos llegan a presentar una alteración de tipo propilítica a subpropilítica, con microvetilleos débiles de sulfuros como marcasita, esfalerita (rica en Fe), galena, calcopirita y sulfosales (tetrahedrita - freibergita). Además, todas las estructuras mineralizadas se presentan como reemplazamientos parciales de las calizas/lutitas en las zonas proximales a los planos principales de fallamiento y fracturamiento (Figura 5.2, B).

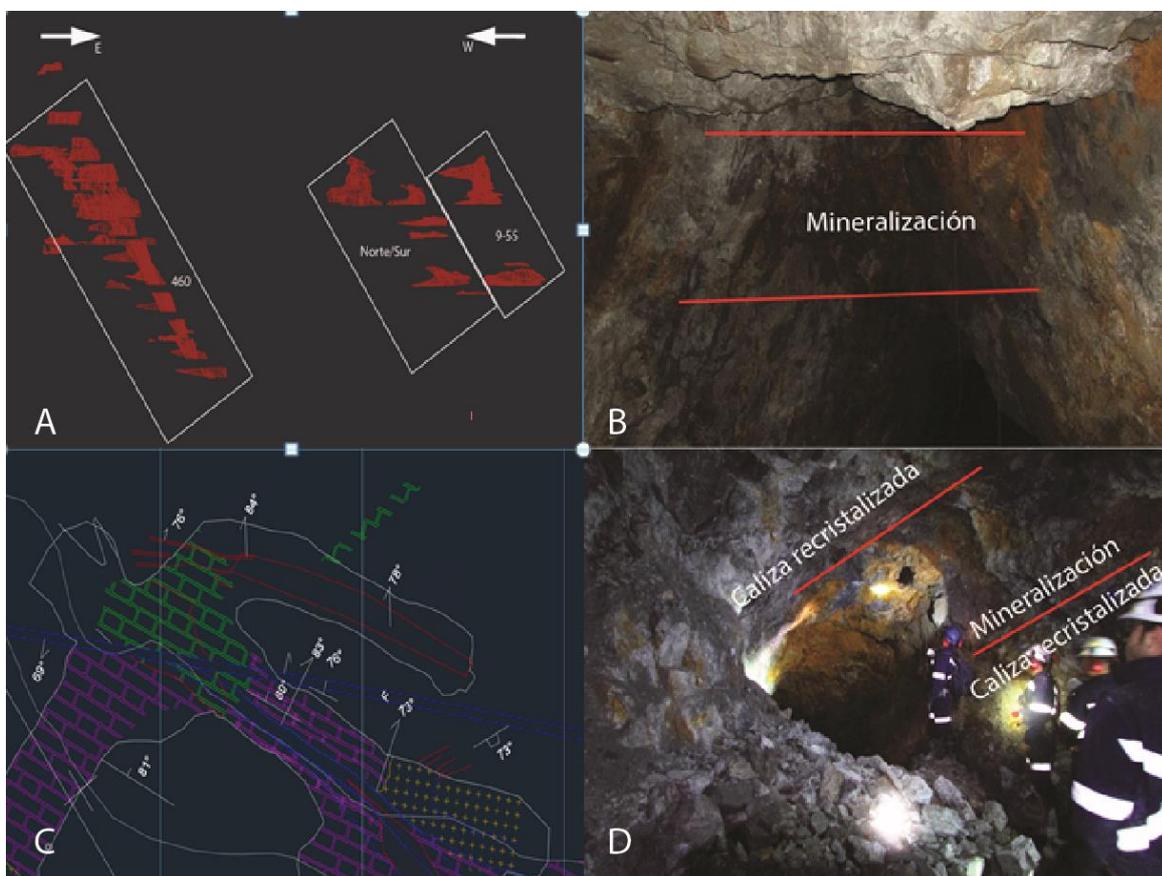


Figura 5.2 (A) Esquema general del comportamiento morfológico de las estructuras estudiadas. (B) Fin de la continuidad de la mineralización de un rebaje, en el contacto con el intrusivo. (C) Mapeo de rebaje en el cual se presenta la mineralización. (D) Mineralización encajonada en calizas recristalizadas, en esta se observa el acuñaamiento de la estructura.

Por tanto, las temperaturas de homogenización/fusión, disposición de mineralogía y alteraciones indican que la mina Quebradillas se interpreta como un skarn distal en el cual

las fallas y fracturamiento de las rocas funcionaron como el conducto de la mineralización. Posteriormente se generó un enjambre secundario de diques granodiríticos estériles y, al final se produce pulso(s) mineralizantes relacionado con un intrusivo no observado durante el muestreo.

5.1 Asociación mineral y texturas

Durante el análisis de las muestras se identificaron diferentes asociaciones minerales compatibles con cuatro alteraciones asociadas a eventos de tipo progrado, propilítico, subpropilítico y una silicificación tardía. Es importante mencionar que esta última alteración tiene una afinidad de tipo epitermal ($Th \leq 160$), en donde todas las estructuras con esta alteración están cortando o como sobreponiéndose a las demás.

La alteración prograda se compone principalmente por granate, diópsido, tremolita-actinolita, cuarzo eudral y wollastonita/calcita. En esta no se aprecia ninguna relación con menas metálicas, sin embargo, de manera puntual se presentan aglomeraciones de pirrotina. Esta asociación está presente en las muestras que fueron recolectadas en los niveles más profundos de las estructuras, siendo más notable en los niveles 12-460 y 13-460 de la estructura 460. En la estructura Norte/Sur esta asociación solo está presente en el nivel 11-894, siendo parcialmente alterada y enmascarada por una alteración propilítica a subpropilítica. En la estructura 9-55 no se han identificado remanentes o relictos de esta asociación, presentando una alteración de tipo propilítica a subpropilítica, con una etapa final de cuarzo de baja cristalinidad. La presencia de minerales silicatados anhidros como granates y piroxenos es la clave para clasificar al yacimiento como de tipo skarn (D. Meinert, 2008). La fase prograda tiene un desarrollo espacial reducido, menor a 0.5 m de espesor, lo cual sugiere un proceso metasomático poco favorecido por la litología y disposición de la misma, con una tendencia favorable para el emplazamiento del cuerpo ígneo (Pirjano, 2010). La alteración prograda es poco evidente en los cuerpos mineralizados, por tanto, debido a sus dimensiones, se puede considerar a esta asociación una guía de exploración muy limitada. Sin embargo, cuando la alteración prograda está asociada con la alteración propilítica y subpropilítica, tiende a reflejar mayores posibilidades de exploración de cuerpos de metales base y ricos en plata.

La alteración retrograda se compone de dos asociaciones, una compatible con una alteración de tipo propilítica y otra con una tendencia subpropilítica. La alteración propilítica está compuesta por epidota, clorita, calcita en mosaico, cuarzo eudral, pirrotina/marcasita, galena, esfalerita y calcopirita. Esta alteración se presenta de forma generalizada en

prácticamente todas las muestras, como aglomeraciones y/o microvetilleos de sulfuros, con una fuerte afinidad hacia los metales base Pb, Zn y Cu. La alteración retrograda de tipo propilítica se ha observado en otros yacimientos de skarn mexicanos con relación estrecha a cuerpos minerales de metales base (Canet, et al. 2011), aunque particularmente en otros depósitos se presenta con un mayor desarrollo espacial. En esta alteración se define una evolución donde, en algunas aglomeraciones, la esfalerita presenta un incremento en contenido de hierro (0% - 30%) y con esto, una fuerte desarrollo de la enfermedad de la calcopirita. Este patrón también se ve reflejado en, la disminución en la granulometría (0.5 mm a 200 micras) y en la abundancia de epidota, que esta inversamente relacionado con la aparición e incremento de la abundancia de cloritas. En las zonas donde se observa esta transición, epidota/clorita, es donde precipitan las sulfosales de plata, compatible con la serie isomorfa freibergita-tetraedrita. La etapa final de esta alteración coincide con la aparición de sulfosales de Ag, comparable a lo observado en otros yacimientos de skarn (Canet et al, 2011; Meinert 1987). Las sulfosales presentan zona espacial entre estructuras muy marcada, tendiendo hacia la freibergita en zonas profundas de la estructura 460 y desarrollando una mayor afinidad hacia la tetraedrita en zonas someras de todas las estructuras y hacia la estructura 9-55. La alteración retrograda subpropilítica se compone principalmente de arsenopirita, clorita, calcita sucia, cuarzo eudral, marcasita/pirita, esfalerita, galena, calcopirita y sulfosales(tetraedrita). Esta alteración se presenta como aglomeraciones y/o microvetilleos de clorita con sulfuros, metales base y plata, arsenopiritas las cuales se presentan parcialmente reemplazadas por un sulfosales de plata. Esto sugiere un contexto de evolución y requilibrio del fluido mineralizante, donde la arsenopirita se formó mayormente en la etapa propilítica y fueron posteriormente reemplazadas por sulfosales. La mayor abundancia de sulfosales de plata esta asociada a la alteración subpropilítica, caracterizada por clorita. La clorita se ha utilizado como guía de exploración de plata en otros yacimientos de tipo skarn (Canet, Camprubí, 2009) y de forma que en la mina de Quebradillas es una guía de mineralización de metales asociados a tetraedrita con plata. La clorita ha sido usada como geotermómetro en varios depósitos minerales, obteniendo rangos de temperatura de [200-300 °C] (Rodríguez, Augusto, 2016), siendo considerado para la Parrilla como el rango de temperatura más fértil para el de posito de menas de plata del tipo tetraedrita, comparable con lo obtenido con mediciones microtermométricas (200-270 °C), a tratarse a mayor detalle más adelante.

Finalmente se observa, principalmente en la estructura 9-55, una asociación de baja temperatura, compuesta por cuarzo plumoso y/o calcedónico, calcita mosaico/suciy pirita, sin evidencia de fluorita, compatible con un ambiente epitermal (Wilkinson, 2006) con temperaturas de homogenización entre 150- y 250 °C. Esta alteración se observa principalmente como una silicificación en la matriz de la roca encajonante, con zonas de cuarzo calcedónico y como microvetilleos que cortan todas las estructuras de las muestras. A diferencia de las demás alteraciones, la silicificación se presentan como un evento final que se sobrepone a los anteriores, donde no se observan menas de plata ni metales base, únicamente se presentan pirita diseminada en el microvetilleo. Este evento puede considerarse una etapa final de la mineralización retrograda propia del skarn o un evento tardío que corta a la mineralización metasomática, relacionada posiblemente con el sistema de vetas de Cerro Santiago-Los Perros, ubicada a menos de 1 km al E de Quebradillas.

Con base en lo anterior se determinó una secuencia paragenética ligada y guiada principalmente por la distribución de las menas de plata observadas y su distribución (Tabla 5.1).

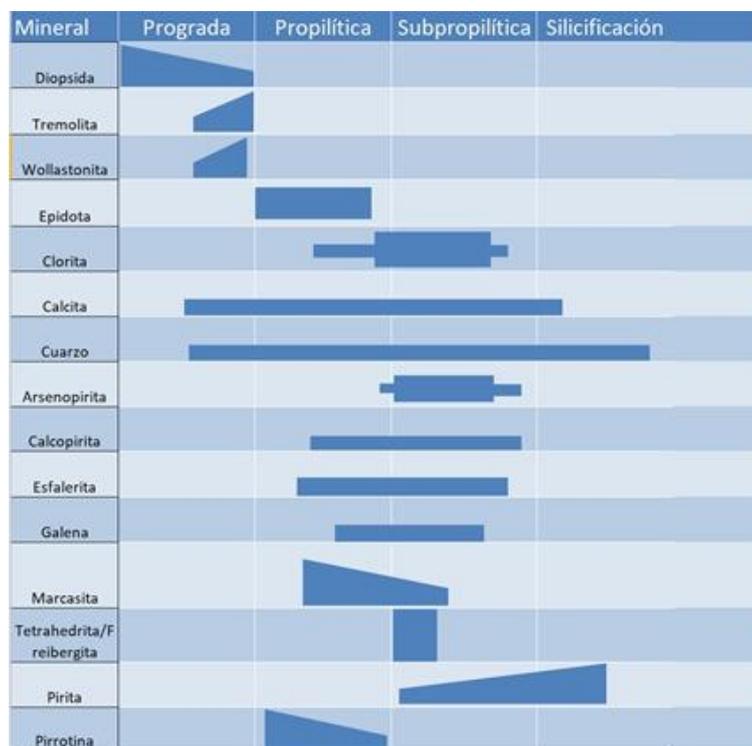


Tabla 5.1 Paragénesis mineral propuesta para la mineralización de Quebradillas.

Así mismo, los sulfuros de hierro pirrotina/marcasita/pirita, muestran una serie de reemplazamientos, los cuales se observan principalmente en la marcasita reemplazando a la

pirrotina (Casquet & Tornos, 1984). Ambas fases minerales evolucionan con el cambio de los fluidos mineralizantes y la precipitación de menas de plata, hacia las zonas más profundas con presencia de una alteración progradada se presenta la pirrotina, y en menos medida en zonas propilitizadas. Marcasita se ve fuertemente ligada con la galena y esfalerita de las alteraciones propilítica y subpropilítica. Finalmente, la pirita se ve ligada con la fase final de la alteración subpropilítica y en la silicificación, esta se presenta como un intercrecimiento y esporádicamente reemplaza a la marcasita.

Las únicas menas de plata encontradas en las estructuras analizadas, fueron la asociación tetraedrita-freibergita, con variaciones de arsénico (As), cobre (Cu) y antimonio (Sb). El enriquecimiento en As, Cu y Sb han sido correlacionado con enriquecimiento en Ag y la variación de menas de metales base (Ordoñez, 2017). En la mina Quebradillas estas variaciones se vuelven contrastantes hacia las zonas más profundas de las estructuras, principalmente en la estructura 460, donde la relación arsénico/cobre comienza a enriquecerse y los contenidos de plata empobrecen. Esto puede deberse a probables sustituciones iónicas dentro de la estructura de la asociación freibergita-tetraedrita que, a su vez, puede estar vinculada a variaciones de temperatura. Es importante mencionar que todas las especies de plata fueron determinadas con el SEM, de forma que las variaciones porcentuales mencionadas son semicuantitativas. Por tanto, se recomienda estudiar las sulfosales de plata utilizando metodologías cuantitativas como microsonda electrónica a fin de contrastar como guías de exploración de sulfosales de plata.

5.2 Microtermometría de Inclusiones Fluidas

Con base los análisis paragenéticos, petrografía de inclusiones fluidas y separación de minerales índice de cada etapa, se interpretó la evolución de los fluidos y el impacto sobre la mineralización. Para ello se ha tenido en cuenta que los procesos de ebullición (boiling) evidencian mecanismo de precipitación típicos, pero no exclusivos, de sistemas de epitermales (Camprubí, 2009), como son las en estructuras de tipo skarn (González-Partida, 2004).

En general, en los minerales de la etapa progradada se ha podido reconocer en minerales los valores de temperatura y salinidad de fluidos los primarios del skarn (Figura 5.6), siendo temperaturas de ca. 350 °C y salinidades iguales o superiores a 6 % en peso de NaCl equivalente. Según Wilkinson (2001), estos rangos de temperatura y salinidades pueden ser considerados dentro de la clasificación de skarns, aunque están muy próximos a sus límites

con el campo de otros yacimientos. En la estructura 460, la fase progradada se caracteriza por tener una Th de ca. 320 °C y salinidad de 11% en peso de NaCl equivalente, seguido de enfriamiento y posterior alteración retrogradada con evidencia de ebullición menor, con evento mineralizante en rango de Th 220 y 250 °C y salinidad de 6 a 10% en peso de NaCl equivalente. Esta pérdida de temperatura ligada a un aumento de salinidad es compatible con los diferentes grados de relleno (F) que van de 80 a 65%, lo cual indica el proceso de ebullición que esta ligado a un mecanismo de precipitación de metales con dilución hacia final de la mineralización. Esto es compatible con la tendencia al incremento en arsénico hacia la base de la estructura, reconocido en otros yacimientos hidrotermales de menor temperatura (e.g.) epitermales. Este rango de temperatura coincide con geotermómetros minerales para la alteración propilítica (>220 °C, González Partida, 2000). Hacia el final de la mineralización de la estructura 460, se muestra un proceso de dilución del fluido, coincidente con el final de la alteración propilítica y subpropilítica, donde la mineralización de menas de plata es mayor durante la etapa subpropilítica. Con base en lo anterior, se infiere poca probabilidad de la continuidad mineral de menas de plata (Tetraedrita/Freibergita) dentro de la estructura 460. Hacia esta estructura los sulfuros de hierro pirita/marcasita/pirita presentan una gradación mineral muy marcada, siendo la pirrotina la que se asocia a Th de 320 °C y la marcasita con Th de 220 – 250 °C (Figura 5.3). En el caso de la pirita, se presenta una fuerte asociación con Th de ca. 160 °C y la dilución final.

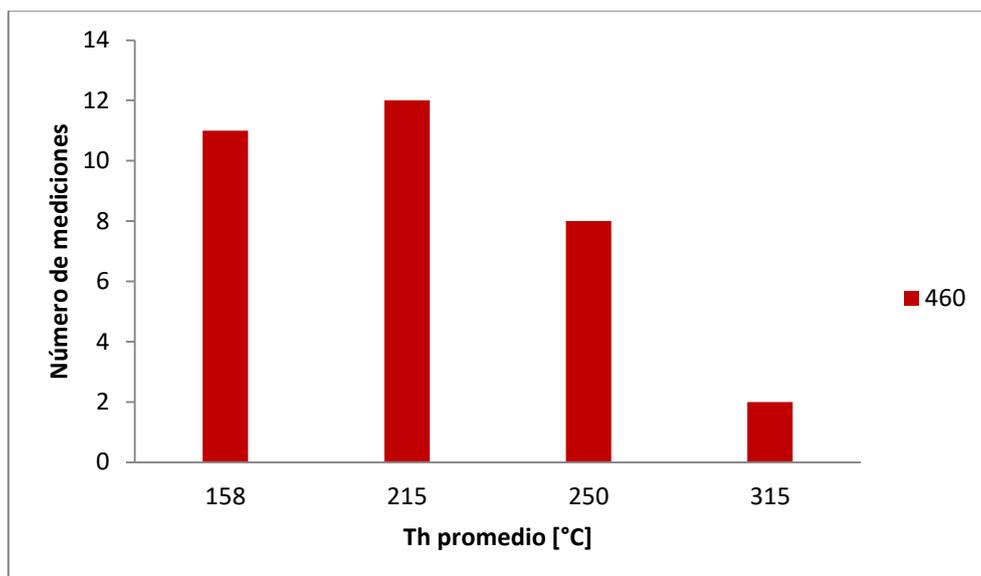


Figura 5.3 Th promedio obtenidas de las diferentes muestras correspondientes a la estructura “460”. Th = 158 °C silificación, TH= 215, 250 °C propilítica/subpropilítica, Th=315 °C progradada

La estructura Norte/ Sur presenta una fase progradada con Th alrededor de 345 °C y salinidad de 6% en peso de NaCl equivalente, seguido de un marcada ebullición con ligera mezcla isotérmica y posterior enfriamiento. Este última etapa se relaciona con una alteración retrograda, propilítica / subpropilítica a una, Th entre 220 y 290 °C (Figura 5.4) y salinidad de 6 a 10% en peso de NaCl equivalente. La precipitación de las menas de plata se asocian con Th de la fase retrograda, formandose en este caso tetraedritas ricas en Ag, las cuales se desarrollan principalmente en galenas. En esta estructura las Th de 345 (°C) se ligan con galenas, sin presencia de sulfosales, y en mayor medida con pirrotina. Finalmente, en la estructura Norte/Sur se evidencia una ligera disolución y una tendencia epitermal, con Th de alrededor de 145 °C (Figura 4.20, 5.4). No se ha observado ninguna relación directa entre la temperatura de homogenización de este evento con menas plata o metales base. Con base en lo anterior, se infiere una que estructura presenta una gran probabilidad de continuidad, principalmente por el marcado boiling observado (Figur 4.20). Las muestras analizadas en esta estructura presentaron como mena de plata sólo la tetraedrita rica en plata, sin evidencia de freibergita.

En todas las estruutras, el desarrollo de arsenopiritas, se asocian con Th de alrededor de 200 - 210 °C (Figura 5.4), que se agrupan a lo largo de los procesos de bolling y dilución (Figura 4.20). Por lo cual se infiere que por debajo de esta temperatura, la cristalización de las menas de plata comienza a disminuir.

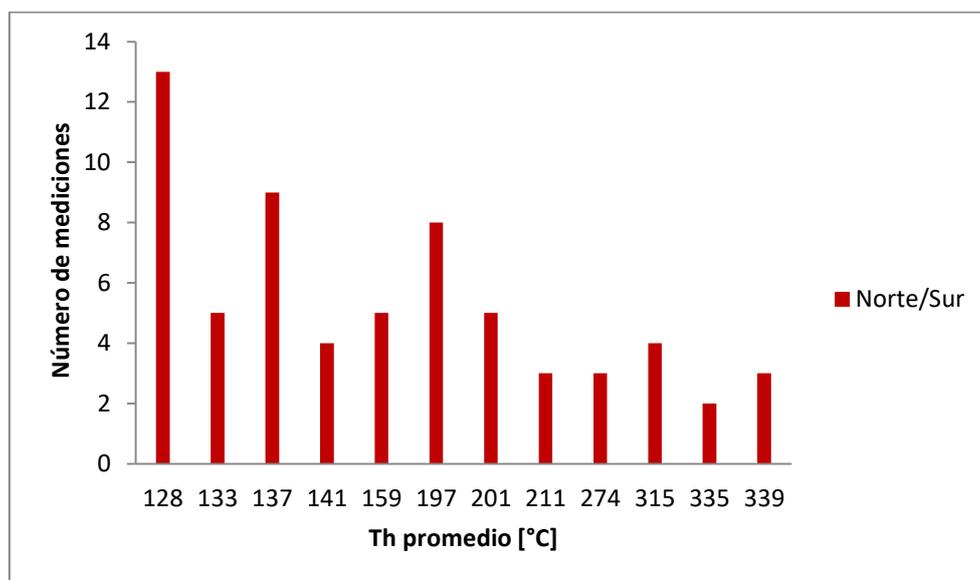


Figura 5.4 Th promedio obtenidas de las diferentes muestras correspondientes a la estructura “Norte/Sur”.

La estructura 9-55 presenta únicamente un evento de baja temperatura (Figura 5.5) con Th de alrededor de 114 – 170 °C y salinidad de 1-3% en peso de NaCl equivalente, el cual sufre una posterior dilución con Th de 100 – 115 °C. Estos dos eventos registrados están acompañados con cuarzo de baja cristalinidad y sulfuros de hierro (pirita), y en ninguna zona de la estructura 9-55 se presentan mineralización de metales base o plata. Por las características de la mineralización observada se infiere un evento epitermal estéril, el cual ocurre como evento final. Este evento puede ser considerado una etapa relacionada con una distribución distal del sistema de vetas conocido como Cerro Santiago-Perros, con típicas vetas de cuarzo bandeadas coloformas con Th alrededor 160-180 °C .

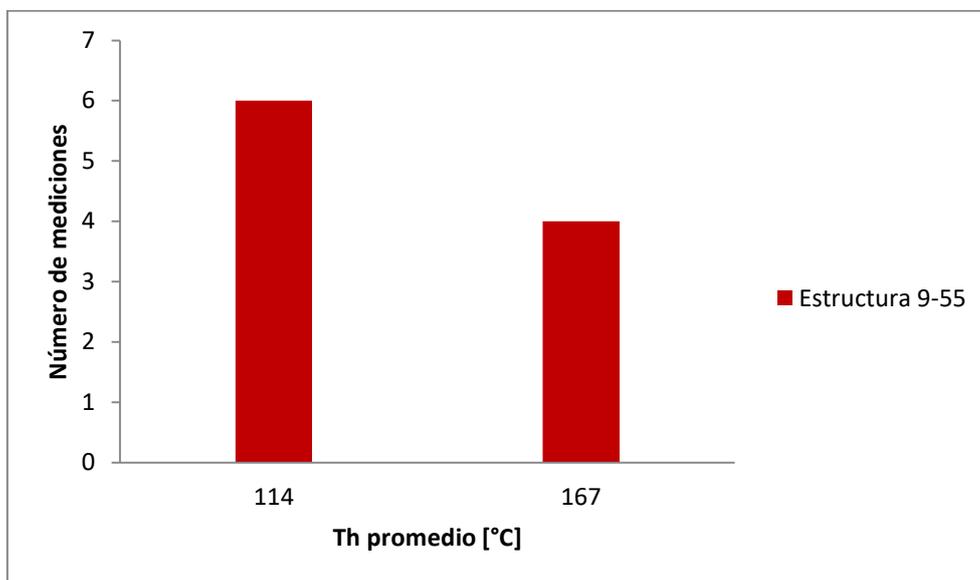


Figura 5.5 Th promedio obtenidas de las diferentes muestras correspondientes a la estructura 9-55.

En el conjunto de estructuras vemos un incremento de las temperaturas de homogenización hacia el poniente en dirección de la base de la estructura 460, en esta misma dirección tenemos un incremento de arsénico (As) y salinidad. Por el contrario, hacia el oriente se presenta una menor temperatura de homogenización y salinidad, principalmente hacia la parte más somera de la estructura 9-55.

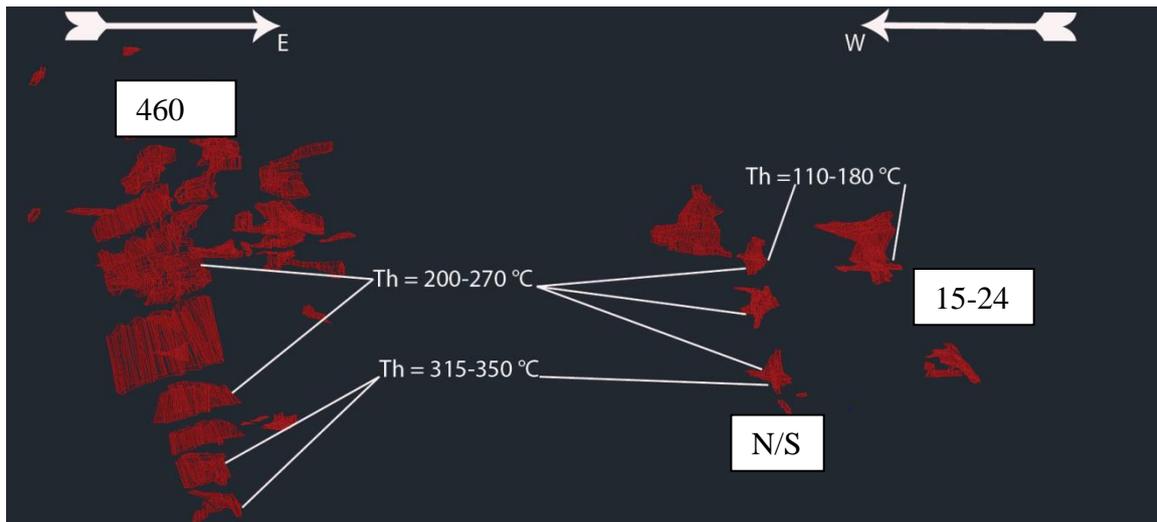


Figura 5.6 Comportamiento generalizado de las temperaturas de homogenización (Th) a lo largo de las estructuras analizadas.

6 CONCLUSIONES

El distrito minera de La Parrilla pertenece al grupo de skarns distales del tipo Zn+Pb+Ag, ya que muestra una asociación prograda formada por granate, diópsida, tremolita-actinolita, wollastonita, calcita y cuarzo, y una asociación retrograda constituida por epidota, clorita, pirita, calcita, illita-montmorillonita, cuarzo, calcita, pirrotina, esfalerita, calcopirita, marcasita, pirita, arsenopirita, galena y tetrahedrita-freibergita. En este contexto se identificaron dos generaciones de esfalerita y calcopirita, de las cuales la fase con menor contenido de hierro se asocia con la precipitación de menas de plata.

La mineralización, metales base y plata, se asocia con un enjambre de diques granodioríticos faneríticos que forma una fase primaria estéril, generando un skarnoide, estos se caracterizan por generar alteraciones muy delgadas de no más de 3 metros. Posteriormente un segundo enjambre de diques de textura fanerítica generó la mineralización, de metales base y plata, estos probablemente pertenecen a un evento secundario asociado a una segunda fase de mineralización. La mineralización siguió el régimen estructural formando vetas lenticulares ricas en metales base y menas de plata (Ag) con algunos contrastes entre estructuras.

El estudio de las diferentes estructuras (460, Norte/Sur y 9-55) muestra una zonación mineralógica donde se observa un enriquecimiento de arsénico (As) y empobrecimiento en (Cu), el cual se refleja en el desarrollo de freibergita y esfalerita con abundante calcopirita en la esfalerita. Por el contrario, hacia los cuerpos Norte/Sur y 9-55v, principalmente en las

zonas medias, se presentó una fase de plata (Ag) más rica en cobre (Cu) del tipo tetraedrita. La precipitación de las menas de plata esta asociada con la interfaz de desarrollo entre la alteración propilítica y subpropilítica, con temperaturas de homogenización que oscilan entre los 200 y 270 °C. Las estructuras mineralizadas con mayor concentración de minerales de mena están relacionadas a una alteración subpropilítica (rica en clorita), siendo una guía de exploración. En las zonas formadas por encima de estas temperaturas se presenta una mayor concentración de metales base y las menas de plata tienden a desaparecer, mientras que en las zonas a temperaturas entre 270 y 350 °C, la alteración es progradada. En esta alteración progradada, se asocia con la formación de minerales de metales base y sulfuros de hierro, específicamente pirrotinas. Esta alteración progradante se desarrolla más hacia la base de la estructura 460 y ligeramente en la base del cuerpo Norte/Sur. En la estructura 9-55, se obtuvieron temperaturas y alteraciones compatibles con la alteración propilítica y subpropilítica, con un evento adicional de baja temperatura que oscilan entre 110 y 150°C. Esta última alteración queda evidenciada por la presencia de texturas de cuarzo crustiforme y plumoso, y la ausencia de metales base o menas de plata, compatible con un evento epitermal.

Con el estudio de las inclusiones fluidas se obtuvieron los rangos de temperaturas de precipitación para las diferentes fases minerales. Adicionalmente, el análisis de las gráficas Th vs NaCl % equivalente se identificó que en la estructura Norte/Sur tuvo lugar un proceso *de ebullición* mientras que la estructura 460 y 9-55 tendían más hacia enfriamientos isotérmicos/ diluciones. Así mismo, en la estructura 460 se identificó un proceso de *ebullición* en las zonas someras y una dilución hacia la base de la estructura.

Pot tanto, se puede indicar que la estructura 460 tiende a una evolución hacia los metales base con nulas concentraciones de plata, mientras que la estructura Norte/Sur se evidencia el comienzo de un fuerte proceso de ebullición asociado al desarrollo de menas de plata (Ag) tendiendo hacia las platas ricas en cobre(Cu). Así mismo, se sugiere un remuestreo del cuerpo 9-55 para caracterizar mejor la fase epitermal, ya que en la mayoría de las muestras observadas se presentaba un mayor desarrollo de las alteraciones propilítica y subpropilítica. Esta estructura el pulso epitermal esta cortando a las demás alteraciones, de forma que se infiere que es independiente y posterior a la precipitación de las menas de plata, es por ello que resulta indispensable un análisis exclusivo de esta zona.

7 Importancia Social

La minería resulta un factor crítico de impacto social y medioambiental, en el caso de economías como México representa un pilar importante del PIB y del desarrollo de la economía. Hablando de la plata y metales base, México es un líder mundial y referente en la producción de estos, por lo cual resulta de vital importancia invertir en el desarrollo de información, tecnologías y legislación que promuevan y hagan más productivo a este sector.

El sector minero en México, se encuentra fuertemente estigmatizado por las malas prácticas que han realizado un pequeño grupo de empresas mineras a lo largo de la historia, estas han sido reponsables de grandes desastres ambientales que han afectado , de manera crítica, al ecosistema y poblaciones próximas a las operaciones mineras. Es por esto que se requiere una fuerte legislación que penalice las malas prácticas y que promueva el desarrollo de la minería a través de la implementación de las mejores prácticas de la industria a nivel mundial.

El objetivo del presente trabajo es generar información del tipo técnico que tanto requiere el sector minero para el desarrollo de proyectos y optimización, para este caso, de los procesos de exploración. Siempre hay que recordar que la minería como parte del sector primario represnta la base de la cadena de valor de la industria.

8 REFERENCIAS

- 2018, U. (Octubre de 2019). *National Minerals Information Center*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2019, de <https://www.usgs.gov/centers/nmic/silver-statistics-and-information>
- Léxico estratigráfico*. (Octubre de 2019). Recuperado el 20 de Julio de 2019, de https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/#
- A., B. L. (1965). Diagrammi per la stima visiva della composizione percentuale nelle rocce sedimentarie. *Univ. Ferrara, N.S.*, 59—62.
- al, N. S. (2008). Relaciones estratigráfico–estructurales en la intersección del sistema de fallas San Luis–Tepehuanes y el graben de Aguascalientes, México central. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 70-85.
- Atkinson, W. W., & Einaudi, M. T. (1978). Skarn formation and mineralization in the contact aureole at Carr Fork, Bingham, Utah. *Economic Geology*, 1326-1365.
- Camprubí, A. (2010). Criterios para la exploración minera mediante microtermometría de inclusiones fluidas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 85-90.
- Canet, C. (2011). The Zn–Pb–Ag skarns of Zacatepec, Northeastern Oaxaca, Mexico: A study of mineral assemblages and ore-forming fluids. *Ore Geology Reviews*, 277-290.
- Díaz, A. A. (2009). Metalogenia del Área Mineralizada en Manganeso de Bahía Concepción, Baja California Sur. *Tesis para maestría*, 208.
- Díaz, A. A. (2009). *Metalogenia del Área Mineralizada en Manganeso*. Ciudad de México: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE México.
- Díaz, A. R. (2005). Clasificación de los yacimientos de manganeso y ejemplos de depósitos mexicanos e internacionales. *Boletín de Mineralogía*, 33-50.
- Geografía, I. N. (Octubre de 2019). *Minería*. Recuperado el 10 de Agosto de 2019, de <https://www.inegi.org.mx/temas/mineria/>

- González-Partida, E. (2000). *EVIDENCIAS DE EVOLUCIÓN DE UN FLUIDO BÁSICO A ÁCIDO A PARTIR DEL ANÁLISIS DE LA ALTERACIÓN HIDROTERMAL DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS AZUFRES, MICHOACÁN*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología,.
- Haldar, S. K. (2013). *Mineral Exploration Principles and Applications*. ELSEIVER.
- Imlay, R. (2019). *Léxico Estratigráfico*. Recuperado el 6 de Junio de 2019, de <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Indidura.pdf>
- Iphorski, M. (2011). Una mirada al microscopio electrónico de. *Caracterización de Materiales*, 50-65.
- Isidro Loza-Aguirre¹, A. F.-S.-Á. (2008). *Relaciones estratigráfico-estructurales en la intersección del sistema de fallas San Luis-Tepahuanes y el graben de Aguascalientes, México central*. Ciudad de México: Revista mexicana de ciencias geológicas, 113-120.
- J.Chena, C. C. (1992). Tin-bearing skarns of South China: Geological setting and mineralogy. *Ore Geology Reviews*, 225-248.
- J.Mertig, H. (1994). Skarn Cu□Au orebodies of the Gunung Bijih (Ertsberg) district, Irian Jaya, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 179-202.
- Kenneth F. Clark, G. A. (2009). *Geología Económica de México*. Pachuca, México: 2009 Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México .
- Kwak, T. A., & Tan, T. H. (1981). The importance of CaCl₂ in fluid composition trends; evidence from the King Island (Dolphin) skarn deposit . *Economic Geology*, 955-960.
- Margarito Tristán-González¹, J. R.-H.-R., & Yza-Guzmán, R. (2011). *Control estructural para el emplazamiento de vetas y domos félsicos en el distrito minero de Zacatecas, México*. Ciudad de México: Bol. Soc. Geol. Mex vol.64 no.3 .
- Maria Fernanda Campa and, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1040-1051.

- Mathieson, G. A., & Clark, A. H. (1984). The Cantung E Zone scheelite skarn orebody, Tungsten, Northwest Territories; a revised genetic model. *Economic Geology*, 883-901.
- McGraw-Hill. (2003). *Dictionary of Geology and Mineralogy*. McGraw-Hill.
- Megarejo, J. C. (2003). *ATLAS DE ASOCIACIONES MINERALES EN LAMINA*. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- Meinert, L. D. (1987). *Skarn zonation and fluid evolution in the Groundhog Mine, Central mining district, New Mexico*. *Economic Geology*.
- Melgarejo J.C., P. J. (2013). *Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera*. . Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 63.
- Mexicano, S. G. (Octubre de 2019). *Consulta el Anuario Estadístico de la Minería Mexicana*. Recuperado el 5 de Agosto de 2019, de <https://www.gob.mx/sgm/articulos/consulta-el-anuario-estadistico-de-la-mineria-mexicana>
- Morales, J. L. (1 de 08 de 2019). *Revista Geológica de América Central*. Recuperado el 1 de 08 de 2019, de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/10466>
- NAVARRO, D. L. (2014). *MINERALIZACIÓN DEL PÓRFIDO DE COBRE-ORO DE TIÁMARO, ESTADO DE MICHOACÁN* . Ciudad de México, México: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO .
- Ramdohr, P. (1980). The ore minerals and their intergrowths. En P. Ramdohr, *The ore minerals and their intergrowths* (pág. 1205). Pergamon.
- Ramón Mendoza Reyes, P. ., (2016). *La Parrilla Silver Mine*. Durango: First Majestic.
- RIDLEY, J. (2013). *Ore Deposit Geology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- ROBB, L. (2010). *INTRODUCTION TO ORE-FORMING PROCESSES*. USA: Blackwell.
- Rogers, C. L.-V. (2019). *Léxico estratigráfico*. Recuperado el 1 de Junio de 2019, de <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Ahuichila.pdf>
- Rosique, A. R. (2016). *Presentaciones de clase, Metalogenia*. Ciudad de México.

- Rubin, J. N., & Kyle, J. R. (1988). *Mineralogy and geochemistry of the San Martin skarn deposit, Zacatecas*. GeoScienceWorld.
- Rubin, J., Kyle, J., & Olivares, R. (1985). Calc-silicate alteration and sulfide mineralization, San Martin mine, Zacatecas, Mexico. *Geol. Soc. Am., Abstr. Programs*, 120-125.
- Slack J.F., C. J. (2010-2012). *Co-Cu-Au Deposits in Metasedimentary Rocks-A Preliminary Report*. U.S. U.S: Geological Survey.
- Taylor, R. (1995). *Ore Texture*. National Library of Australia .
- THOMPSON, T., & AREHART, G. (1990). Geology and the origin of ore deposits in the Leadville District, Colorado. I : Geologic studies of orebodies and wall rocks. *Pascal y Francis*, 130-155.
- TORNOS, C. C. (1984). El skarn de W-Sn del Carro del Diablo. *Boletín Geológico y Minero*, 55-63.
- Tuta, Z. S. (1988). Geochronology of mercury, tin, and fluorite mineralization in northern Mexico: Economic Geology. *Economic Geology*, 1931-1942.
- Vaughan, J. R. (1994). Ore microscopy and ore petrography. En J. R. Vaughan, *Ore microscopy and ore petrography* (pág. 434). ISBN.
- Velador, J. M., Heizler, M. T., & Campbell, A. R. (2010). Timing of Magmatic Activity and Mineralization and Evidence of a Long-Lived Hydrothermal System in the Fresnillo Silver District, Mexico: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology. *Economic Geology*, 1335-1349.
- Wilkinson, B. H. (2006). Resources of Gold in Phanerozoic Epithermal Deposits. *Economic Geology*, 623-633.
- Wilkinson, J. (1999). *Fluid inclusions in hydrothermal ore deposit*. London, UK: Elsevier.

ANEXOS PETROGRÁFICOS, MINERAGRÁFICOS, SEM Y SWIR

Clave de muestra: 12-460-IF1

Localidad: La Parrilla, Quebradillas, Dgo.



Ilustración 1.-Muestra de mano 12-460-IF1, el cuadro rojo representa el área para analizar .

Justificación.- muestra del rebaje 12-460, procedente de la estructura 460. En esta zona llega a presentar leyes de hasta 130 gAg/Ton, este tipo de roca representa el tipo de mineralización principal del nivel.

Descripción macroscópica.- Se presenta un manto mineralizado compuesto por bandeamiento de sulfuros, similar a una laminación. En esta muestra se observan tres tipos de bandas compuestas de: (1) esfalerita/pirrotina, (2) galena/pirrotina/esfalerita y (3) calcita anahedral. La presencia de estas bandas sugiere al menos dos pulsos de mineralización de mena.

Descripción microscópica.

Manto mineralizado con textura laminada, las laminaciones están compuestas principalmente por esfalerita, pirrotina/marcasita, calcopirita, calcita, galena y sulfosales de plata. Todas las anteriores se presentan en diferentes proporciones, en algunos casos se llega a presentar ciertos procesos de reequilibrio entre las fases minerales más estables (p.e. pirrotina y marcasita a pirita). Con base en las laminaciones observadas macroscópicamente se presentan 2 tipos de láminas, las cuales se describen a continuación:

- Lámina 1 (Ilustración 2 y 4).- compuesta por pirrotina/pirita (80%), esfalerita 1/calcopirita (5%), galena (3%), pirita (5%), calcita (7%) y sulfosales (1%<). La pirrotina se presenta como el aglutinante subedral envolviendo a todas las demás fases minerales, en algunas zonas se observa intercrecido con calcitas las cuales se analizarán con microtermometría. En algunas zonas la pirrotina comienza a ser reemplazada parcialmente por marcasita. Galena, pirita, esfalerita y sulfosales se encuentran incluidas en granos anhedrales en la pirrotina con granulometrías que oscilan entre [10 a 60 μm], todas las inclusiones son contemporáneas ya que se encuentran intercrecidas entre sí y relleno de oquedades en la pirrotina. En esta banda la calcita se presenta intercrecida con las diferentes fases minerales, pero se distinguen dos fases una de mayor granulometría [.5-1 mm] intercrecida con la pirrotina y una secundaria de menor granulometría [10- 80 μm] la cual se encuentra incluida en la pirrotina. Las sulfosales se presentan puntualmente incluidas en la pirrotina e intercrecidas con esfaleritas. En esta la esfalerita presenta la enfermedad de la calcopirita, con una asociación a las pirritas. Adicionalmente, se pueden observar cristales de calcopiritas (1%<) euedrales diseminados en toda la zona.
- Banda 2 (ilustración 3).- compuesta por pirrotina/marcasita (60%), esfalerita 2 (5%), galena (30%) y calcita (5%). La pirrotina se presenta como aglutinante subedral envolviendo a todas las demás fases minerales, en algunas zonas se observa intercedido con calcitas las cuales de

analizaran con microtermometría. Galena, esfalerita y calcita se presentan incluidas en la pirrotina, la galena se presenta como cristales anhedrales de granulometría que oscila entre [10 – 200 μm], esfalerita y calcita se presentan como cristales anhedrales de granulometría que oscilan entre [10 -50 μm].

Con base en lo anterior se puede inferir que nos encontramos con una fase retrograda de una facie distal del skarn, en el cual se tiene un pulso mineralizante que evoluciona hacia un fluido enriquecido en cobre lo cual genera una segunda generación de esfalerita con calcopirita. A lo largo de la mineralización, el plomo, zinc y hierro permanecen constante hasta que el fluido comienza precipitar calcopirita con sulfosales de plata, en este proceso se observa un cambio de la temperatura mediante la evolución de los sulfuros de hierro marcasita/pirita/pirrotina. La precipitación de sulfosales de plata parece estar ligado a la etapa final de mineralización, relacionada con pirita y esfaleritas gris oscuro. Aparentemente la sulfosal pertenece al grupo de la tenantita.

En esta lámina solo se observaron inclusiones fluidas con las características necesarias para el estudio microtermométrico en las calcitas. Se analizaron según la asociación que tengan con la banda en la que se encuentren, con base en esto se encontraron 2 familias de inclusiones (Ilustraciones 5 y 6). Ambas familias presentan dimensiones que oscilan entre las 10 -40 μm , ambas se alojan en calcita, una familia se aloja en calcita subedral con crucero bien marcado y la segunda familia se aloja en calcitas anedrales.

Paragénesis

Mineral	Fase retrograda	
	Etapla 1	Etapla 2
Esfalerita	-----	-----
Galena	-----	----
Pirrotina	-----	
Marcasita		-----
Sulfosal-Ag		---
Calcopirita		-----
Pirita	----	-----
Calcita	-----	

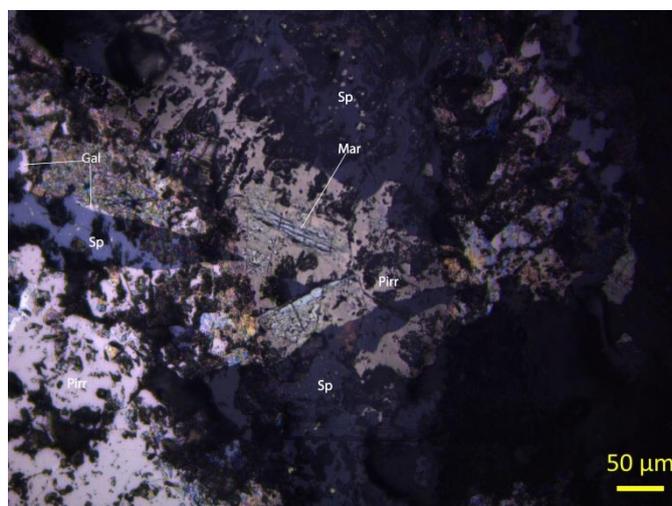


Ilustración 2.- Pirrotina (Pirr) siendo reemplazada por marcasita (mar), esfalerita 1(Sp) con la enfermedad de la calcopirita y galenas (Gal) intercrecidas con esta. Zoom 5x . PPL

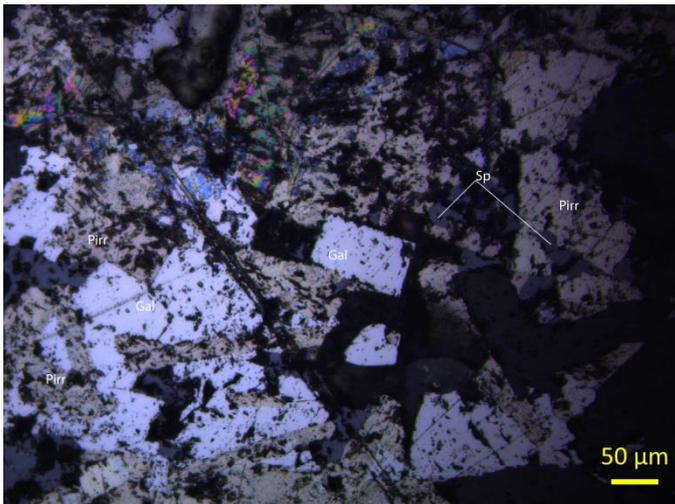


Ilustración 3.- Galenas (Gal) incluidas en pirrotina (Pirr), se presenta esfalerita 2 (Sp) incluidas en la pirrotina. Zoom 10x, PPL.

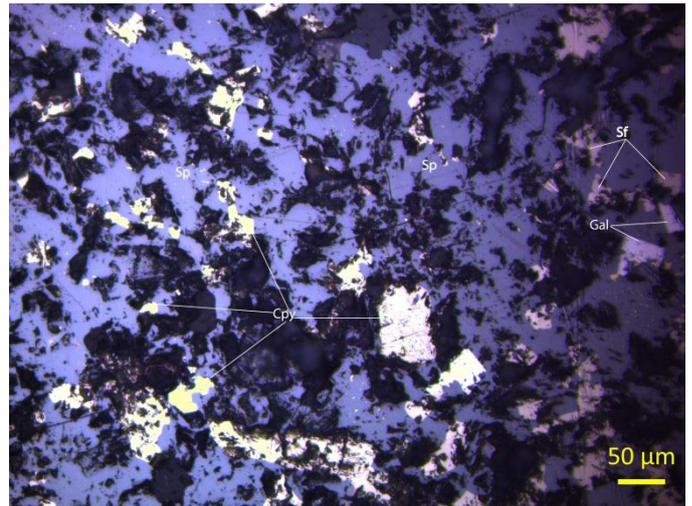


Ilustración 4.- Esfalerita 1(Sp) con la enfermedad de la calcopirita (Cpy), se presenta calcopirita de segunda generación diseminados en esta. Adicionalmente, se presenta cristales de sulfosales (tenantita, Sf) y

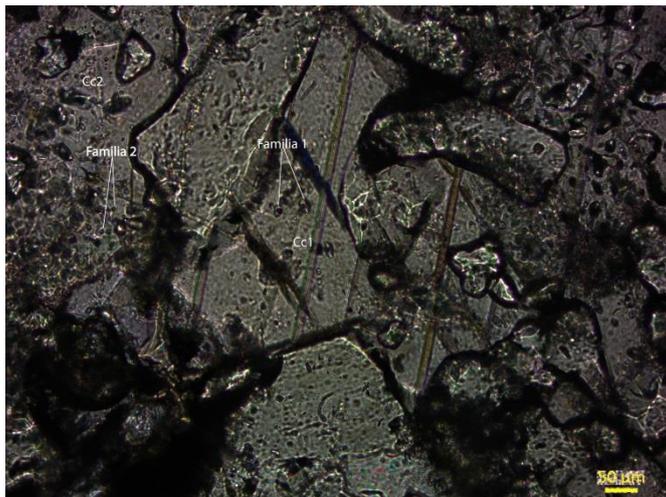


Ilustración 5.- Se observan dos familias de inclusiones, la familia 1 se presenta en la calcitas eudral, presenta relleno L+V de 80% y tamaño de 20 µm. La familia 2 se presenta en calcita sucia anhedral, presenta relleno L+V y tamaños 15µm.

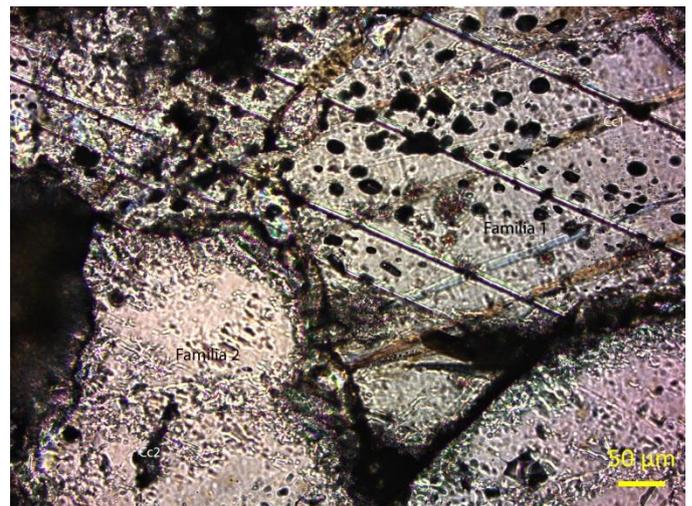


Ilustración 6.- Se observan dos familias de inclusiones, la familia 1 se presenta en la calcita más eudral, presenta relleno L+V de 80% y tamaño de 20 µm. La familia 2 se presenta en calcita sucia anhedral,

ESTUDIO PETROGRÁFICO Y MINERAGRÁFICO

Se obtuvieron dos muestras del rebaje 11-894(Borregos), la muestra 11-894-M4 corresponde a uno de los intrusivos asociados a las zonas de mineralización. Y la muestra 11-894-IF-2, la cual corresponde a la mineralización propia de este nivel.

Clave de muestra: 11-894-M4 Localidad: La Parrilla, Quebradillas, Dgo.

Rebaje 11-894(Borregos).

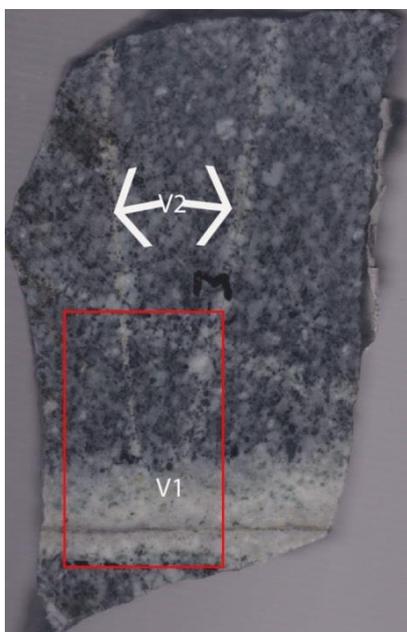


Ilustración 1. Muestra de mano 11-894-M4, se observan 2 tipos de vetillas V1 y V2.

Descripción macroscópica.- Roca de textura porfírica, compuesta por fenocristales de feldespatos, biotita y anfíbol. Con una matriz color gris claro y vetilleo de cuarzo, arcillas y sulfuros finos. La roca exhibe una alteración propilítica con clorita, cuarzo y pirita.

Como se observa en la ilustración 1, existen 2 tipos de vetillas de cuarzo (V1 y V2). V1 se caracteriza por tener una textura bandeada, asociada a minerales arcillosos y sulfuros finos. V2 se compone de vetillas de cuarzo y sin sulfuros. V1 se asocia con vetilleo de mayor temperatura debido a su mayor desarrollo, en el cual se tiene la superposición de un evento de menor temperatura. El área roja representa el área del análisis petrográfico y mineralógico (ilustración 1).

Descripción microscópica.

Roca de textura porfírica, con cristales inequigranulares e idiomórficos, compuesta por fenocristales de biotita (0.5- 2 mm), hornblenda (0.5 – 1.5 mm), clinopiroxenos (0.5 – 1 mm), feldespato potásico (0.5 - 1.5 mm) y plagioclasa (andesina, 0.5 - 2.5 mm). La matriz de la roca se compone por cuarzo y feldespato, en ésta se observa a los fenocristales corroídos (borde de reacción) por una reacción de recristalización asociado con la silicificación de la matriz (ilustración 2). Los fenocristales de anfíbol, micas y piroxenos se encuentran cloritizados parcialmente o totalmente reemplazados. Con base en lo anterior, la roca se clasifica como una **granodiorita**.

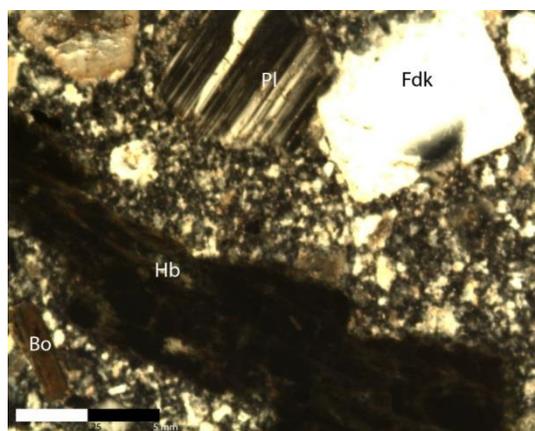


Ilustración 2. Fotomicrografía de la granodiorita (muestra 11-894-M4), 5x, NPL. Fenocristales de feldespato potásico (Fdk), andesina/labradorita (Pl), biotita (Bo) y hornblenda (Hb), embebidos en una matriz de feldespato y cuarzo.

En esta muestra se observan 2 tipos de vetillas que contrastan por su composición, las cuales son:

1. Compuesta por grano fino, cuarzo y escasa presencia de sulfuros (pirita/esfalerita), representando una fase retrograda de menor temperatura del tipo alteración propilítica (Ilustración 4).
2. Cuarzo con minerales arcillosos y epidota de mayor granulometría, con una fuerte presencia de sulfuros, asociada con la fase de mayor temperatura del tipo alteración propilítica (Ilustración 5).

Adicionalmente se pueden observar dos generaciones de cuarzo (ilustración 3), uno idiomórfico y equigranular, recristalizado propio de la roca y otro asociado con la silicificación, el cual se muestra de manera anhedral y con una menor granulometría (<0.1 mm).

Asociación mineral:

Primarios	Plagioclasa sódica(35%), cuarzo primario(30%), feldespato potásico(15%),
Accesorios	Horblenda(10%), biotita(8%) y piroxenos(2%).
Alteración	Arcillas(alteración de plagioclasas), epidota(alteración de plagioclasas), clorita(alteración de anfíbol y piroxenos), cuarzo de baja cristalinidad/recristalizado y pirita
Mena	Esfalerita, esta se encuentra específicamente en la vetilla Vi , la cual tiene mayor desarrollo de la alteración propilítica

La roca presenta al menos dos pulsos hidrotermales de diferentes temperaturas, las cuales se ven reflejados en el contraste de la mineralización en las vetillas. Se observa una etapa propilítica asociada con la mineralización principal de sulfuros, una etapa subpropilítica con menor presencia de sulfuros y una etapa de silicificación que se asocia con la fuerte presencia de cuarzo con baja cristalinidad fino en la matriz/vetillas.

Paragénesis.

Minerales	Etapa 1 (Propilítica)	Etapa 2 (subpropilítica)	Etapa 3 (silicificación)
Arcillas	-----		
Clorita		-----	
Pirita		-----	
Esfalerita		-----	
Cuarzo	-----		-----
Epidota	-----		
Feldespato K	-----		

En general se puede observar un evento de mayor temperatura asociado con vetillas que presentan una alteración del tipo propilítica, en el cual se presentan epidota , minerales arcillosos ,como alteración de plagioclasas/feldespatos, y sulfuros finos. En estas mismas podemos observar una superposición de eventos con la presencia de cuarzo secundario, epidota de menor granulometría y

escasos sulfuros. Además, se tiene una etapa final en la cual todas las vetillas muestran una fuerte silicificación, con presencia de cuarzo de baja cristalinidad.

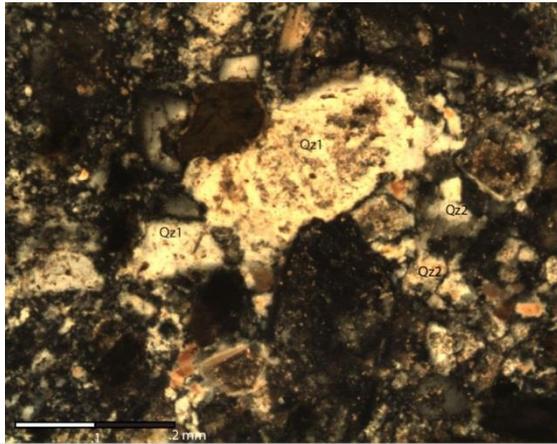


Ilustración 3. Contraste de cuarzo primario (Qz1) y cuarzo secundario (Qz2) propio de la silicificación. PPL, 20x.

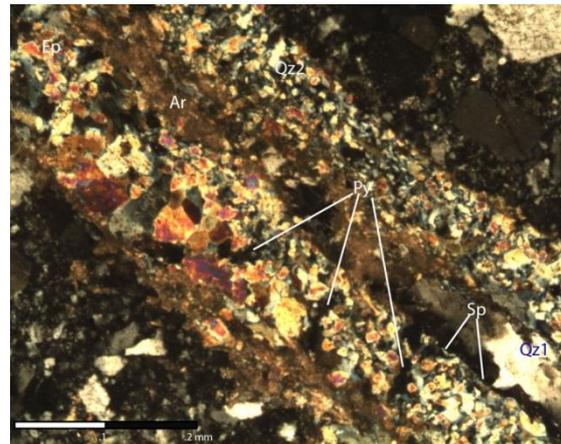


Ilustración 2. Vetilla con superposición de eventos, se observan minerales arcillosos(Ar), cuarzo de primario(Qz1) y secundario(Qz2), epidota(Ep), esfalerita(Sp) y pirita(Py). En esta se observa un mayor desarrollo de la alteración tipo propilítica. NPL, 20x.

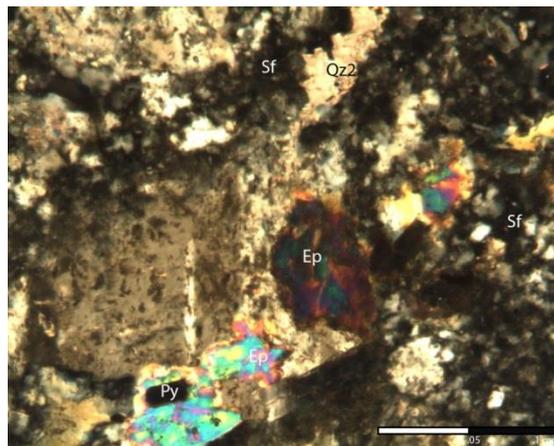


Ilustración 4. Vetilla propilítica/subpropilítica con presencia de sulfuros finos (Sf), epidota (Ep) y cuarzo secundario (Qz2). NPL, 40x.

**Clave de muestra: 11-894-IF-2; Localidad: La Parrilla, Quebradillas, Dgo.
Rebaje 11-894(Borregos).**



Ilustración 1.- Muestra de mano 11-894-IF2

Descripción microscópica.- Roca caliza fuertemente recrystalizada, con presencia de parches con galena, esfalerita y pirita. Esta mineralización pertenece a la estructura norte/sur, y es propia de los reemplazamientos encontrados en calizas. El área roja representa el área de análisis (ilustración 6).

Descripción microscópica.

Se observa un intercrecimiento inequigranular de cuarzo y calcita idiomórficas. En el cual predominan dos granulometrías, una de 0.1- 0.5 [mm] y otra mayor a 0.5 [mm]. Con pirita fina diseminada, de 0.2- 0.5 [mm] y, relleno de cavidades. Se tienen parches con sulfuros: esfalerita, galena, pirita y tetraedrita. Estos parches son de granulometrías que van de 0.2 - 1.5 [mm]. En la periferia de los parches se observa una clara ~~recristalización de la calcita~~. Finalmente, se observan vetillas de cuarzo con calcita y sulfuros finos, Ilustración 5. Muestra de mano 11-894-IF-2s, presentan una variedad de cuarzo plumoso lo cual nos habla de un evento de baja temperatura típico de la silicificación.

Se observan dos especies de pirita, una de granulometría fina [.1-.5 mm] como parte de un pulso tardío y otra de granulometría mayor [.5-2mm] que recrystaliza a partir de marcasita como parte del reequilibrio de los fluidos mineralizantes. Se tienen dos generaciones de esfalerita, una rica en hierro la cual esta exsolviendo una gran cantidad de calcopirita y otra rica en zinc que aglutina a los parches de sulfuros. Galena y pirita/marcasita se encuentran intercrecidas, se observan galenas ricas en plata las cuales se encuentran rodeadas por piritas y en algunas zonas cortadas por tetraedrita. Finalmente, la calcopirita idiomórfica se encuentra relleno de cavidades en piritas y galena, rara vez en la calcita/cuarzo.

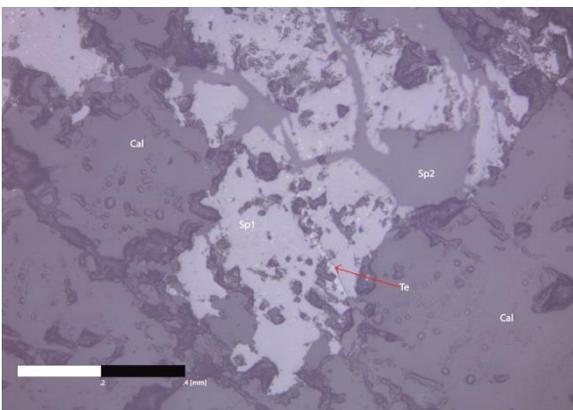


Ilustración 7. Intercrecimiento de esfalerita rica en hierro (Sp1) y esfalerita rica en Zn (sp2). Se observa una vetilla de sulfosal, probablemente tetraedrita (Te), cortando a Sp1. PPL, 20x.

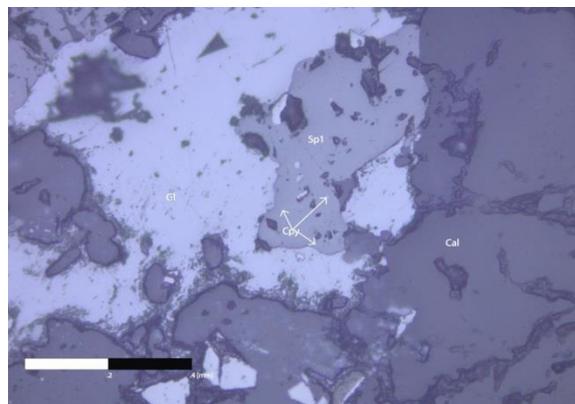


Ilustración 6. Galena (Gl) intercrecida con esfalerita(Sp1). Se observa que la esfalerita esta exsolviendo calcopirita(Cpy), PPL, 20x.

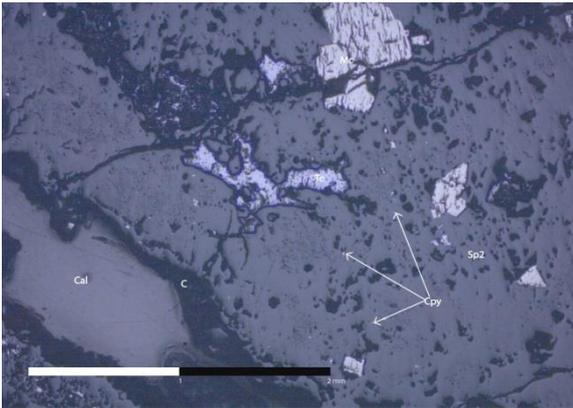


Ilustración 8. Esfalerita (Sp2) con sulfosal diseminada, probablemente tetrahedrita(Te), marcasita (Mc) y Calcopirita (Cpy). PPL, 10x.

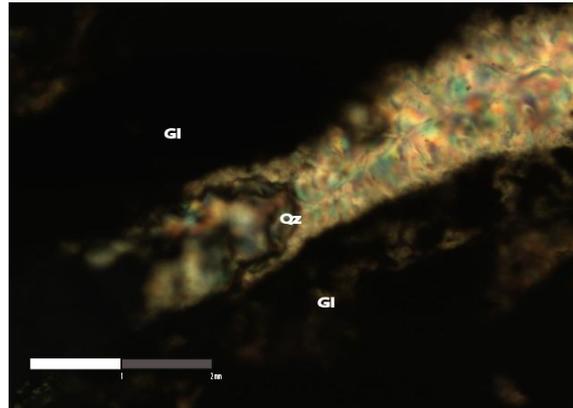


Ilustración 7. Cuarzo plumoso(Qz) de probable evento epítermal cortando galena(Gl). NPL, 20x.

Paragénesis.

Minerales	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Marcasita	-----		
Pirita		-----	
Esfalerita 1(Fe)	-----		
Esfalerita 2		-----	
Calcopirita	-----	-----	
Tetraedrita			-----
Galena			-----

Se puede dividir la evolución de la mineralización con base en la paragénesis de esta muestra en 3, las cuales son:

- Etapa 1.- pulso rico en hierro y cobre, lo cual genera la cristalización de calcopirita idiomórfica fina, esfalerita rica en Fe y marcasita.
- Etapa 2.- pulso empobrecido en hierro, lo cual genera la recristalización de la marcasita a pirita y el depósito de pirita fina. Con este cristaliza esfalerita rica en zinc, en esta etapa hay un enriquecimiento en cobre lo cual genera que la esfalerita rica en hierro comience a exsolver calcopirita.
- Etapa 3.- pulso final empobrecido en hierro y cobre, lo cual genera el depósito de galena, galena argentífera y tetrahedrita. A esta última asociación se le observa como relleno de cavidad y cortando cristales de esfalerita.

Clave de muestra: 13-460-IF1 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.



Ilustración 9.-Muestra de mano 13-460-IF1, el cuadro rojo representa el área para analizar.

Justificación.- muestra del rebaje 13-460, de la estructura 460. Esta zona llega a presentar leyes de hasta 130 gAg/Ton, este tipo de roca representa el manto mineralizado principal.

Descripción macroscópica.- Se presenta un manto mineralizado compuesto por bandas y un pequeño intervalo con laminaciones de sulfuros, contrastantes en tamaños, y ricas en pirrotina. En esta muestra se observan 2 tipos de bandas, compuestas por (1) esfalerita/pirrotina y (2) galena/pirrotina/esfalerita, en ambas se presentan calcitas. Con base en lo anterior se infiere la presencia de al menos dos pulsos mineralizantes.

Descripción microscópica.

Se observa una roca tipo manto con dos zonas diferentes, una con textura laminada compuesta por galena, esfalerita y pirrotina; y la segunda de textura masiva compuesta mayormente por pirrotina y calcita con escasa presencia de galena y esfalerita. Estas dos zonas se describen a continuación:

- Zona 1 (Ilustración 2 y 7).- está compuesta por una textura laminada, se presenta pirrotina como aglutinante (50%) embebiendo a galenas (5%), calcopiritas (5%), esfaleritas parcialmente (35%) y pirritas (5%). En esta zona las galenas (10- 100 μm) se presentan incluidas en pirrotinas (1 – 2 cm) y esfaleritas (10 – 30 μm), estas últimas se encuentran parcialmente embebidas pero se presentan zonas de intercrecimiento galena/esfalerita. Las pirritas y calcopiritas, ambas con granulometrías [10 – 40 μm], se observan incluidas en esfalerita y pirrotina, pero nunca intercrecidas entre sí. Adicionalmente, se observan un ligero desarrollo de la enfermedad de la calcopirita en las esfaleritas, pero esta no se desarrolla de forma notable.
- Zona 2 (Ilustración 4).- está compuesta por una textura masiva, en la cual se presenta pirrotina (65%) como aglutinante embebiendo galenas (16%), esfaleritas (3%), calcopiritas (5%), pirritas (5%), sulfosales (1%) y wollastonita/calcita (5%). En esta zona, las sulfosales (probable tenantita, 5 - 10 μm) se encuentran intercrecidas con esfaleritas y calcopiritas, ambas con granulometrías de [5 – 15 μm], en estas se observan puntos triples y contactos rectos (Ilustración 5 y 6). Las pirritas [5-40 μm] se presentan de forma aislada incluidas en pirrotina [1 – 1.5 cm], rara vez intercrecidas con esfalerita y sulfosales. Esta zona presenta dos tipos de calcita una subedral de granulometría que oscila de [20 – 200 μm] y otra anahedral de [10 – 50 μm], la calcita anahedral tiene un hábito radial similar a la wollastonita.

Con base en lo anterior, se puede inferir que nos encontramos en una fase retrograda la cual se encuentra superpuesta a una previa fase prograda, esta última es representada por remanentes de cristales de wollastonita. Se puede hablar de dos pulsos mineralizantes uno de alta temperatura rico en hierro y zinc, el cual generó estas zonas de pirrotina masiva, y un segundo pulso de menor temperatura rico en hierro, cobre y plata el cual generó la laminación. De igual manera, se puede

considerar un solo pulso mineralizante, el cual al ir empobreciéndose en hierro comenzó a precipitar el resto de los iones en solución. Finalmente, se observaron 2 familias de inclusiones fluidas (Ilustración 3), una en calcitas euedrales intercrecidas con los sulfuros y otras en calcitas anhedrales asociadas con las zonas remanentes de cristales de wollastonita. Por lo anterior, se analizarán las zonas de wollastonita como una familia de inclusiones y se contrastará con una segunda familia de inclusiones alejada de las zonas con wollastonita

Paragénesis

Mineral	Prograda	Etapa 2	Etapa 3
Esfalerita		-----	-----
Galena		-----	
Pirrotina		-----	
Sulfosal (Tenantita)			---
Calcopirita			-----
Pirita			-----
Calcita		-----	
Wollastonita	-----		

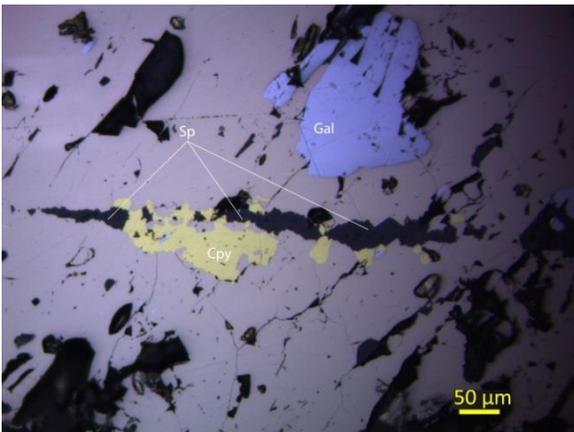


Ilustración 2.-Pirrotina (Pirr) embebiendo galenas (Gal) y esfaleritas (Sp) parcialmente. Adicionalmente, se pudo observar galenas (Gal) y pirritas (Py) incluidas dentro de las esfaleritas. PPL. Zoom 20x.



Ilustración 3.-Inclusiones fluidas, familia 2, en zona proximal a las wollastonitas, se observa un cambio, PPL, Zoom 50x.

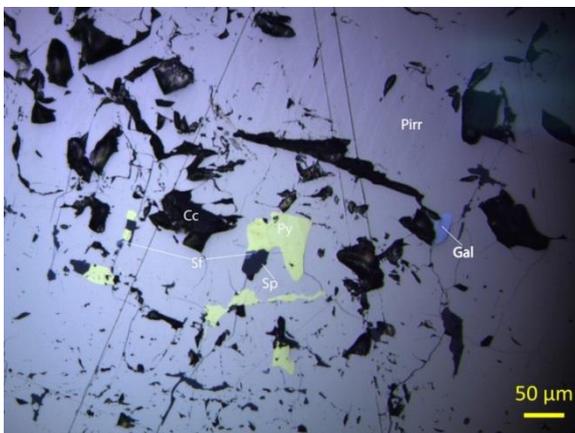


Ilustración 4.- Pirrotina embebiendo cristales de calcopirita (Cpy), galena (Gal) y esfaleritas (Sp). PPL, 20x

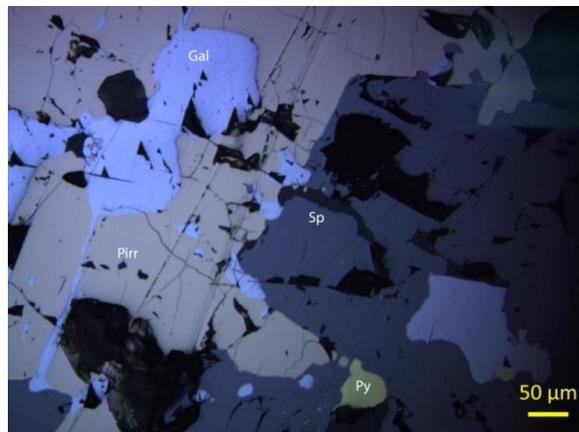


Ilustración 5.- Pirrotina (Pirr) embebiendo cristales de galena (Gal), pirita (Py), tenantita (Sf), esfalerita (Sp) y calcita (Cc). Se presenta un intercrecimiento de las sulfosales con esfaleritas y pirritas. PPL, 20x.

Numero de muestra: 8-917-M-1 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.



Ilustración 1.- muestra de mano clave 8-917-M1, el área punteada color negro representa la zona para analizar.

Justificación.- muestra extraída del rebaje 8-917, que pertenece a la estructura conocida como 9-55. Esta zona llega a presentar leyes de hasta 100 gr[Ag]/Ton, este tipo de roca representa el principal tipo de reemplazamiento que se explota de este cuerpo mineralizado.

Descripción macroscópica.- roca reemplazada con textura relictiva de caliza tipo mudstone, por su estructura se infiere que pertenece a la Formación Indidura. Se observan parches de sulfuros compuestos de pirita-esfalerita, la matriz de la roca, en general, se encuentra parcialmente silicificada principalmente cerca de los parches de sulfuros.

Descripción microscópica.

Se observa una roca con textura de reemplazamiento, la matriz se encuentra completamente silicificada. En esta se observan dos generaciones de cuarzo, uno de granulometría muy fina ($.1 \text{ mm} <$) el cual es el principal componente de la matriz (Ilustración 3) y otro de granulometrías que oscilan entre $.5 - 1 \text{ mm}$, el cual se encuentra intercrecido con las menas metálicas en los parches de sulfuros. Existe presencia de carbonatos en la matriz con una granulometría menor a $.3 \text{ mm}$ y una abundancia del 10%.

En esta muestra se observa arsenopirita, esfalerita, pirita y tetraedrita. La esfalerita se encuentra intercrecida con la pirita en una proporción 70 % - 30%, ambas con granulometrías que oscilan entre los $.1 - 1.5 \text{ mm}$. En el caso de la pirita se observan dos generaciones, la que se encuentra entrecruzada con la esfalerita y otra de menor granulometría que oscila de $.1 - .5 \text{ mm}$, en esta última se aprecia a la tetraedrita reemplazando a la pirita (Ilustración 5). Adicionalmente, se puede observar a la tetraedrita reemplazando cristales de arsenopirita ($.1 - .5 \text{ mm}$), aunque estos son escasos se aprecia claramente este proceso (ilustración 2). Con base en lo anterior se pueden definir al menos dos pulsos mineralizantes uno enriquecido en Fe, Zn y As, el cual evolucionó composicionalmente para precipitar Ag. Y un último evento estéril que generó la silicificación de la matriz en esta muestra. Debido a que no se observan cristales de las sulfosal de plata intercrecidos claramente con el cuarzo se descarta la idea de un pulso de Qz /Ag, al menos por lo que se observa en esta muestra. Aunque se recomienda que se verifique con un mayor número de observaciones en muestras adicionales.

Paragénesis.

Mineral	Subpropilítica	Silicificación
Cuarzo	-----	-----
Esfalerita	-----	
Tetraedrita	-----	
Pirita	-----	-----
Calcita		-----



Ilustración 2.- Arsenopirita (Apy) reemplazada parcialmente por tetradrita, se observa intercrecimiento con esfalerita (Sp) y cuarzo (Qz). PPL, zoom 20 x.

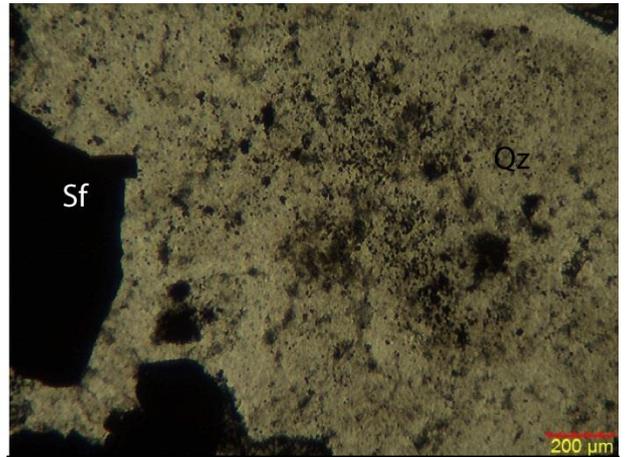


Ilustración 3.- Matriz de cuarzo (Qz) embebiendo sulfuros (Sf), este tipo de cuarzo predomina en esta muestra PPI. Zoom 4x

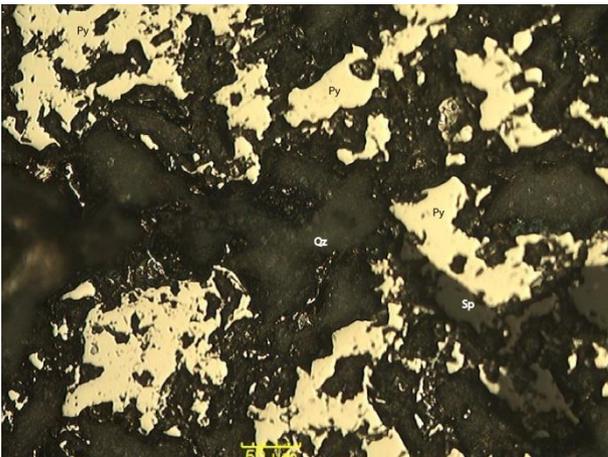


Ilustración 4.- cuarzo (Qz) intercrecido con pirita (Py) y esfalerita (Sp). Este parche de sulfuros es muy común en esta muestra PPI. Zoom 10x

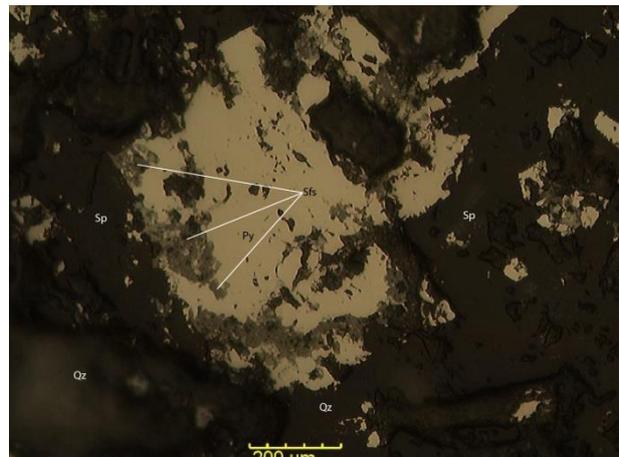
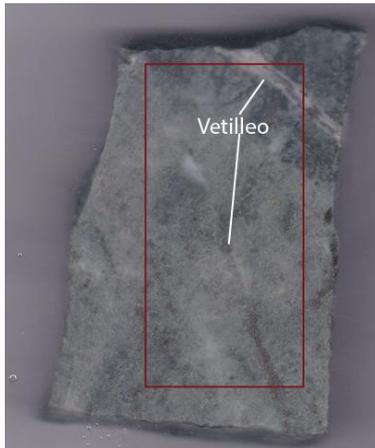


Ilustración 5.- Intercrecimiento de cuarzo (Qz), esfalerita (Sp) y pirita (Py), en esta se observa como la pirita está siendo

Numero de muestra: 5-460-M-3 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.

Justificación.- muestra extraída del rebaje 5-460, que pertenece a la estructura 460. Esta zona llega a presentar leyes de hasta 140 gAg/Ton, la mineralización generalmente esta próxima al intrusivo al que pertenece la muestra.



Descripción macroscópica.- dique porfídico con matriz verdosa, por alteración, y fenocristales de plagioclasas/piroxenos alterados pervasivamente. Se observan vetillas bandeadas de color blanco con sulfuros hacia su centro (ilustración 1), las zonas más próximas a estas vetillas parecen estar parcialmente silicificadas.

Ilustración 1.- muestra 5-460-M3. El recuadro rojo representa el área de estudio. Nostese la alteración color verde v vetilleo

Descripción microscópica.

Se observa dique con textura relicta porfírica, con fenocristales de piroxenos, anfíboles y plagioclasas. Los componentes de la roca son cuarzo (15%), plagioclasas (60%), piroxenos (10%) y anfíboles (15%). Las plagioclasas (60%) se encuentran totalmente alteradas a arcillas, y en las zonas donde son cortadas por vetillas son reemplazadas por epidota. Anfíboles y piroxenos se encuentran alterados selectivamente (ilustración 2), en algunas zonas se observan clorizados y en otras, aunque en menor medida, se encuentran epidotizados. La matriz está compuesta por carbonatos y cuarzo, en algunas partes de esta se observa una fuerte presencia de arcillas por la alteración de los feldspatos que contiene. El cuarzo primario de la roca es menor al 15%, por lo cual esta se puede clasificar como **granodiorita**.

Se observa un abundante vetilleo a lo largo de la muestra, el cual se puede dividir en dos tipos, los cuales contrastan fuertemente por su composición y temporalidad. Estos son:

- Vetillas propilitizadas (ilustración 7).- con una asociación mineral compuesta por arcillas (10%), calcita (30%), clorita (15%) a los extremos de estas, epidota (20%) y sulfuros/sulfosales (25%). Las fases metálicas en esta tienen granulometría que va de 0.2 – 1 mm, están compuestas por esfalerita, sulfosales (tetraedrita), galena y marcasita. Los sulfosales de plata parecen estar ligadas con la esfalerita y están en granulometrías de 0.2 - 0.5 mm. Próximas a estas vetillas, se observa un horizonte brechado de 1 cm que tiene ligera presencia de menas metálicas. Estas vetillas representan las fases subpropilítica y propilítica, en las cuales precipitó la mayor parte de las menas metálicas. Con base en lo anterior se puede inferir que el pulso mineralizante evolucionó durante la mineralización y no fueron pulsos independientes.
- Vetillas de cuarzo (ilustración 4).- con asociación mineral compuesta por cuarzo (95%) y menas (5%) de grano fino, de 0.1 - 0.3 mm. Estas se encuentran cortando a las vetas propilíticas y solo presentan marcasita/pirita y esfalerita fina en menor medida. Estas pertenecen a un pulso mineralizante tardío, con menor mena en comparación con el vetilleo propilítico. Este pulso parece ser totalmente independiente al anterior y no una evolución del fluido mineralizante.

Adicionalmente, se puede observar remanentes de la fase progradada compuesta por diópsida (ilustración 6) y otra retrogradada de alta temperatura compuesta de tremolita-actinolita. Ambos se encuentran fuertemente alterados a clorita y con presencia de arcillas (ilustración 5).

Paragénesis.

Mineral	Progradada	Propilítica	Subpropilítica	Silicificación
Diopsida	-----			
Tremolita-actinolita	-----			
Epidota		-----		
Calcita		-----		
Clorita			-----	
Acillas		-----		-----
Marcasita/pirita		-----		-----
Esfalerita		-----		-----
Galena			-----	
Sulfosales(Tenantita)			-----	
Cuarzo			-----	-----

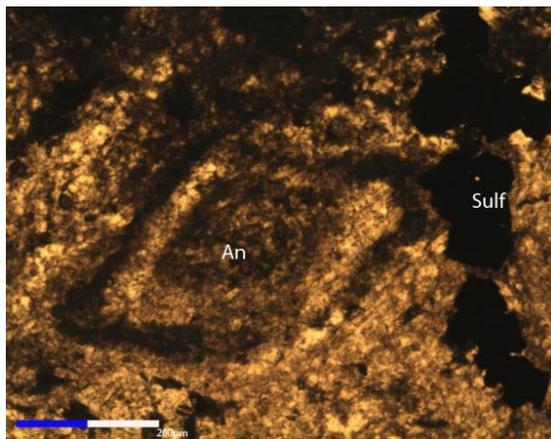


Ilustración 2.- Estructura de anfíbol (An) cloritizada y con presencia de arcillas, junto a esta se observa una vetilla de sulfuros (Sulf). PPL,

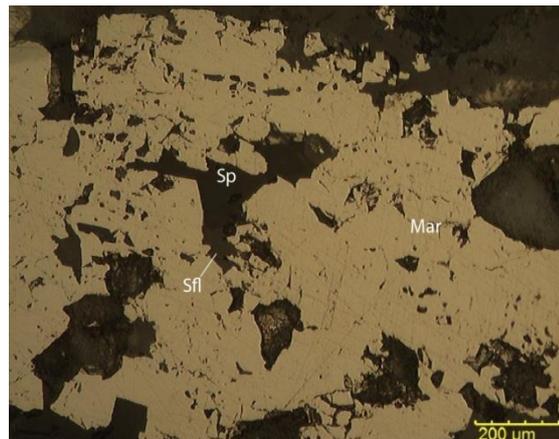


Ilustración 3.- Asociación de menas, se observa como las sulfosales (Sfl) como inclusión en el intercrecimiento de esfalerita (Sp)- marcasita

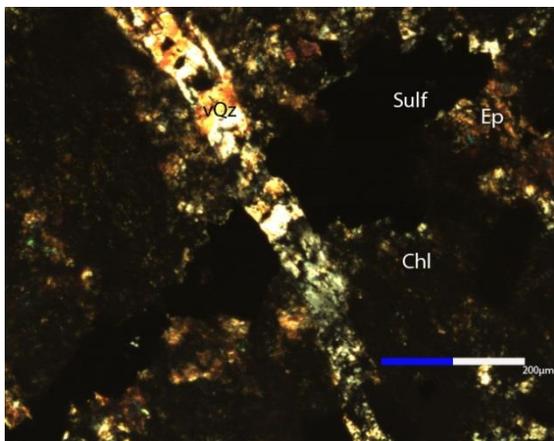


Ilustración 4.- Vetilla de cuarzo (Qz) cortando una vetilla propilítica compuesta por epidota (Ep), clorita (Chl) y sulfuros (Sulf). PPL,

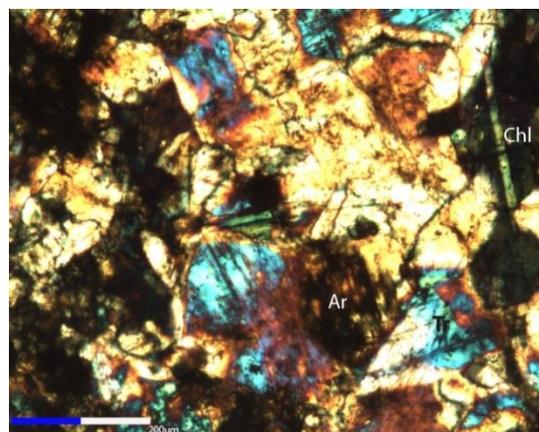


Ilustración 5.- Tremolita-actinolita (Tr) con clorita en matriz de cuarzo, esta representa la fase inicial de la alteración retrograda. PPL,

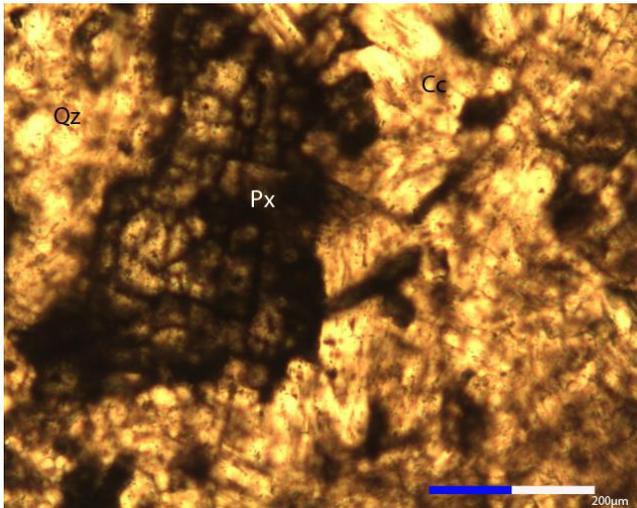


Ilustración 6.- fenocristal de piroxeno (diospsida) completamente cloritizado ebebido por uan matriz de calcita (Cc) y cuarzo (Qz).

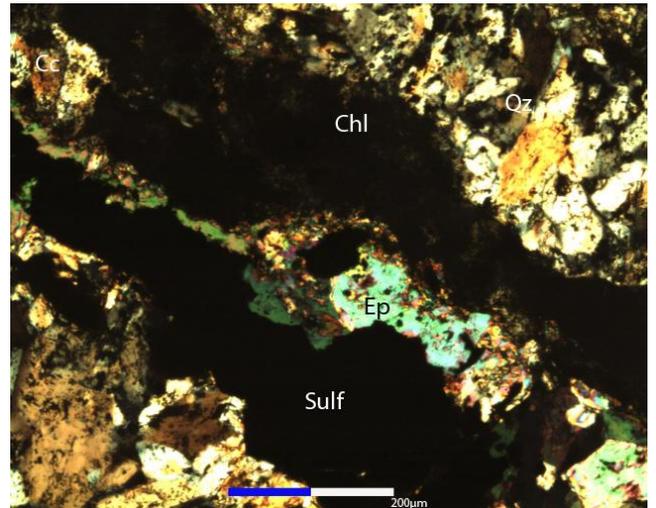


Ilustración 7.- Vetilla propilítica compuesta por clorita (Chl), epidota (Ep), calcita (Cc), cuarzo (Qz) y sulfuros (Sulf). NPL, Zoom 4x.

Se obtuvieron dos muestras del rebaje 9-842, estructura “Norte-Sur”, la muestra 9-842-M1 corresponde a las zonas de alteración que se presentan en la periferia de la zona mineralizada. Y la muestra 9-842-M3, la cual corresponde a un intrusivo mineralizado.

Clave de muestra: 9-842-M1 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.

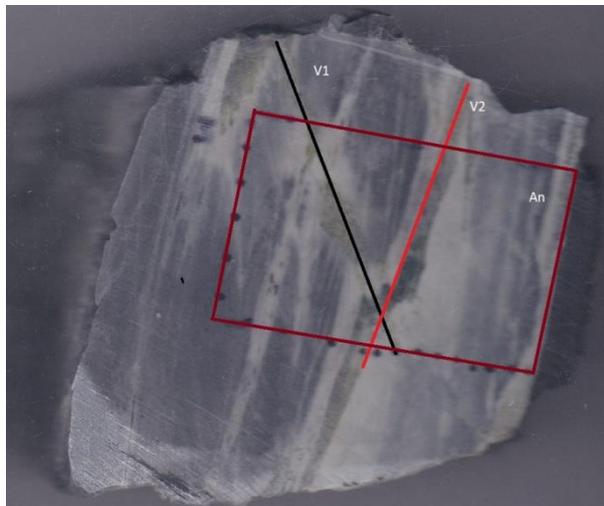


Ilustración 10. Muestra de mano, V1 y V2 representan las estructuras representativas para analizar. “An” es la zona utilizada para el análisis petrográfico/minerográfico.

Rebaje 9-842(Norte-Sur).

Justificación.- Esta muestra fue seleccionada para poder identificar la paragénesis y el comportamiento de las alteraciones en la periferia de las zonas mineralizadas.

Descripción macroscópica.- Roca de textura laminada fuertemente silicificada, con 2 vetillas rellenas de epidota, V1 y V2 como se muestra en la ilustración 1. Se observa una estructura relicta de caliza arcillosa la cual parece corresponder con la Formación Indidura. Por su bajo desarrollo cristalino se clasifica como un skarnoide.

Descripción microscópica.

Se observa una roca de textura laminada con fuerte recrystalización de carbonatos criptocristalinos hacia fases de carbonatos ferrosos, la recrystalización va siendo más notable hacia la periferia de las vetillas V1 y V2. En general se tienen carbonatos muy sucios pertenecientes a las calizas arcillosas que corresponden a la Formación Indidura.

Se observan dos asociaciones minerales de alteración una propilítica y otra subpropilítica, en esta lámina se observa que existieron dos pulsos independientes y no una evolución o coexistencia de estos. Estas paragénesis se describen a continuación:

- V1.- compuesta de epidota (55%), cuarzo (25%), calcita (10%) y sulfuros (15%). Esta corta a las estructuras V2 y se observa que esto genera un desplazamiento de esta estructura (Ilustración). Esta se asocia con una alteración tipo propilítica, con alto contenido de esfalerita y marcasita (Ilustración 4).
- V2.- compuesta de clorita (60%), cuarzo (25%), calcita (5%) y sulfuros, principalmente esfalerita (5%). Estas estructuras parecen corresponder con un evento distensivo lo que generó un segundo pulso mineralizante. Esta se asocia con un alteración de tipo subpropilítica, con presencia de pirita/marcasita (ilustración 6).

En general podemos observar a las estructuras con alteración subpropilítica siendo cortadas o traslapadas por estructuras compuestas de una alteración propilítica. Respecto a las menas, la mineralización se encuentra asociada con la fase propilítica, en las estructuras subpropilíticas no se observa o de forma muy escasa. Adicionalmente, es pertinente mencionar que se observan arcillas diseminadas por toda la muestra esto se asocia con la recristalización del protolito, el cual se presume como una caliza arcillosa de la Formación Indidura. Dentro de los sulfuros de hierro, se observa una evolución de marcasita a pirita, esto se explica por la evolución de una alteración subpropilítica a una propilítica.

Finalmente, se observa una pequeña sobreimposición de clorita en algunas estructuras con alteración propilítica probablemente asociada con una disminución de la temperatura y por lo tanto una evolución hacia una alteración subpropilítica.

Paragénesis.

Mineral	Subpropilítica	Propilítica
Aricllas	-----	
Clorita	-----	-----
Calcita		-----
Epidota		-----
Marcasita		-----
Esfalerita		-----
Pirita	-----	

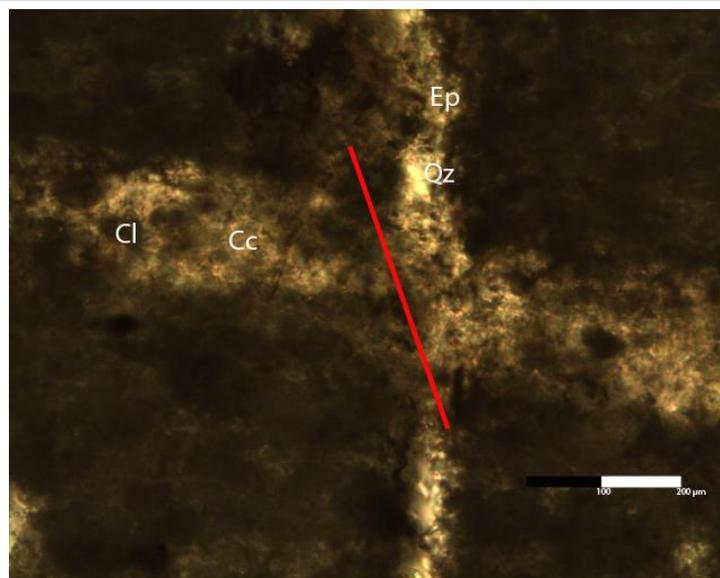


Ilustración 11. Estructura propilítica cortando a una subpropilítica, en esta también se puede observar un ligero desplazamiento generado por el corte de la estructura propilítica. Epidota (Ep), cuarzo (Qz), clorita(Cl) y Calcita(Cc). PPL, 20x.

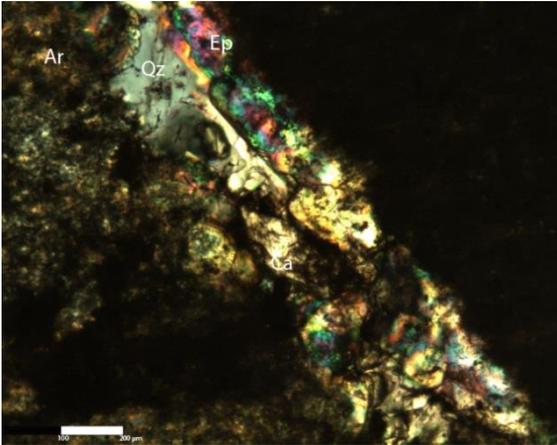


Ilustración 13.- Vetilla con epidota (Ep), cuarzo(Qz), calcita (Cc) característica de fase propilítica, NPL, 20x.

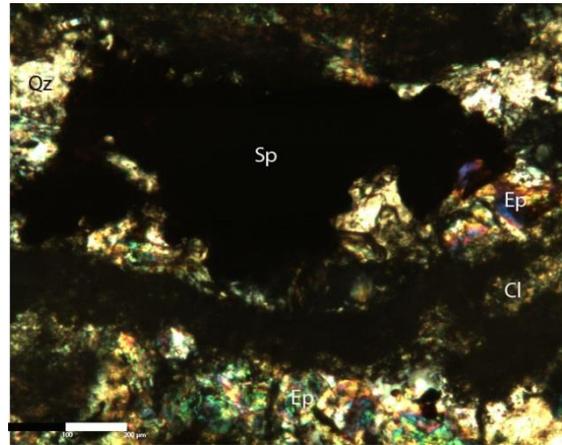


Ilustración 12.- Esfalerita en vetilla con epidota(Ep) y cuarzo (Qz). Se observa algo de clorita (Cl) sobreimpuesta en la vetilla, NPL, 20x.

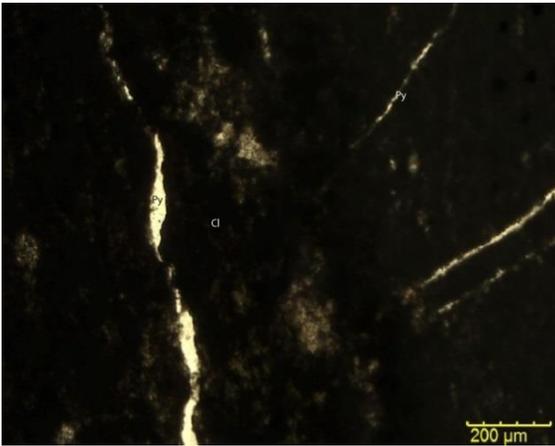


Ilustración 14.- Vetillas de pirita (py), una se encuentra paralela a la zona de cloritización y otras dos se encuentran cortando esta zona, PPL, 10x.

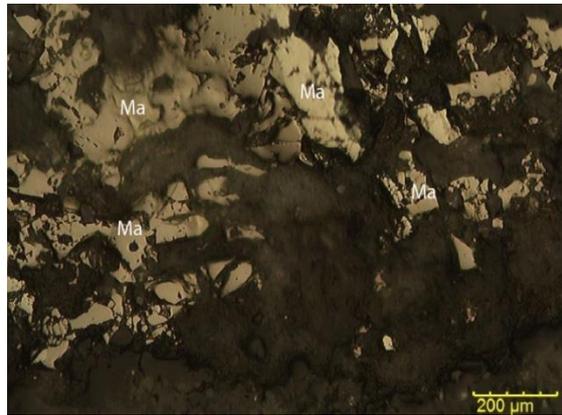


Ilustración 15.- Parche de marcasita que ha sido reemplazada parcialmente por pirita, PPL, 10x.

Numero de muestra: 15-24-M1 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.

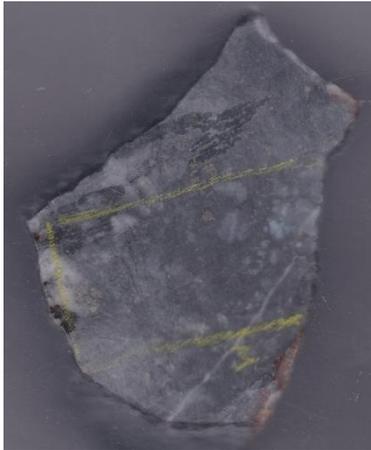


Ilustración 1.- muestra de mano clave 15-24-M1.

Justificación.- muestra del rebaje 15-24, de la estructura 15-24. Esta zona llega a presentar leyes de hasta 100 gAg/Ton, la mineralización se aloja en calizas de la Formación Indidura.

Descripción macroscópica.- Se tiene una roca caliza fuertemente recrystalizada con clastos de cuarzo. Se observan vetillas de cuarzo y la matriz parece estar silicificada parcialmente alrededor de los clastos de cuarzo y vetillas.

Descripción microscópica.

Se tiene una metacaliza con textura porfidoblástica, la cual presenta fenoblastos de cuarzo y sílice de baja cristalinidad (Ilustración 4). En algunas zonas se observa fragmentos de cuarzo cementados por sulfuros con una textura brechosa (ilustración 2), pero en general la matriz se encuentra parcialmente silicificada con presencia de micro calcita recrystalizada, esta se encuentra intercrecida con cuarzo criptocristalino. Se pueden apreciar fenoblastos de cuarzo de baja cristalinidad, los cuales pueden confundirse con clastos de cuarzo. En algunas zonas, principalmente cerca de las vetillas, se observan horizontes menores de 0.5 mm de cuarzo de baja cristalinidad.

Las fases metálicas son marcasita/pirita, esfalerita, calcopirita y sulfosales. Estas se encuentran diseminadas en la matriz, aunque en algunas ocasiones pueden presentarse en forma parches los cuales están compuestos de cuarzo de baja cristalinidad intercrecido con los sulfuros. Las sulfosales, probablemente tetrahedrita, se presentan embebidas por la esfalerita e intercrecidas con la calcopirita exsuelta por esta (ilustración 3).

En general, la muestra consta de cuarzo de baja cristalinidad (cuarzos “calcedónicos”). Esto nos habla de una silicificación a bajas temperaturas (<200°C). Finalmente, hay que resaltar que la mineralización se encuentra próxima a estas vetillas/zonas de sílice de baja cristalinidad y zonas de cuarzo brechado, esta se presenta como clastos aglomerados en las estructuras y no como intercrecimientos cristalinos. En las zonas de cuarzo brechado, se observa a las menas metálicas como cementante de estas (ilustración 2). Finalmente, las zonas de cuarzo de baja cristalinidad, incluyendo las vetillas, se observa a los sulfuros de hierro como cristales embebidos por la sílice de baja cristalinidad. Por esta razón, se puede pensar en dos pulsos mineralizantes independientes, separados temporalmente y de diferente temperatura.

Paragénesis.

Mineral	Subpropilítica	Evento 2
Marcasita	-----	
Pirita		-----
Cuarzo baja cristalinidad		-----
Esfalerita	-----	
Calcopirita	-----	
Sulfosal (Tetrahedrita)	-----	

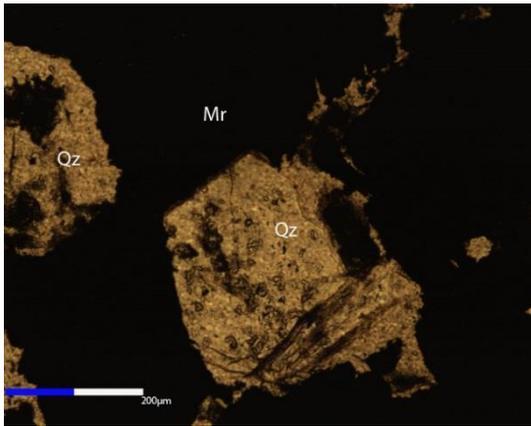


Ilustración 2.- Clastos de cuarzo (Qz) cementados por marcasita (Mr), esta marcasita pertenece al primer pulso mineralizante. PPL, zoom 4x.

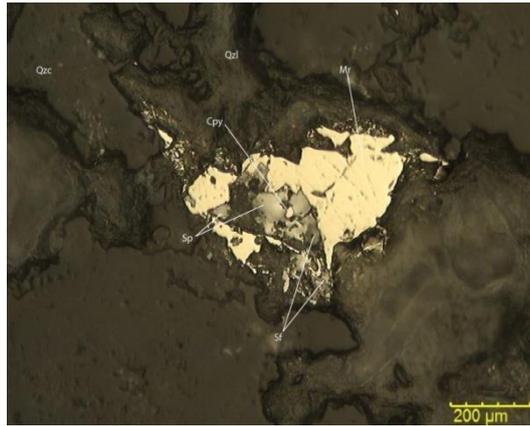


Ilustración 3.- Marcasita intercrecida con esfalerita, calcopirita y sulfosal (tetrahedrita). Esta asociación es muy característica del pulso mineralizante de las vetillas de cuarzo de baja cristalinidad. PPL, zoom 20x.

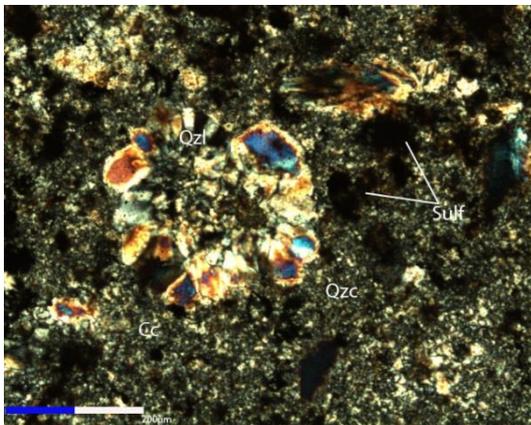


Ilustración 4.- Cuarzo de baja cristalinidad (Qzl) en una matriz de cuarzo criptocristalino (Qzc) y calcita recristalizada (Cc). Se observa una serie de sulfuros (Sulf) aglutinados en la matriz como parte de una vetilla. PPL, zoom 4x.

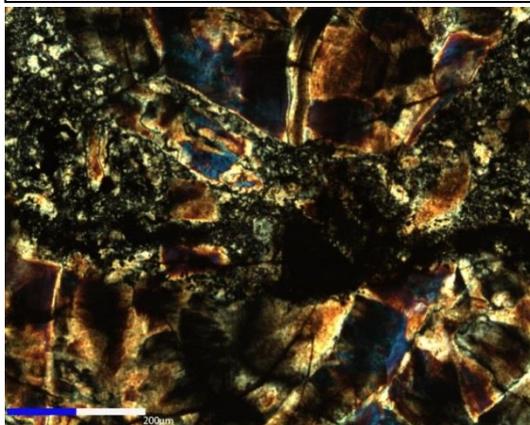


Ilustración 2.- Cuarzo calcedónico, muy característico de las vetillas de sílice asociadas con las menas metálicas. PPL, 20x.

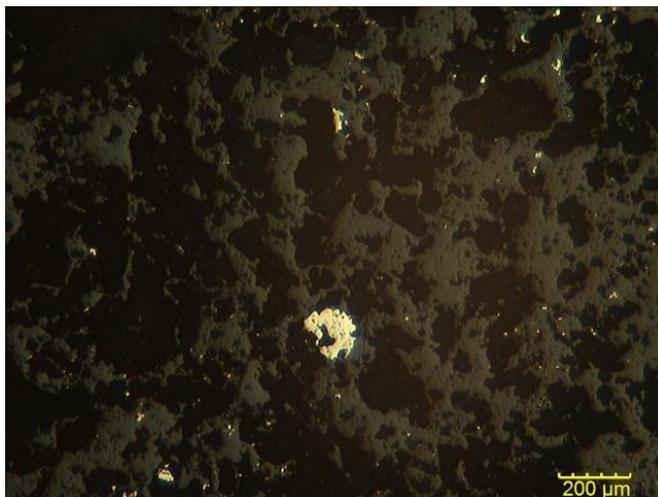


Ilustración 2.- piritas diseminada por toda la muestra. PPL, zoom 2.5

x

Numero de muestra: 6-460-M2 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.

Justificación.- intrusivo relacionado con la mineralización del rebaje 6-460. Por las estructuras que presenta podría ser pre/postmineralización, además en la zonas donde se obtuvo la muestra se obtuvieron leyes de hasta 150 gr [Ag]/Ton.

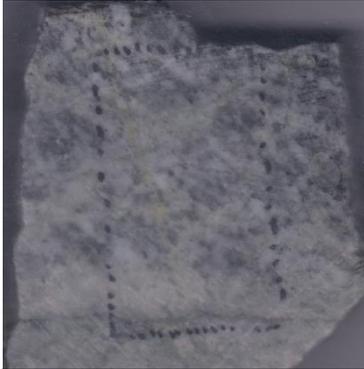


Ilustración 1.- Muestra de mano clave 6-460-M2.

Descripción macroscópica.- se tiene una roca de textura porfirítica, con un fuerte vetilleo el cual se encuentra relleno de sulfuros. En general la roca se encuentra fuertemente silicificada y presenta, en menor medida, vetilleo de cuarzo.

Descripción microscópica.

Se observa una roca de textura porfirítica con fenocristales de tremolita-actinolita parcialmente cloritizados, plagioclasas totalmente reemplazadas por arcillas o epidotizados. Con una matriz silicificada en más de un 80 %, con remanentes de feldespato potásico y cuarzo primario. La muestra presenta múltiples vetillas compuestas por clorita (30%), cuarzo (40%), calcita (5%) y sulfuros (25%), estas se caracterizan por tener hacia las orillas cuarzo, calcita y clorita (ilustración 3). Hacia el centro se observa la presencia de sulfuros y epidota con una segunda generación de cuarzo. Esto indica la evolución de una alteración del tipo subpropilítica a una de mayor temperatura del tipo propilítica.

Las menas en esta muestra son representadas por esfalerita, calcopirita, sulfosales y galena argentífera, las cuales, por su posición en las vetillas parecen estar asociados con la fase final de la alteración subpropilítica y el comienzo de la propilítica. Esto indica la superposición de la fase propilítica a la subpropilítica y su coexistencia temporal. Además, se tiene en la esfalerita la llamada “enfermedad de la calcopirita” lo cual indica una evolución composicional del fluido mineralizante, con esto se puede ligar la mineralización de las menas con la evolución entre las alteraciones.

Finalmente, es importante mencionar la presencia de esfalerita y calcopirita diseminadas por toda la matriz y algunas veces reemplazando/rellenado algunos minerales como anfíboles (ilustración 2). En esta muestra es posible observar la fase progradada, la cual está representada por los anfíboles como la tremolita-actinolita. Adicionalmente, se tiene la presencia de arcillas en la periferia de las vetillas y diseminadas la matriz.

Paragénesis.

Minerales	Subpropilítica	Propilítica	Silicificación
Clorita	-----		
Epidota		-----	
Calcita		-----	
Cuarzo	-----	-----	-----
Arcilla	-----		-----
Esfalerita		-----	

Sulfosal	-----
Galena	-----
Calcopirita	-----

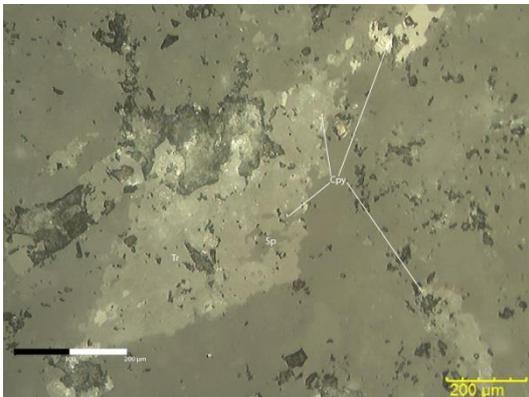


Ilustración 2. Tremolita-actinolita (Tr) siendo reemplazada/rellenada por esfalerita (Sp), además se tiene calcopirita (Cpy) diseminada por toda la muestra. PPL, 4x.

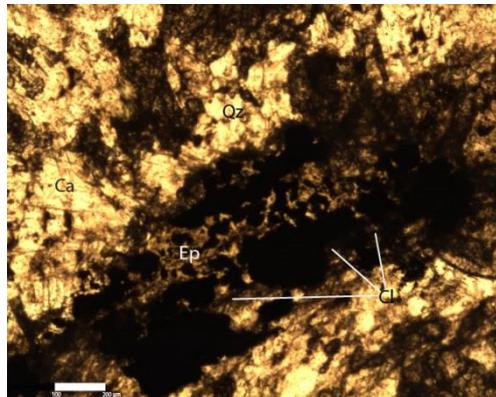


Ilustración3.- vetilla compuesta a las orillas por cuarzo (Qz) y Calcita (Ca), al centro con los sulfuros más gruesos clorita y en la zona con los sulfuros

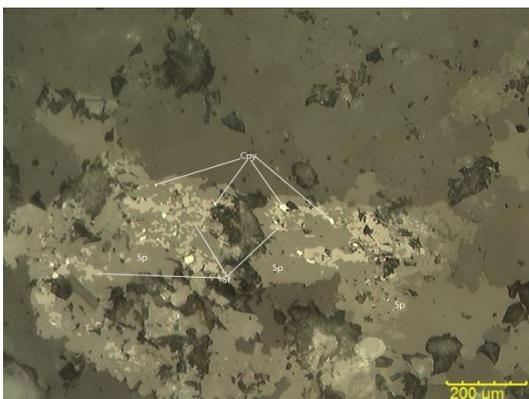


Ilustración 4.- Esfalerita (Sp) exsolviendo calcopirita (Cpy) con sulfosales (Sf) vermiculares. Estos sulfuros se encuentran en la vetilla de la ilustración 3. PPL, 20x.

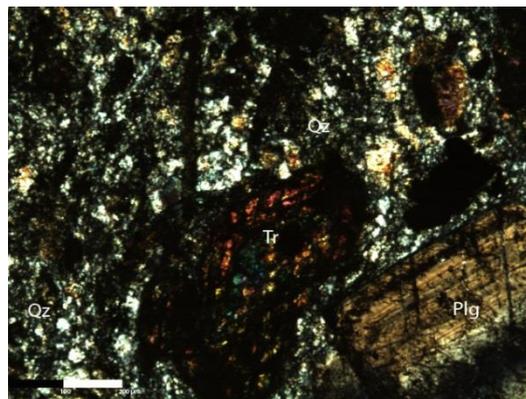


Ilustración 5.- Matriz de cuarzo (Qz) con fenocristales de Tremolita-actinolita (Tr) completamente cloritizados y plagioclasa parcialmente reemplazada por arcillas.

Numero de muestra: 8-857-IF3 y M1 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.

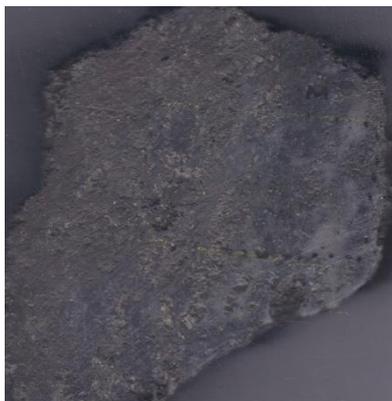


Ilustración 1.- muestra de mano clave 8-857-IF-3 y 8-857-M1, el área punteada color negro representa la zona para analizar.

Justificación.- muestra extraída del rebaje 8-857, que pertenece a la estructura conocida como Norte/Sur. Esta zona llega a presentar leyes de hasta 120 gr [Ag]/Ton, este tipo de roca representa el principal tipo de mineralización que se explota de esta estructura mineralizada.

Descripción macroscópica.- roca caliza con fuerte recristalización la cual enmascara sus componentes para definirla con base en estos. Se presentan zonas parcialmente reemplazadas, con estructura de tipo manto mineralizado, por sulfuros como pirita, galena y esfalerita. Adicionalmente, se presentan parches (aglomeraciones) de esfaleritas intercrecidas con calcitas de grano grueso.

Descripción microscópica.

Se presenta una roca con estructura relictiva de tipo caliza con moderado grado de recristalización de grano fino a medio, se presentan zonas parcialmente reemplazadas por aglomeraciones (ilustración 3) de galena (30%), esfalerita (20%) y pirrotina (50%), con granulometrías que oscilan entre [100 - 500 μm]. Estas aglomeraciones (ilustración 4) presentan inclusiones de tenantita intercrecidas con marcasita y galena de segunda generación, con granulometrías de [50-200 μm], algunas veces estas se presentan como aglomeraciones aisladas en las zonas de calcita recristalizada de grano medio. Algunas zonas con fuerte recristalización presentan moderado desarrollo de cloritas sin intercrecimiento con sulfuros, sin embargo, estos últimos se llegan a observar en la periferia con una granulometría fina [10-50 μm]. Adicionalmente, se observa un equilibrio de facies minerales entre los sulfuros de hierro marcasita/pirrotina/pirita, en este la pirita y marcasita son las únicas que muestran relación con las sulfosales de plata. El equilibrio anteriormente no se observa claramente debido a la presencia aislada de cristales de marcasita sin alteración.

En el contexto de las inclusiones fluidas se reconocieron dos familias, las cuales se diferencian por el grado de cristalización de la fase mineral en la que se alojan y el tamaño de estas. La primera familia se aloja en calcita de baja cristalinidad (ilustración 2 y 7) y tiene un relleno de 70% L+V con dimensiones que oscilan de [15 - 50 μm], la segunda familia (ilustración 5) se aloja en calcita eudral y presenta un relleno de 90% L+V con dimensiones que oscilan de [20 - 100 μm].

Paragénesis.

Mineral	Retrograda	Retrograda subpropilítica
Cuarzo	-----	
Esfalerita		-----
Tenantita		-----
Pirita-arsenopirita		-----
Marcasita	-----	
Pirrotina	-----	
Calcita	-----	

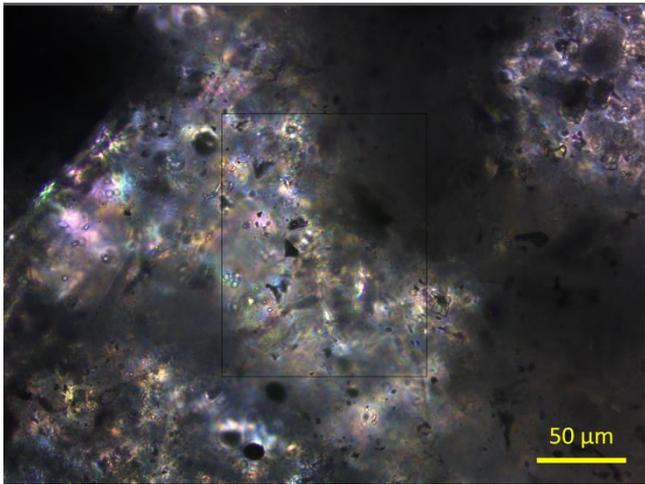


Ilustración 2.- familia 1 de inclusiones en calcita de baja cristalinidad, PPL 20x

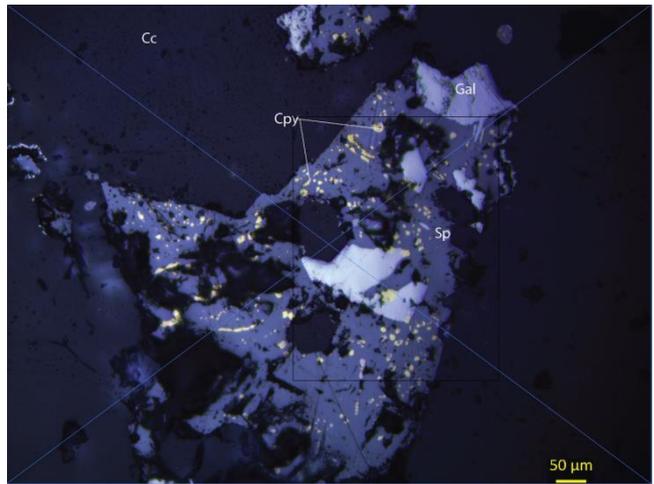


Ilustración 3.- Intercrecimiento cristalino de esfalerita (Sp) y galena (Gal), se presenta probable tenanita incluida en la esfalerita, esta última presenta la enfermedad de la calcopirita. PPL, 20x .



Ilustración 4.- Intercrecimiento cristalino de esfalerita (Sp) , galena (Gal) y Marcasita/pirrotina (Mar), se observa desarrollo de la enfermedad de la calcopirita en la esfalerita. PPL, 20x.

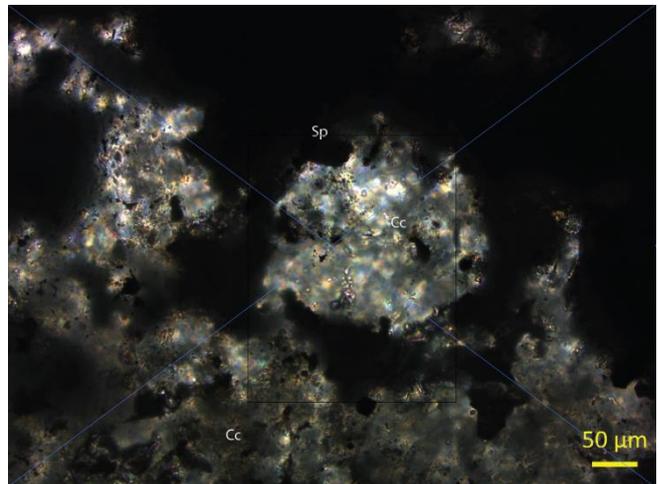


Ilustración 5.- familia 2 de inclusiones, esta se presenta en zonas proximales aglomeraciones de sulfuros. PPL, 20x .

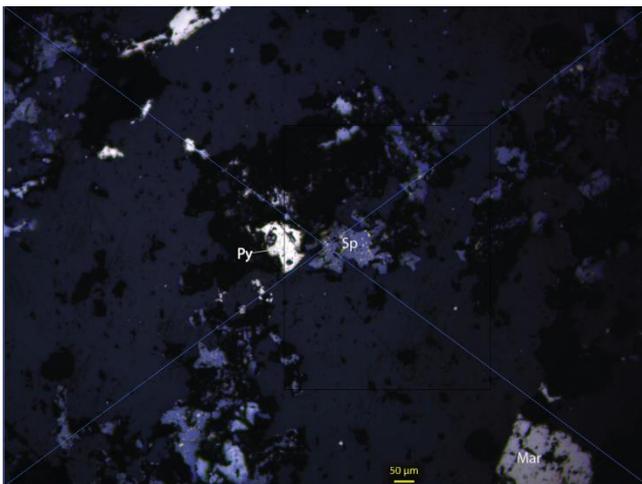


Ilustración 6.- Intercrecimiento cristalino de esfalerita con pirita, la esfalerita presenta ligero desarrollo de la enfermedad de la calcopirita. En la esquina inferior izquierda se observa un cristal aislado de marcasita. PPL, 20x .

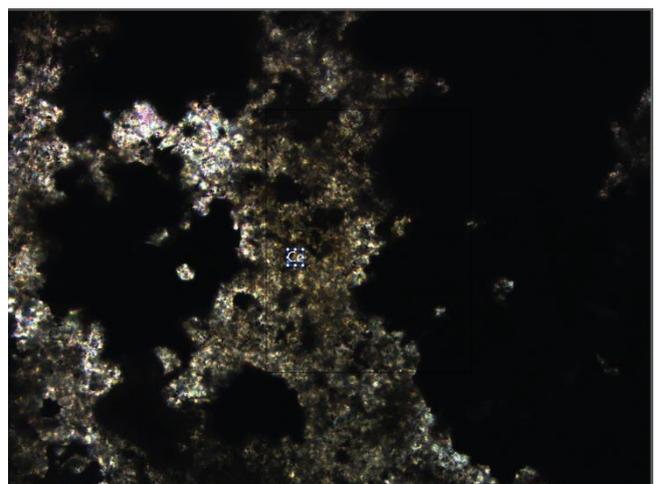


Ilustración 7.- Zona de reemplazamiento, se presenta una matriz con calcita de baja cristalinidad. PPL, 5x.

Numero de muestra: 8-857-IF1 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.

Justificación.- muestra extraída del rebaje 8-857, que pertenece a la estructura conocida como Norte/Sur. Esta zona llega a presentar leyes de hasta 120 gr [Ag]/Ton, este tipo de roca representa el principal tipo de mineralización que se explota de esta estructura mineralizada.



Ilustración 1.- muestra de mano clave 8-857-IF-1, el área punteada color negro representa la zona para analizar.

Descripción macroscópica.- roca caliza con fuerte recrystalización la cual enmascara sus componentes para definirla con base en estos. Se presentan zonas parcialmente reemplazadas, con estructura de tipo manto mineralizado, por sulfuros como pirita, galena y esfalerita. Adicionalmente, se presentan parches (aglomeraciones) de esfaleritas intercrecidas con calcitas de grano grueso.

Descripción microscópica.

Se presenta una roca con estructura relicta de tipo caliza con moderado grado de recrystalización de grano fino a medio, se presentan zonas parcialmente reemplazadas por aglomeraciones (Ilustración 4) de galena (30%), esfalerita (20%) y pirrotina (50%), con granulometrías que oscilan entre [100 - 500 μm]. Estas aglomeraciones presentan inclusiones (Ilustración 7) de tenantita intercrecidas con marcasita y galena de segunda generación, con granulometrías de [50-200 μm], algunas veces estas se presentan como aglomeraciones aisladas en las zonas de calcita recrystalizada de grano medio. Algunas zonas con fuerte recrystalización presentan moderado desarrollo de cloritas sin intercrecimiento con sulfuros, sin embargo, estos últimos se llegan a observar en la periferia con una granulometría fina [10-50 μm]. Adicionalmente, se presenta un equilibrio (ilustración 8 y 9) de facie

minerales entre los sulfuros de hierro marcasita/pirrotina/pirita, en este la pirita y marcasita son las únicas que muestran relación con las sulfosales de plata.

En el contexto de las inclusiones fluidas se reconocieron dos familias, las cuales se diferencian por la fase mineral en la que se alojan y el tamaño de estas. La primera familia (Ilustración 2 y 3) se aloja en calcita y tiene un relleno de 80% L+V con dimensiones que oscilan de [15 - 50 μm], la segunda familia (ilustración 5 y 7) se aloja en calcitas y presenta un relleno de 90% L+V con dimensiones que oscilan de [20 - 100 μm].

Paragénesis.

Mineral	Etapas 1	Etapas 2
Cuarzo	-----	
Esfalerita	-----	
Tenantita	-----	
Pirita-arsenopirita	-----	
Marcasita	-----	
Pirrotina	-----	
Calcita	-----	

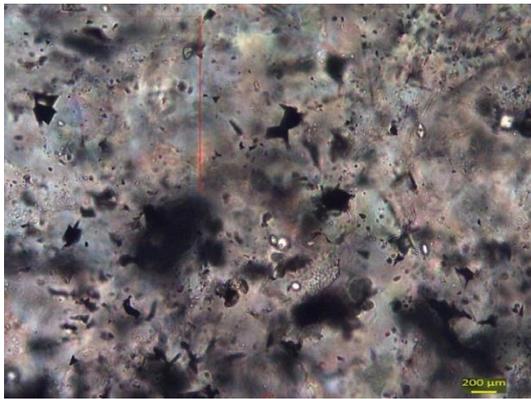


Ilustración 2.-familia 1 de inclusiones en calcita, con marcasitas y esfaleritas finas incluidas en esta. NPL, 20x

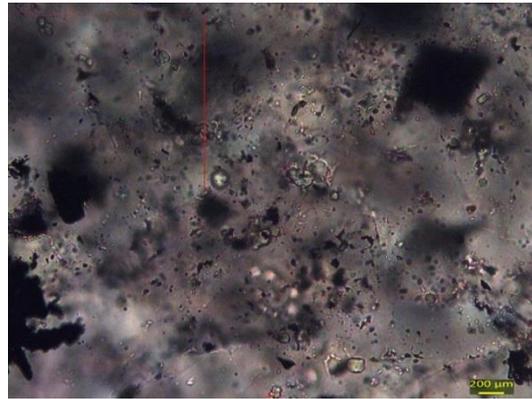


Ilustración 3.-familia 1 de inclusiones en calcita, con marcasitas y esfaleritas finas incluidas en esta. NPL, 20x



Ilustración 4.-aglomeración de primera generación cristalina de pirrotina (Pirr), esfalerita (Sp) y galena (Gal). reemplazando calcita. NPL. 20x



Ilustración 5.-familia 2 de inclusiones en cuarzo , PPL, 20x

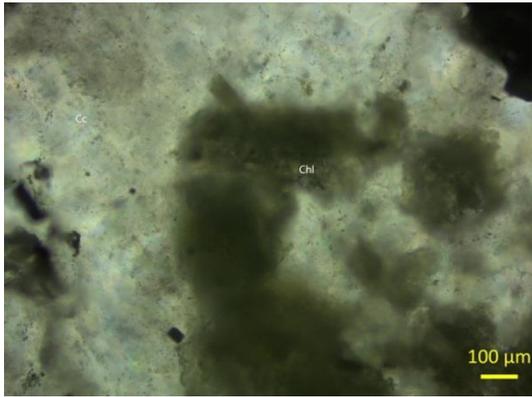


Ilustración 6.-Cloritas intercrecidas con calcita, se presentan piratas en la periferia de la clorita, PPL, 10x



Ilustración 7.- intercrecimiento cristalino entre galena (Gal), esfalerita (Sp) y marcasita(Mar), típica aglomeración de segunda generación. NPL, 20x

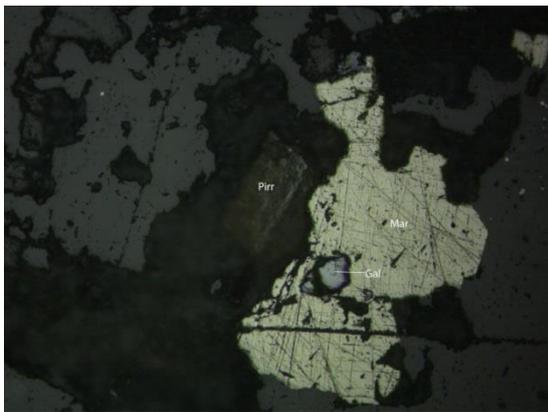


Ilustración 8.-Galena(Gal) de segunda generación incluida en marcasita(Mar.). PPL , 10x.

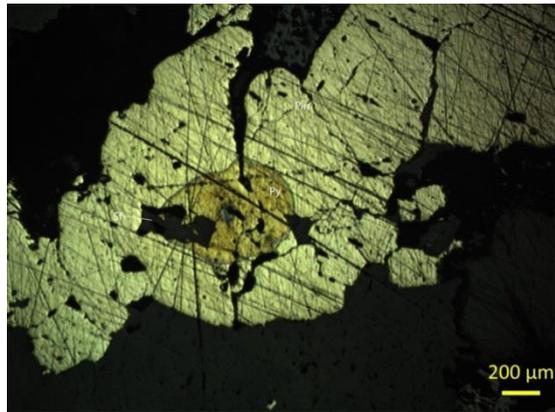


Ilustración 9.-Pirita reemplazando marcasita,.. NPL, 20x

Clave de muestra: 12-460-IF1 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.

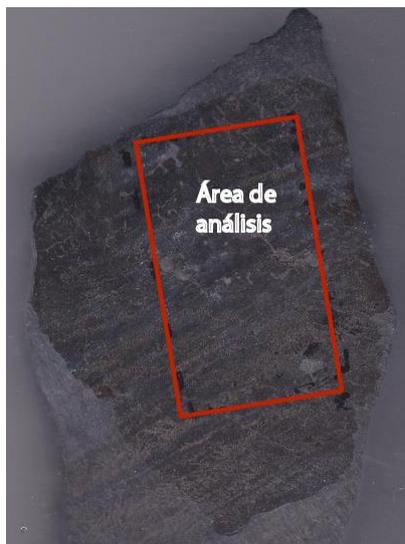


Ilustración 16.-Muestra de mano 12-460-IF1, el cuadro rojo representa el área para analizar .

Justificación.- muestra extraída del rebaje 12-460, que pertenece a la estructura conocida como 460. Esta zona llega a presentar leyes de hasta 130 gAg/Ton, este tipo de roca representa el principal tipo de manto mineralizado que se explota de este cuerpo.

Descripción macroscópica.- Se presenta un manto mineralizado compuesto por bandeamiento de sulfuros, similar a una laminación. En esta muestra se observan tres tipos de bandas. Estas están compuestas por (1) esfalerita/pirrotina, (2) galena/pirrotina/esfalerita y (3) calcita anaedral. Con base en lo anterior se infiere la presencia de al menos dos pulsos mineralizantes.

Descripción microscópica.

Se observa una roca, tipo manto, de textura laminada, esta laminación está compuesta principalmente por esfalerita, pirrotina/marcasita, calcopirita, calcita, galena y sulfosales de plata. Todas las anteriores se presentan en diferentes proporciones, en algunos casos se llega a presentar ciertos procesos de reequilibrio entre las fases minerales. Con base en lo anterior se describen 2 tipos de láminas, las cuales se describen a continuación:

- Lámina 1 (Ilustración 2 y 4).- compuesta por pirrotina/pirita (80%), esfalerita 1/calcopirita (5%), galena (3%), pirita (5%), calcita (7%) y sulfosales (1%<). La pirrotina se presenta como el aglutinante subedral envolviendo a todas las demás fases minerales, en algunas zonas se observa intercrecido con calcitas las cuales se analizaran con micortermometría. En algunas zonas la pirrotina comienza a ser reemplazada parcialmente por marcasita. Galena, pirita, esfalerita y sulfosales se encuentran incluidas anaedrales en la pirrotina con granulometrías que oscilan entre [10 a 60 μm], todas estas parecen contemporáneas ya que se encuentran intercrecidas entre si y relleno de oquedades en la pirrotina. En esta banda la calcita se presenta intercrecida con las diferentes fases minerales, pero se distinguen dos fases una de mayor granulometría [.5-1 mm] intercrecida con la pirrotina y una secundaria de menor granulometría [10- 80 μm] la cual se encuentra incluida en la pirrotina. Las sulfosales se presentan puntualmente incluidas en la pirrotina e intercrecidas con esfaleritas. En esta la esfalerita presenta la enfermedad de la calcopirita, con una asociación a las pirritas. Adicionalmente, se pueden observar cristales de calcopiritas(1%<) euedrales diseminados en toda la zona.
- Banda 2 (ilustración 3).- compuesta por pirrotina/marcasita (60%), esfalerita 2 (5%), galena (30%) y calcita (5%). La pirrotina se presenta como aglutinante subedral envolviendo a todas las demás fases minerales, en algunas zonas se observa intercedido con calcitas las cuales de analizaran con microtermometría. Galena, esfalerita y calcita se presentan incluidas en la pirrotina, la galena se presenta como cristales anaedrales de granulometría que oscila entre [10 – 200 μm], esfalerita y calcita se presentan como cristales anaedrales de granulometría que oscilan entre [10 -50 μm].

Con base en lo anterior se puede inferir que nos encontramos con una fase retrograda de una facie distal del skarn, en el cual se tiene un pulso mineralizante que evoluciona hacia un fluido enriquecido en cobre lo cual genera una segunda generación de esfalerita con calcopirita. A lo largo de la mineralización, el plomo, zinc y hierro permanecen constante hasta que el fluido comienza precipitar calcopirita con sulfosales de plata, en este proceso se observa un cambio de la temperatura mediante la evolución de los sulfuros de hierro marcasita/pirita/pirrotina. La precipitación de sulfosales de plata parece estar ligado a la parte final de menor temperatura asociado con pirita y esfaleritas gris oscuro.

En esta lámina solo se observaron inclusiones fluidas con las características necesarias para el estudio microtermométrico en las calcitas. Estas serán analizadas según la asociación que tengan con la banda en la que se encuentren, con base en esto se encontraron 2 familias de inclusiones (Ilustraciones 5 y 6).

Paragénesis

Mineral	Etapa 1	Etapa 2
Esfalerita	-----	-----
Galena	-----	----
Marcasita	-----	
Pirrotina		-----
Sulfosal		---
Calcopirita		----
Pirita	----	----
Calcita	-----	-----

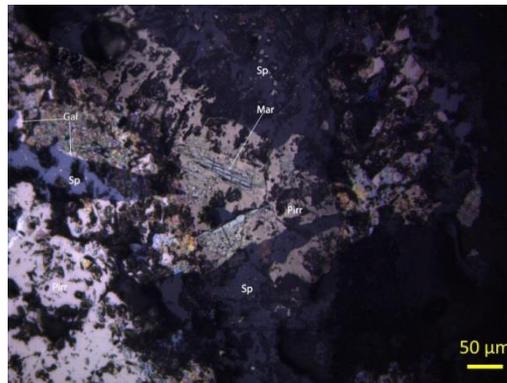


Ilustración 2.- Pirrotina (Pirr) siendo reemplazada por marcasita (mar), esfalerita 1(Sp) con la enfermedad de la calcopirita y galenas (Gal) intercrecidas con esta. Zoom 5x . PPL

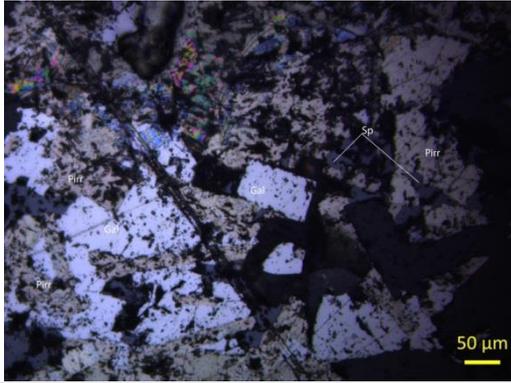


Ilustración 3.- Galenas(Gal) incluidas en pirrotina (Pirr), se presenta esfalerita 2 (Sp) incluidas en la pirrotina. Zoom 10x, PPL.

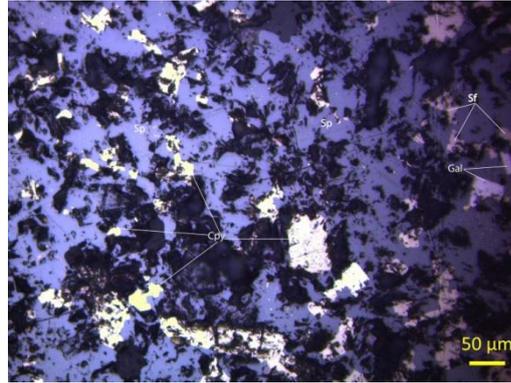


Ilustración 4.- Esfalerita 1(Sp) con la enfermedad de la calcopirita (Cpy), se presenta calcopirita de segunda generación diseminados en esta. Adicionalmente, se presenta cristales de sulfosales (tennatita, Sf) y galenas

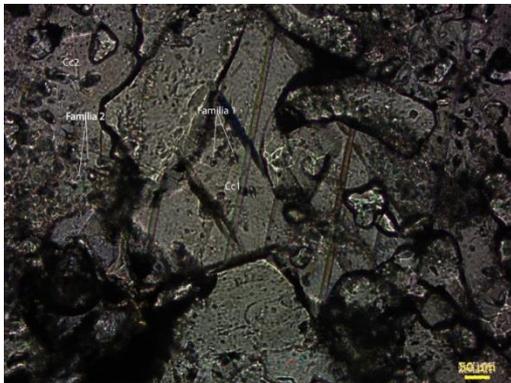


Ilustración 5.- Se observan dos familias de inclusiones, la familia 1 se presenta en la calcita más eudral, presenta relleno L+V de 80% y tamaño de 20 µm. La familia 2 se presenta en calcita sucia anaedral , presenta relleno L+V y tamaños 15µm.

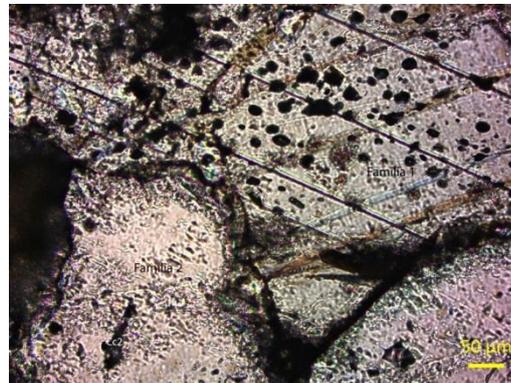


Ilustración 6.- Se observan dos familias de inclusiones, la familia 1 se presenta en la calcita más eudral, presenta relleno L+V de 80% y tamaño de 20 µm. La familia 2 se presenta en calcita sucia anaedral , presenta relleno L+V y tamaños 15µm.

Numero de muestra: 11-894-IF-1 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.



Justificación.- muestra extraída del rebaje 11-894-IF-1, que pertenece a la estructura conocida como Norte/Sur. Esta zona llega a presentar leyes de hasta 100 gAg/Ton, este tipo de roca representa el principal tipo de manto mineralizado que se explota de este cuerpo mineralizado.

Descripción macroscópica.- Se tiene roca compuesta por relictos con alteración color verde, probablemente asociado con una alteración tipo propilítica, y manto mineralizado compuesto por bandeamineto de sulfuros. Las bandas están compuestas por esfalerita, galena y pirita, estas se muestran constantes y sin variación mineralógica. Los relictos de la roca parecen estar asociados con las calizas arcillosas de la Formación Indidura.

Ilustración 1.- muestra de mano clave 11-894-IF-1, el área del cuadro color negro representa la zona para analizar.

Descripción microscópica.

Se presenta roca compuesta por el relictos de una roca que fue completamente alterada a tremolita actinolita con clorita (ilustración 2), asociada con una alteración del tipo subpropilítica. Debido a que la alteración es muy pervasiva no se puede determinar el protolito, pero con base en la asociación mineralógica se infiere como una caliza arcillosa de la Formación Indidura afectada durante la etapa retrograda.

En esta muestra se observa una abundante presencia de calcita microcristalina, con apariencia terrosa. Esta calcita en las zonas próximas a las bandas de sulfuros se vuelve más cristalina llegando a granulometrías de hasta 1 mm.

La zona de bandas mineralizadas están compuestas por marcasita/pirita (40%), galena (40%), esfalerita (15%), calcopirita (3%) y sulfosales (2%), probable tetraedrita. En estas se observan dos generaciones de galena, una euedral con granulometrías que van de .5 – 2 mm la cual se encuentra intercrecida con esfalerita y marcasita (ilustración 3). El segundo tipo de galena se dispone como relleno de cavidades en la esfalerita y marcasita, con una geometría anaedral y granulometrías menores a .3 mm, esta se encuentra intercrecida con cristales de tetraedrita con granulometrías similares (ilustración 4). Por la disposición, características y asociación mineralógica que presenta la segunda generación de galena, se clasifica como galena argentífera.

Verificando a los sulfuros de hierro, se aprecia una primera generación de marcasita la cual es reemplazada por pirita y continúa creciendo a partir de esta, con granulometrías que van de .5 – 1.5 mm. Con base en lo anterior se puede determinar la evolución del pulso mineralizante, lo cual generó la segunda generación de galena y la precipitación de tetraedrita. Esta evolución generó que la esfalerita, la cual presenta granulometrías que van de .5 – 1 mm, exsolviere calcopirita (ilustración 5).

Paragénesis.

Mineral	Etapa 1	Etapa 2
Esfalerita	-----	
Galena	-----	-----
Marcasita	-----	
Pirita		-----
Sulfosal (tetraedrita)		-----
Calcopirita		----
Tremolita-actinolita	-----	
Clorita		-----
Calcita	-----	

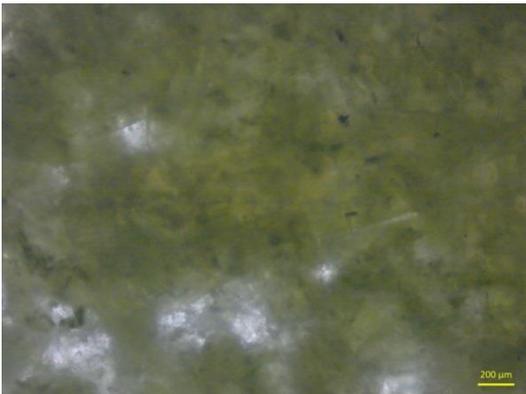


Ilustración 2.- Tremolita actinolita siendo alterada a clorita, se observan algunos cristales de calcita intercrecidos con esta. PPL, Zoom 5x.

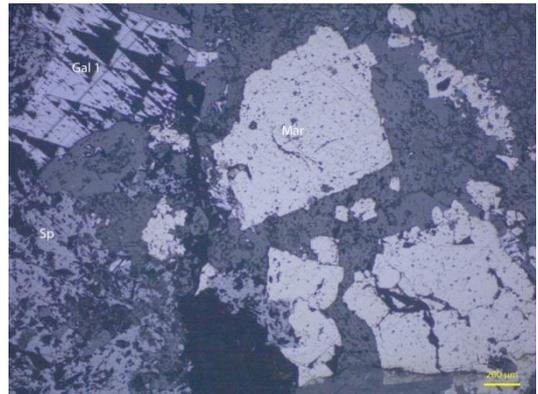


Ilustración 3.- Galena de la primera generación (Gal 1) intercrecida con esfalerita (Sp) y marcasita (Mar). PPL, Zoom 10x.



Ilustración 4.- Pirita (Py) reemplazando a marcasita y nucleando a partir de esta. Se observa galena de segunda generación (Gal 2) y tetraedrita (Sfs) relleno de cavidades en la pirita.

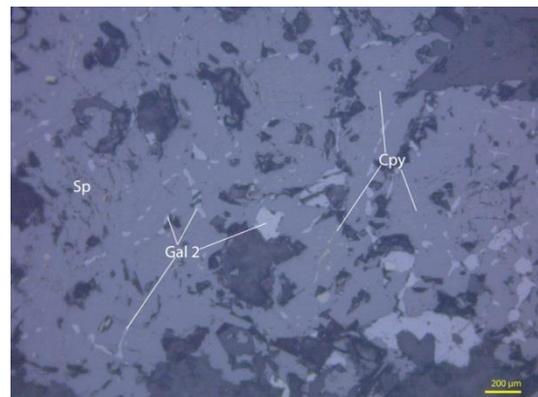


Ilustración 5.- Esfalerita (Sp) con relleno de cavidad por galena de segunda generación (Gal 2). En esta esfalerita se aprecia la exsolución de calcopirita (Cpy). PPL, Zoom 10x.

Numero de muestra: 12-460-M-2 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.



Ilustración 1.- muestra de mano clave 12-460-M-2, el área del cuadro color amarillo

Justificación.- muestra extraída del rebaje 12-460, que pertenece a la estructura conocida como 460. Esta zona llega a presentar leyes de hasta 130 gAg/Ton, este tipo de roca representa el principal tipo de manto mineralizado que se explota de este cuerpo mineralizado.

Descripción macroscópica.- Se tiene un manto mineralizado compuesto por bandeamiento de sulfuros. En esta muestra se observan dos bandas, una compuesta por esfalerita/pirrotina y otra de galena/pirrotina/esfalerita. Con base en lo anterior se infiere la presencia de al menos dos pulsos mineralizantes.

Descripción microscópica.

Se observa manto mineralizado con estructuras de bandeamiento, estas contrastan por su composición mineralógica. Se distinguen 4 tipos bandas, las cuales son:

- Banda 1.- compuesta por cuarzo (30%), esfalerita (60%) y pirita. El cuarzo y esfalerita presenta una granulometría que oscila de 0.5 – 2 mm, esta última presenta una textura de exsolución de calcopirita (1%). En esta banda se presenta un evento tardío de pirita con granulometrías de 0.1 – 0.3 mm, la cual se encuentra rellenando cavidades. Finalmente, se tiene la presencia de sulfosales, probablemente tetraedrita, con granulometrías menores a .1 mm y con una abundancia menor al 1%, esta se encuentra de manera diseminada por toda esta banda (Ilustración 4 y 8).
- Banda 2.- compuesta por cuarzo (9%), esfalerita (30%), galena (30%) y pirrotina (30), esta se encuentran intercrecidas con granulometrías que varían de 0.2 – 1.0 mm. En esta se observan granulometrías y porcentajes de abundancia muy similares (Ilustración 5).
- Banda 3.- compuesta por calcita (70%), esfalerita (29%) y calcopirita (1%). En esta se observa a la calcita intercrecida con esfalerita (ilustración 2) con granulometrías que varían de 0.1 – 1.5 mm, en esta la esfalerita presenta calcopirita en forma de exsolución .
- Banda 4.- compuesta por marcasita (60%) y pirrotina (40%), en esta se observa a la marcasita parcialmente reemplazada por pirrotina (ilustración 7) .

En esta muestra se observa a la roca encajonante, se aprecia una fuerte presencia de materia orgánica sin ninguna clase de aloquímicos. Esta presenta vetilleo de cuarzo, sin presencia de ninguna fase metálica (ilustración 6).

Paragénesis.

Mineral	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Esfalerita	-----			
Galena	-----			
Marcasita	-----			
Pirrotina	-----			
Sulfosal	---			
Calcopirita	-----			
Cuarzo	-----			
Calcita	-----			

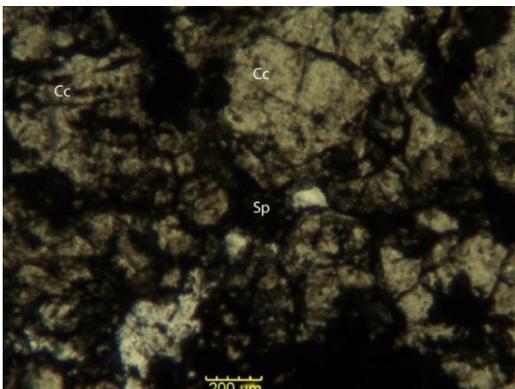


Ilustración 2.- Cristales de calcita (Cc) intercrecidos con esfalerita (Sp), muy característico de la banda 3, PPL, Zoom 4x.

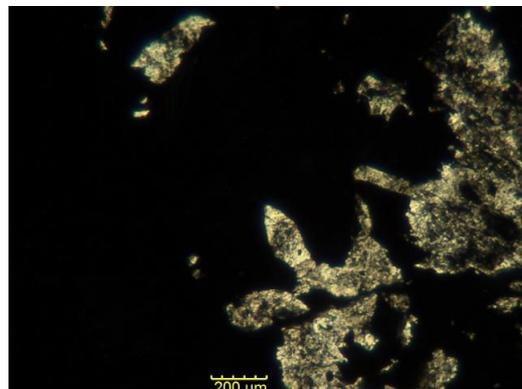


Ilustración 3.- Cristales de cuarzo intercrecidos con esfalerita, muy característico de la banda 1 de esta muestra. PPL. Zoom 4x.

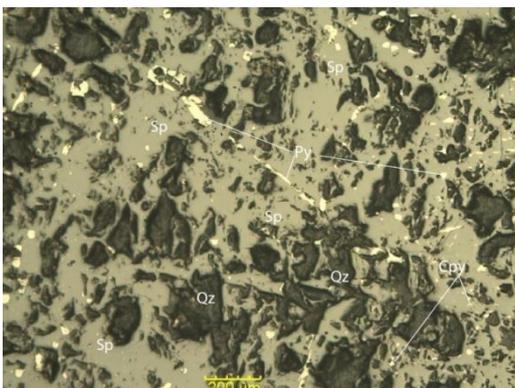


Ilustración 4.- Esfalerita (Sp) intercrecida con cuarzo (Qz), se observa calcopirita (Cpy) exsuelta en la esfalerita y algunas cristales de pirita (Py) relleno de las cavidades. PPL, Zoom 2.5x.

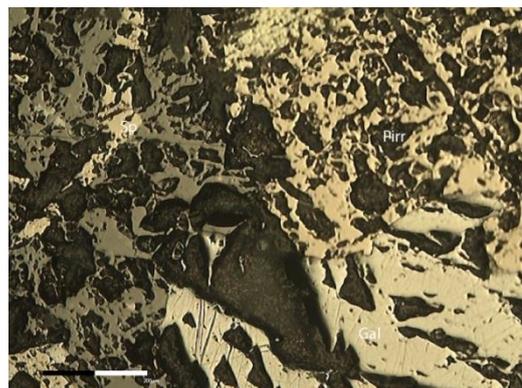


Ilustración 5.- Galena (Gal) intercrecida con esfalerita (Sp) y Pirrotina (Pirr) en proporciones muy similares. PPL, Zoom 4x.

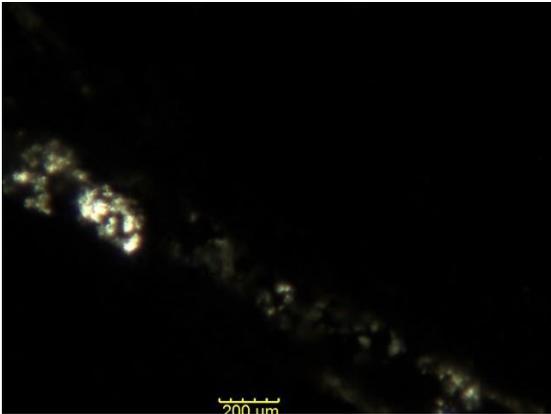


Ilustración 6.- Vetilla de cuarzo en roca encajonante. PPL, Zoom 2.5x.

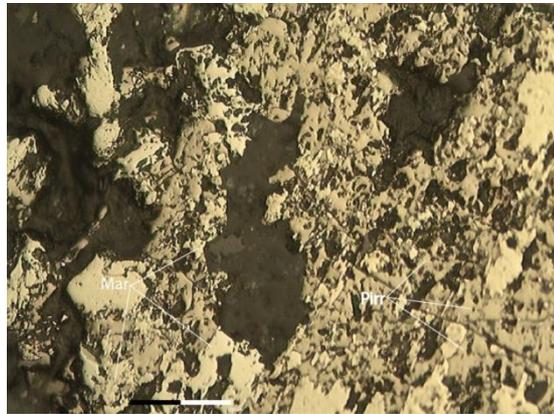


Ilustración 7.- Marcasita siendo parcialmente reemplada por pirrotina, PPL, Zoom 10x.

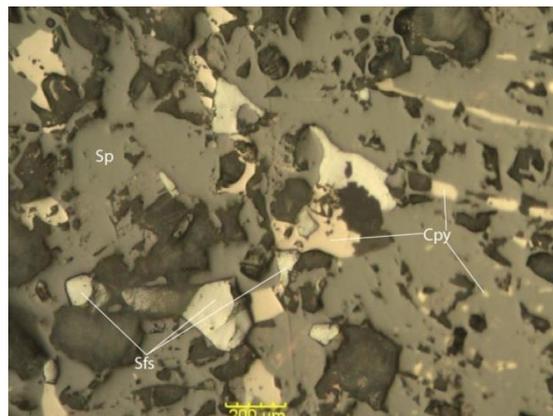


Ilustración 8.- Esfalerita (Sp) intercrecida con tetradrita (Sfs), se puede observar a la esfalerita exsolviendo calconirita (Cpy). PPL. Zoom 4x.

Numero de muestra: 5-460-M-1 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.



Ilustración 1.- muestra de mano clave 5-460-M-1, el área punteada color amarillo representa la zona para analizar.

Justificación.- muestra extraída del rebaje 5-460, que pertenece a la estructura conocida como 460. Esta zona llega a presentar leyes de hasta 120 gAg/Ton, este tipo de roca representa el principal tipo de manto mineralizado que se explota de este cuerpo mineralizado.

Descripción macroscópica.- Se tiene el contacto entre la roca encajonante y el manto mineralizado, a lo largo de este se observa una fuerte recristalización. La roca encajonante se clasifica como mudstone, con presencia de vetillas de cuarzo. El manto mineralizado está compuesto por 2 tipos de bandas, la primera con predominante presencia de pirita y la segunda con una mezcla 1:1 de pirita/esfalerita.

Descripción microscópica.

Se observa dos componentes en esta muestra la roca encajonante y el manto mineralizado. La roca encajonante tipo caliza con presencia de micro calcita (micrita) y sin presencia de aloquímicos, se clasifica como discmicrita (Folk 1962), en la cual la zona más próxima al contacto con el manto mineralizado se observa cierta recristalización. En la roca encajonante se observa la presencia de vetillas compuestas por cuarzo con calcita sin presencia de ninguna fase metálica, asociadas a un evento tardío de silicificación. En la zona del manto mineralizado se tienen bandas, las cuales están intercrecidas con carbonatos, y contrastan por la mineralogía y granulometría de las fases metálicas. Se distinguen 3 bandas, las cuales se describen a continuación:

- Banda 1: compuesta por esfalerita, marcasita/pirrotina, tetraedrita y pirita. En esta se observan dos generaciones de marcasita, una subedral de granulometría que va 0.5 - 2 mm la cual se encuentra embebiendo a esfalerita, marcasita eudral, tetraedrita y pirita. La segunda generación de marcasita se caracteriza por tener granulometrías de 0.1 - 0.5 mm y ser eudrales, estas se encuentran intercrecidas con esfalerita, pirita y tetraedrita. Ambas generaciones de marcasita se observan parcialmente reemplazadas por pirrotina. Pirita, esfalerita y tetraedrita comparten granulometrías similares, las cuales van de 0.1 – 0.3 mm.
- Banda 2: compuesta por calcopirita, esfalerita, galena, pirita y pirrotina. En esta se observa a la esfalerita y pirrotina con granulometrías de 0.5 – 2 mm, en la esfalerita se puede apreciar una textura de exsolución de calcopirita. La pirita y galena se encuentran intercrecidas con granulometrías que van de los 0.1 – 0.3 mm, por lo general estas dos se encuentran de forma independiente a la pirrotina.
- Banda 3: Compuesta completamente por pirrotina con granulometrías que oscilan de 0.5 – 2.5 mm. Es importante mencionar que en algunas zonas se llegan a observar cristales de pirita diseminados con granulometrías menores a 0.2 mm. En esta banda no se observa el

reemplazamiento de marcasita/pirita por pirrotina, esta cristalizó directamente y no hubo reequilibrio de fases metálicas.

Por lo que se observa en las bandas hubo al menos dos pulsos mineralizantes, uno rico en metales base que conforme perdió temperatura evolucionó generando el depósito de sulfosales de plata y uno posterior de alta temperatura que generó el reemplazamiento de sulfuros de hierro de menor temperatura por otros de mayor (marcasita/pirita por pirrotina).

Paragénesis.

Mineral	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Marcasita	-----		
Pirrotina		-----	
Pirita			-----
Galena	-----		
Tetraedrita	----		
Esfalerita		-----	

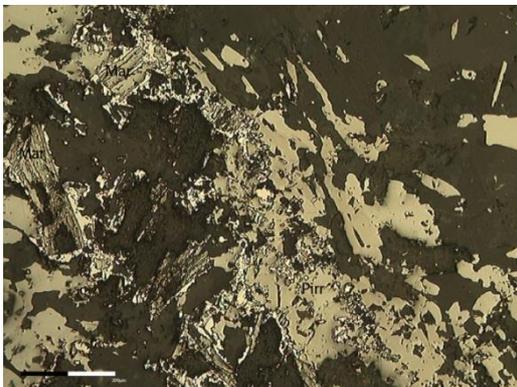


Ilustración 2.- Marcasita (Mar) siendo reemplazada parcialmente por pirrotina (Pirr), muy característico de la banda 1 de la muestra 5-460-M-1. PPL, Zoom 4x.

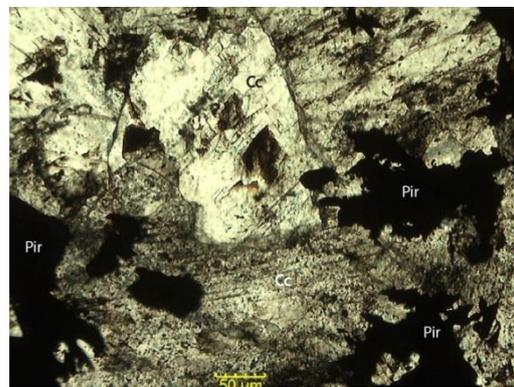


Ilustración 3.- roca encajonante recristalizada con pirrotina, hacia la parte inferior de la imagen se observa una calcita más fina, mientras que en la parte superior se observan cristales bien formados de calcita.



Ilustración 4.- Pirrotina (Pirr) reemplazando marcasita (Mar), se observan cristales de tetraedrita (Sfs) y esfalerita (Sp) intercrecidos con cristales de marcasita de menor granulometría. Zoom 20x, PPI.

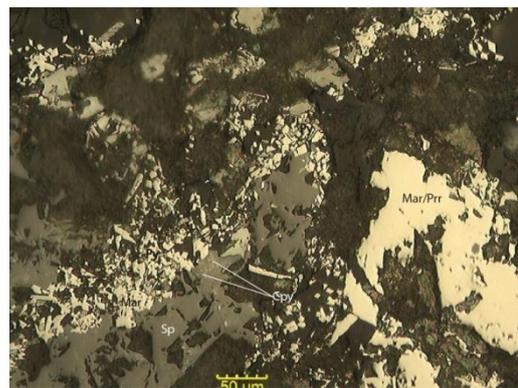


Ilustración 5.- Intercrecimiento cristalino característico de la banda 2, se observan esfalerita (Sp) y pirrotina-marcasita (Mar-Pirr) como cristales de mayor granulometría. Adicionalmente, se aprecia una segunda generación de cristales de pirita/marcasita.

Clave de muestra: 9-842-M3 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.

Rebaje 9-842(Norte-Sur).

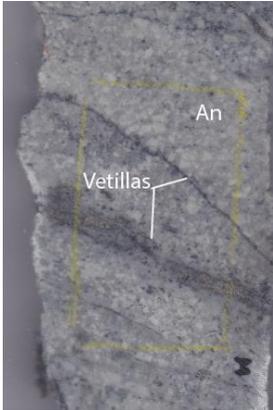


Ilustración 1.- Muestra de mano con clave 9-842-M3, se observa la presencia de vetillas. La zona delimitada de amarillo con clave An representa la zona de análisis.

Justificación.- intrusivo mineralizado próximo a la zona de mineralización, se revisará su temporalidad respecto a la mineralización y la paragénesis que presenta. Con base en su disposición, se revisará la relación de las alteraciones que presenete con las menas metálicas.

Descripción macroscópica.- intrusivo porfirítico con fenocristales de plagioclasa y cuarzo. Se observan vetillas rellenas de sulfuros con una orientación similar, alrededor de las vetillas se observa una ligera recristalización.

Descripción microscópica.

Se tiene una roca de textura porfirítica con una considerable silicificación de la matriz, con fenocristales de feldespato potásico, plagioclasas y anfíbol/piroxenos. En general, la mayoría de los cristales se encuentran fuertemente alterados pero aún se alcanza a distinguir la textura relictas de la roca original. Con base en lo anterior, se observa que todos los feldespatos se encuentran completamente alterados a arcillas o epidotizados, los anfíboles/piroxenos se encuentran totalmente cloritizados y en menor medida epidotizados con presencia de arcillas. La matriz está compuesta por cristales de calcita sucia recristalizada, cuarzo de baja cristalinidad y feldespato potásico con una cloritización incipiente, estos dos últimos se encuentran entrecrecidos en la matriz con una proporción 20%-70%.

Se observan 2 tipos de vetillas, las primeras están compuestas por clorita (15%), calcita (10%), cuarzo (30%) y epidota (10%) con presencia de calcopirita (5%), pirita/marcasita (20%), esfalerita/galena (5%) y sulfosales (5%) (proustita), todas estas de granulometrías que van de .2 mm a 2 mm y con una textura de entrecrecimiento. El segundo tipo de vetillas, están compuestas por cuarzo(60%) de baja cristalinidad, poca calcita(30%), pirita (5%) y esfalerita/galena (5%), estas dos últimas con granulometrías finas que van de .1-.5 mm. Hablando de la temporalidad de eventos, se observa la presencia de una alteración del tipo subpropilítica, la cual evolucionó a una propilítica. En esta muestra, la cristalización de las menas parece estar ligada con la evolución entre la alteración subpropilítica a propilítica, en la cual las sulfosales mineralizaron en el límite entre estas dos. Las vetillas de cuarzo parecen estar ligadas con un pulso tardío independiente, de menor temperatura, rico en sílice y relativamente poco enriquecido en menas metálicas, lo cual se ve reflejado en la poca presencia de sulfuros y menor granulometría de estos.

Finalmente, es importante mencionar que se observa una superposición entre la fase subpropilítica y la propilítica, y su coexistencia a cierta temperatura, lo cual generó la precipitación de las menas. La silicificación se observa como fase final que generó vetillas independientes con su mineralización característica y como evento final, esto se observa en las vetillas de cuarzo que cortan a las de epidota/clorita.

Paragénesis.

Mineral	Subpropilítica	Propilítica	Silicificación
Clorita	-----		
Epidota		-----	
Esfalerita	-----	----	
Marcasita	----	----	
Pirita		-----	----
Sulfosal		-----	
Galena		-----	
Calcopirita		-----	----
Cuarzo		-----	-----
Arcillas	-----		-----

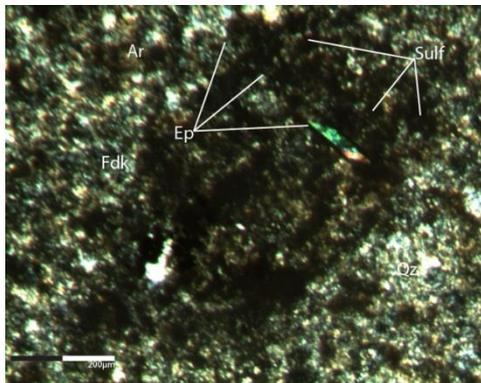


Ilustración 2.- Vetilla propilítica con arcillas (Ar), epidota (Ep), cuarzo (Qz) y feldespato potásico (Fdk). Se observa la presencia una gran cantidad de sulfuros en toda la vetilla. Zoom 4x, NPL.

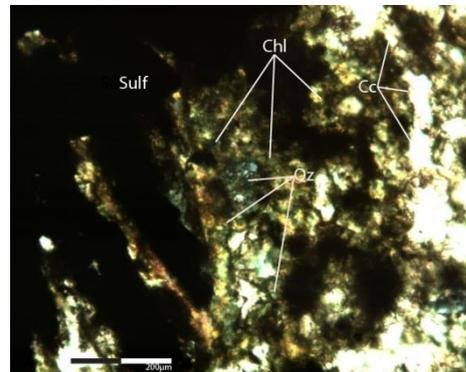


Ilustración 3.- Vetilla de cuarzo (Qz) , calcita y clorita (Chl). Se observa la presencia de una gran cantidad de sulfuros en toda la vetilla. Zoom 4x, NPL.

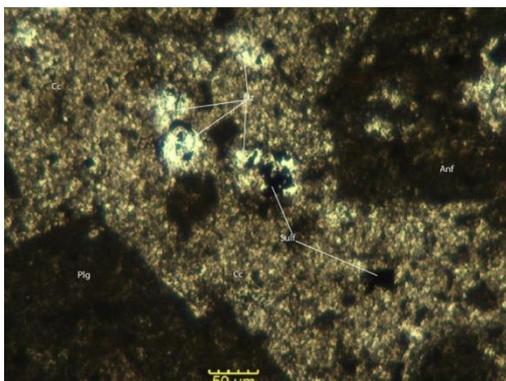


Ilustración 4.- vetilla de cuarzo con arcillas(Ar), calcita (Cc) y sulfuros (sulf). Alrededor se observan fenocristales de anfíbol(An) cloritizado y plagioclasa(Plg) epidotizada. Zoom 20x, PPL.



Ilustración 5.- Sulfuros en vetilla propilítica, se observan dos generaciones de marcasita. Con intercrecimiento de a sulfosal (Sfl) y esfalerita (Sp), en la esfalerita se observa la exsolución de calcopirita. Zoom 4x, PPL.

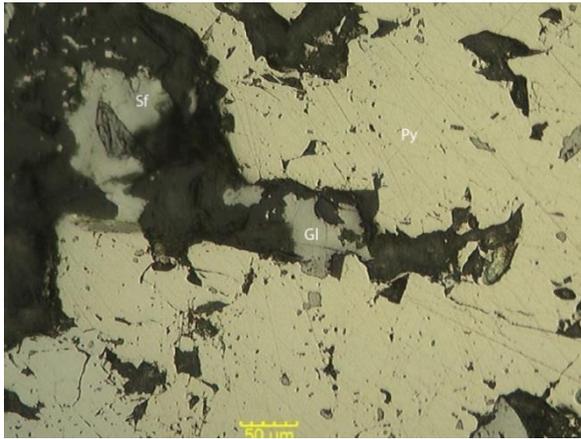


Ilustración 6.- sulfuros en vetilla de sílice, con presencia de esfalerita (Sp), pirita (Py) y galena (Gl). En esta se aprecia el contraste del intercrecimiento de los sulfuros a diferencia de la vetilla propilítica. 20x, PPL

Numero de muestra: 9-826-M-2 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.

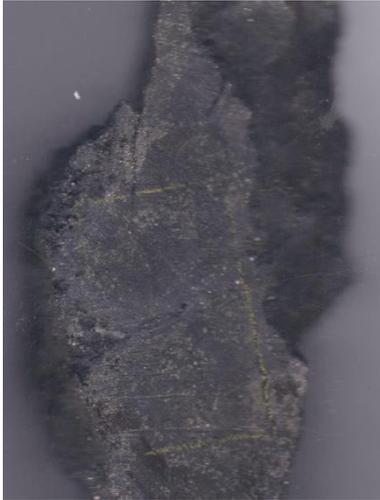


Ilustración 1.- muestra de mano clave 9-842-M-2, el área punteada color amarillo representa la zona para analizar.

Justificación.- muestra extraída del rebaje 9-842, que pertenece a la estructura conocida como N-S. Esta zona llega a presentar leyes de hasta 100 gr[Ag]/Ton, este tipo de roca representa el principal tipo de reemplazamiento que se explota de este cuerpo mineralizado.

Descripción macroscópica.- roca caliza mudstone con parches de sulfuros y zonas con calcita recristalizada. Se observa vetillas color gris claro, la zona seleccionada para el análisis de la muestra se caracteriza por tener la presencia del límite entre la roca y reemplazamiento. Además, también delimita zonas de parches de sulfuros y vetillas.

Descripción microscópica.

Roca con textura de reemplazamiento, se observan zonas de calcita siendo reemplazada por marcasita/pirita anaedral. Además, se presentan parches de sulfuros euedrales cementados por calcita recristalizada estos parecen asociados a un segundo pulso mineralizante. Con base en lo anterior se observan dos asociaciones, la primera se caracteriza por tener la presencia de galena (30%), marcasita (20%) y tetraedrita (25%) subedrales intercrecidas y embebidas por carbonatos (25%) recristalizados, en esta la granulometría de marcasita/ galena oscila de .5 – 1 mm y la tetraedrita es menor a .3 mm. La segunda asociación está compuesta por marcasita (35%) y esfalerita (40%) las cuales están intercrecidos con carbonatos (25%), todos los anteriores se caracterizan por presentarse de forma euedral y granulometrías que oscilan de .5 – 1.5 mm.

En general, se puede determinar la presencia de al menos dos eventos mineralizantes el primero se caracteriza por la ausencia de Ag y un fuerte enriquecimiento de Zn-Pb. El segundo evento se caracterizó por estar enriquecido en Ag-Zn y ausencia de Pb, esto podría hablar de la evolución del fluido mineralizante o de un segundo pulso independiente.

Paragénesis.

Mineral	Etapa 1	Etapa 2
Marcasita	-----	-----
Esfalerita	-----	-----
Tetraedrita		-----
Galena		-----
Calcita	-----	

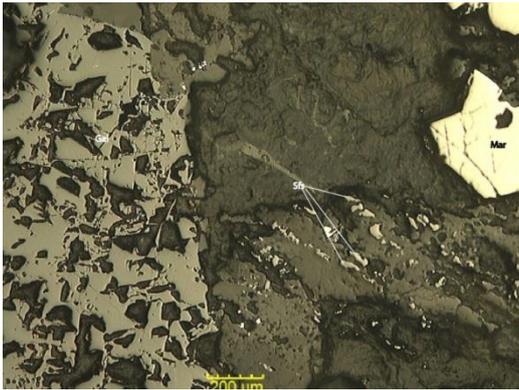


Ilustración 2.- Parche de menas metálicas compuesto por galena (Gal), marcasita (Mar) y tetraedrita (Sfs). Se puede observar que la sulfosal presenta una granulometría en comparación con los demás cristales. PPL, Zoom 20x.

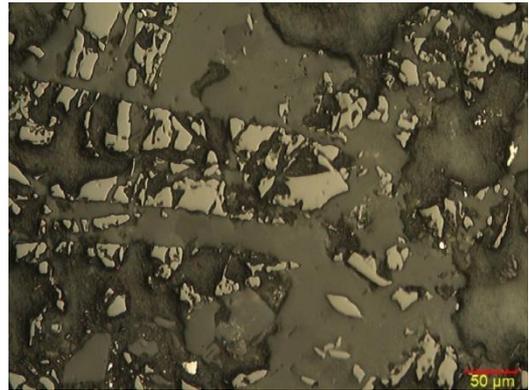


Ilustración 3.- Marcasita y esfalerita embebidas por cristales de calcita recrystalizados. PPL, 10x.



Ilustración 4.- Cristal eudral de marcasita (Mar) intercrecida con un cristal de calcita, en esta se observa cristales de esfalerita (Sp) y tetraedrita (Sfs) relleno como relleno de cavidad. PPL, Zoom 20x.

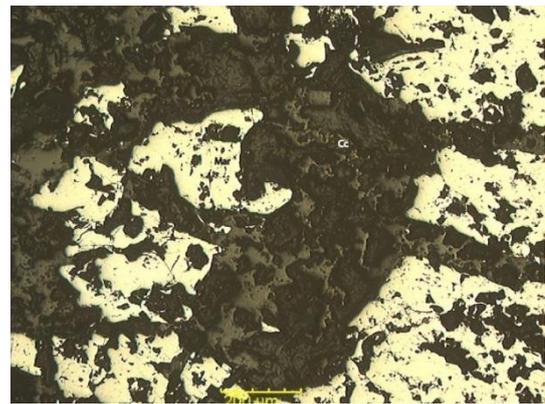


Ilustración 5.- Calcitas con bordes de reacción, las cuales se encuentra siendo reemplazada por marcasita. PPL, Zoom 4x.

Numero de muestra: 12-460-M-1 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.



Ilustración 1.- muestra de mano clave 12-460-M-1, el área punteada representa la zona para analizar.

Justificación.- muestra extraída del rebaje 12-460, que pertenece a la estructura 460. Esta zona llega a presentar leyes de hasta 120 gr[Ag]/Ton, además se observa un cambio en la mineralogía de la zona. En esta se presenta un mineral magnético que indica un cambio en las condiciones del fluido mineralizante.

Descripción macroscópica.- roca de textura laminar, en la cual se observa una ritmicidad en la laminación. Se observan 3 colores, gris claro, gris oscuro y dorado, esto podría corresponder con la evolución del fluido mineralizante y la temporalidad de esta.

Descripción microscópica.

Roca de textura laminada, en la cual se observan 3 láminas que se presentan con una ritmicidad constante y una cuarta que se presenta de forma aislada. Por la estructura de la roca se determina que representa parte de un manto y no un reemplazamiento con estructura relictas. Las bandas se pueden clasificar de la forma siguiente:

- Lámina 1.- compuesta por cristales de cuarzo y calcita de granulometría que va de .1 mm - .5mm. La división entre esta y las zonas que presenta menas metálicas es muy marcada y no parece existir una transición.
- Lámina 2.- compuesta en más de un 80% por pirrotina, algunas veces se observa intercrecida con esfalerita (10%) muy oscura y de forma escaza con galena (1%<). En esta se observan algunos cristales de marcasita euedrales e intercrecidos aleatoriamente con la pirrotina. Los cristales de pirrotina en esta banda presentan granulometrías que van de .5 – 1.5 mm y los de esfalerita/galena varían de .1 - .3 mm.
- Lámina 3.- compuesta por cristales de marcasita (20%), galena (50%) y esfalerita gris clara (30%) intercrecidas, con presencia de cristales de arsenopirita (1%<) de forma aislada. Los cristales de marcasita/ esfalerita presentan granulometrías que van de .5 – 1 mm y los de arsenopirita varían de .1 - .3 mm.
- Lámina 4 (aislada).- compuesta por cristales de pirrotina/marcasita (40%), esfalerita (30%) gris clara, calcopirita (1%), tetraedrita (10%) y galena (19%). Se observa un reequilibrio de los cristales de pirrotina a marcasita, esto se ve en el desarrollo piramidal de los cristales de pirrotina. Los cristales de esfalerita se encuentran entrecrecidos con la pirrotina y galena, la tetraedrita se encuentra rellenando huecos. Las granulometrías de pirrotina, esfalerita y galena oscilan de .5 – 1 mm, la calcopirita y tetraedrita oscilan de .1 - .5 mm. Finalmente, es importante mencionar que los cristales de calcopirita cristalizan únicamente dentro de la esfalerita, no se observa claramente una textura de exsolución pero si una fuerte asociación entre estos.

Según las características mineralógicas de cada lámina, se observa una clara correspondencia de los fluidos mineralizante y su evolución. La temporalidad de la banda que contiene las sulfosales de plata parece presentarse como evento final, el cual se encuentra ligado a un requilibrio en el fluido mineralizante esto se ve reflejado en el cambio marcasita-pirrotina y la calcopirita-esfalerita.

Paragénesis.

Mineral	L1	L2	L3	L4
Marcasita		-----		
Pirrotina				-----
Tetraedrita				-----
Esfalerita		-----		
Galena			-----	
Calcita	-----			
Cuarzo	-----			
Calcopirita				-----

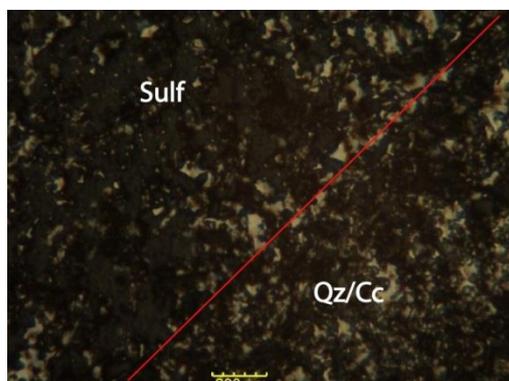


Ilustración 2.- División muy marcada entre las láminas con menas metálicas y las de cuarzo (Qz) y calcita (Cc). PPL, 2.5 x.

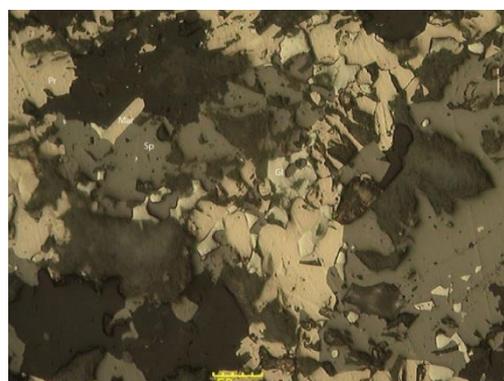


Ilustración 3.- Intercrecimiento característico de la lámina 2, se observa la pirrotina (Pr) intercrecida con la esfalerita (Sp) y marcasita (Mar) euedral. La galena se caracteriza por ser relleno de cavidades.

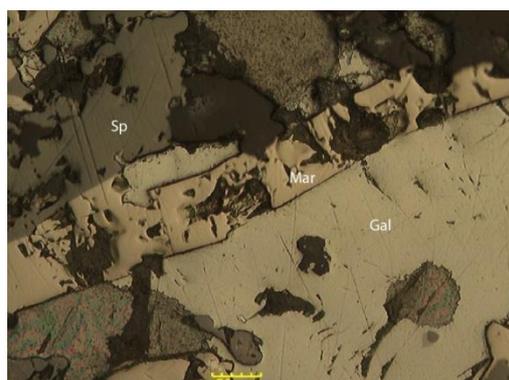


Ilustración 4.- Intercrecimiento característico de la lámina 3, se observa galena (Gal), marcasita (Mar) y esfalerita (Sp). PPL, Zoom 10x.

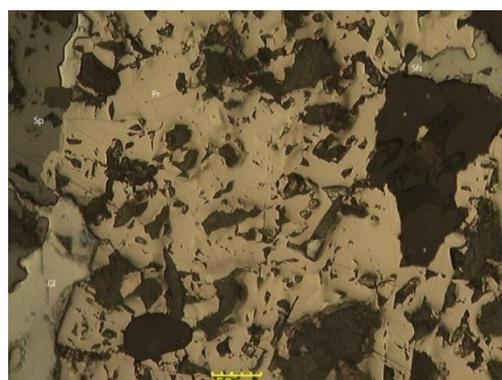


Ilustración 5.- Intercrecimiento de la lámina 4, se observan cristales de pirrotina (Pr), esfalerita (Sp) y galena (Gal). En la cual la tetrahedrita (Tfs) se caracteriza por ser relleno de cavidades. Zoom 20x, PPL.



Ilustración 5.- contraste de reequilibrio marcasita-pirrotina, muy característico de la lámina 4. PPL, Zoom 20x.

Clave de muestra: 9-842-M3 **Localidad:** La Parrilla, Quebradillas, Dgo.

Rebaje 9-842(Norte-Sur).

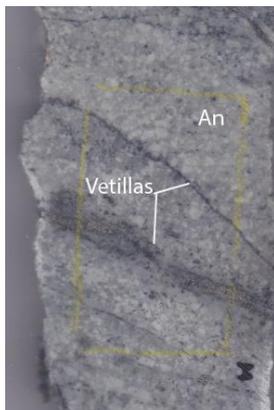


Ilustración 17. Muestra de mano con clave 9-842-M3, se observa la presencia de vetillas. La zona delimitada de amarillo con clave An representa la zona de análisis.

Justificación.- intrusivo mineralizado próximo a la zona de mineralización, se revisará su temporalidad respecto a la mineralización y la paragénesis que presenta. Con base en su disposición, se revisará la relación de las alteraciones que presenten con las menas metálicas.

Descripción macroscópica.- intrusivo porfirítico con fenocristales de plagioclasa y cuarzo. Se observan vetillas rellenas de sulfuros con una orientación similar, alrededor de las vetillas se observa una ligera recristalización.

Descripción microscópica.

Se tiene una roca de textura porfirítica con una considerable silicificación de la matriz, con fenocristales de feldespato potásico, plagioclasas y anfíbol/piroxenos. En general, la mayoría de los cristales se encuentran fuertemente alterados pero aún se alcanza a distinguir la textura relicta de la roca original. Con base en lo anterior, se observa que todos los feldespatos se encuentran completamente alterados a arcillas o epidotizados, los anfíboles/piroxenos se encuentran totalmente cloritizados y en menor medida epidotizados con presencia de arcillas. La matriz está compuesta por cristales de calcita sucia recristalizada, cuarzo de baja cristalinidad y feldespato potásico con una cloritización incipiente, estos dos últimos se encuentran entrecrecidos en la matriz con una proporción 20%-70%.

Se observan 2 tipos de vetillas, las primeras están compuestas por clorita (15%), calcita (10%), cuarzo (30%) y epidota (10%) con presencia de calcopirita (5%), pirita/marcasita (20%), esfalerita/galena (5%) y sulfosales (5%) (proustita), todas estas de granulometrías que van de .2 mm a 2 mm y con una textura de entrecrecimiento. El segundo tipo de vetillas, están compuestas por cuarzo(60%) de baja cristalinidad, poca calcita(30%), pirita (5%) y esfalerita/galena (5%), estas dos últimas con granulometrías finas que van de .1-.5 mm. Hablando de la temporalidad de eventos, se observa la presencia de una alteración del tipo subpropilítica, la cual evolucionó a una propilítica. En esta muestra, la cristalización de las menas parece estar ligada con la evolución entre la alteración subpropilítica a propilítica, en la cual las sulfosales mineralizaron en el límite entre estas dos. Las vetillas de cuarzo parecen estar ligadas con un pulso tardío independiente, de menor temperatura, rico en sílice y relativamente poco enriquecido en menas metálicas, lo cual se ve reflejado en la poca presencia de sulfuros y menor granulometría de estos.

Finalmente, es importante mencionar que se observa una superposición entre la fase subpropilítica y la propilítica, y su coexistencia a cierta temperatura, lo cual generó la precipitación de las menas. La silicificación se observa como fase final que generó vetillas independientes con su mineralización característica y como evento final, esto se observa en las vetillas de cuarzo que cortan a las a la de epidota/clorita.

Paragénesis.

Mineral	Subpropilítica	Propilítica	Silicificación
Clorita	-----		
Epidota		-----	
Esfalerita		-----	----
Marcasita	----	----	
Pirita		-----	----
Sulfosal		-----	
Galena		-----	
Calcopirita		-----	----
Cuarzo		-----	-----
Arcillas	-----		-----

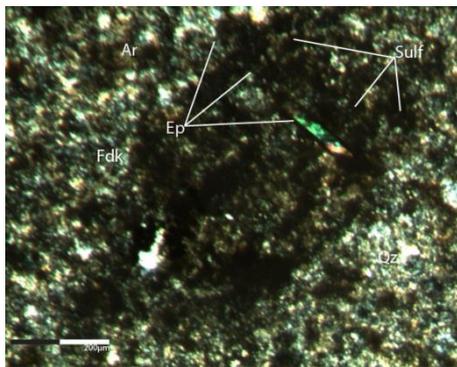


Ilustración 2.- Vetilla propilítica con arcillas (Ar), epidota (Ep), cuarzo (Qz) y feldespato potásico (Fdk). Se observa la presencia una gran cantidad de sulfuros en toda la vetilla. Zoom 4x, NPL.

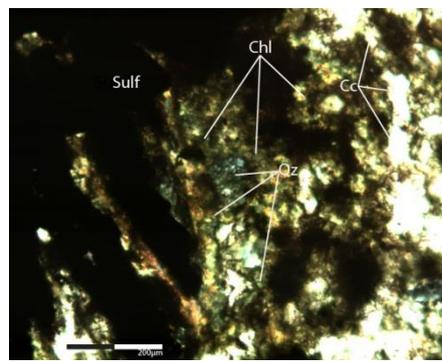


Ilustración 3.- Vetilla de cuarzo (Qz) , calcita y clorita (Chl). Se observa la presencia de una gran cantidad de sulfuros en toda la vetilla. Zoom 4x, NPL.

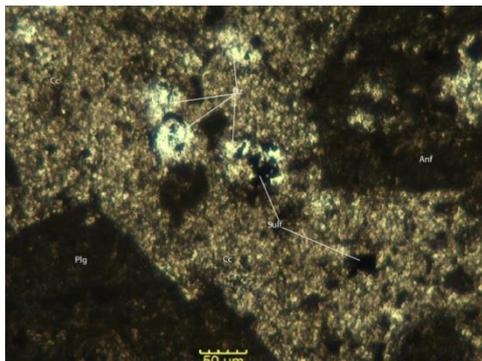


Ilustración 4.- vetilla de cuarzo con arcillas(Ar), calcita (Cc) y sulfuros (sulf). Alrededor se observan fenocristales de anfíbol(An) cloritizado y plagioclasa(Plg) epidotizada. Zoom 20x, PPL.



Ilustración 5.- Sulfuros en vetilla propilítica, se observan dos generaciones de marcasita. Con intercrecimiento de a sulfosal (Sfl) y esfalerita (Sp), en la esfalerita se observa la exsolución de calcopirita. Zoom 4x, PPL.

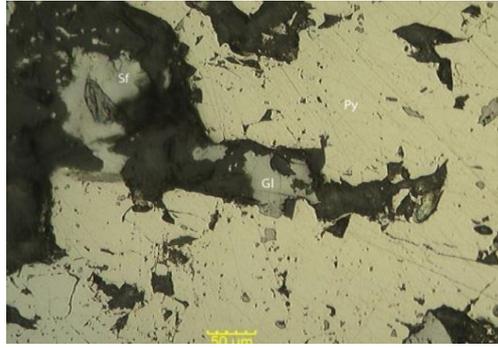
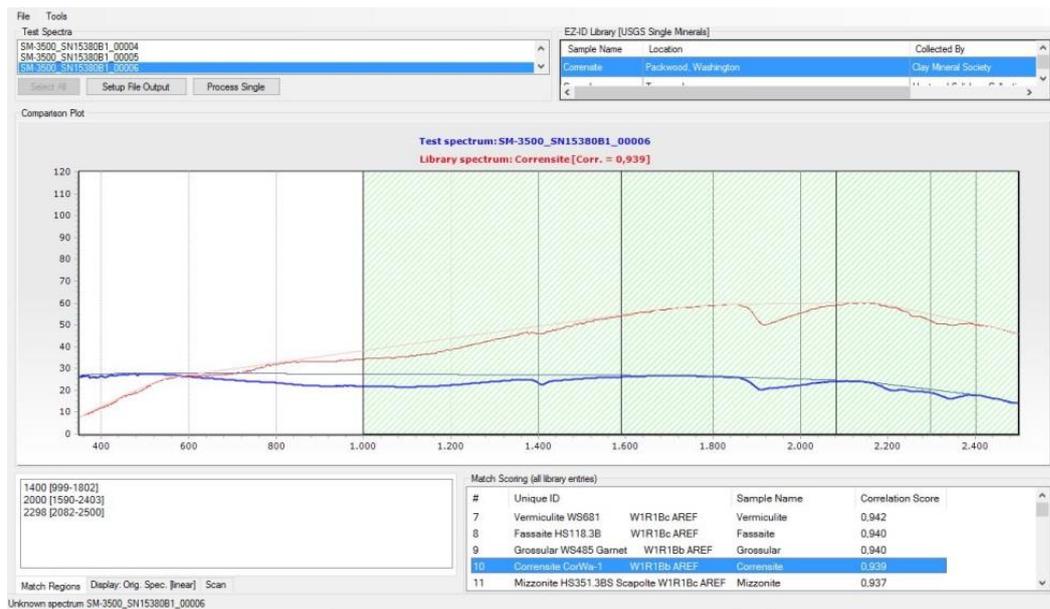
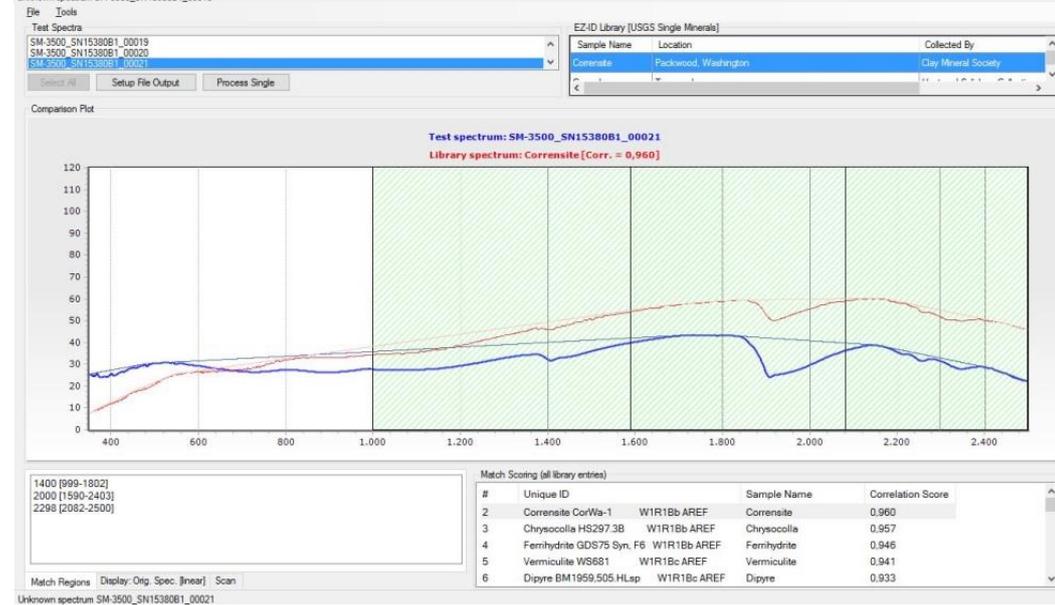
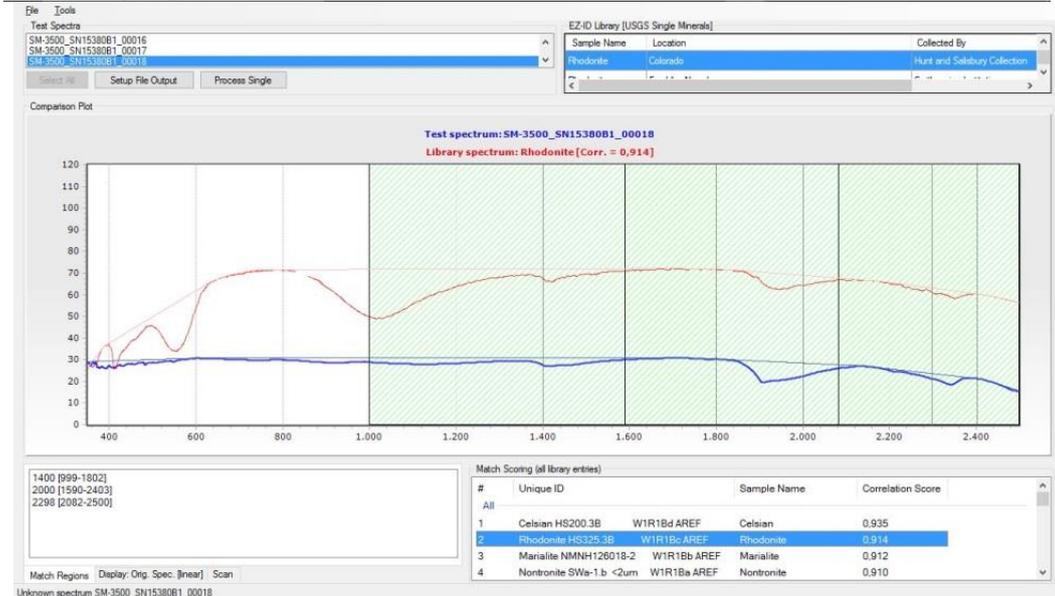
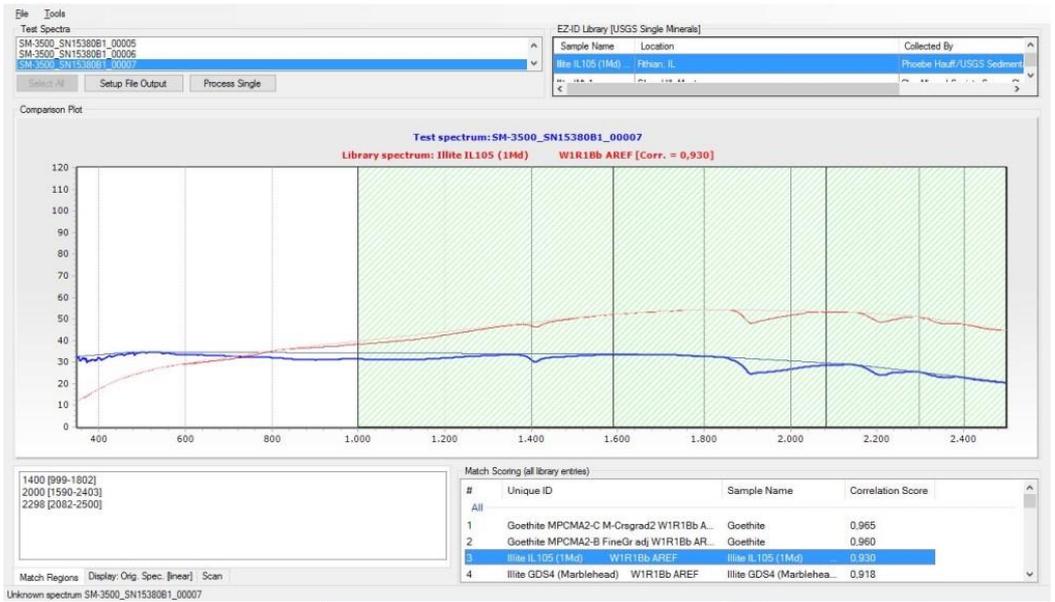


Ilustración 6.- sulfuros en vetilla de sílice, con presencia de esfalerita (Sp), pirita (Py) y galena (Gl). En esta se aprecia el contraste del intercrecimiento de los sulfuros a diferencia de la vetilla propilítica. 20x. PPL

SWIR

Se analizaron algunas especies de arcillas en las zonas de alteración propilítica y subpropilítica con la finalidad de determinar algunas asociación característica. Debido al tipo de reemplazamiento que presenta la roca, no se pudo determinar ninguna asociación característica representativa con esta metodología.





SEM

13-460

Spectrum details

Project New project

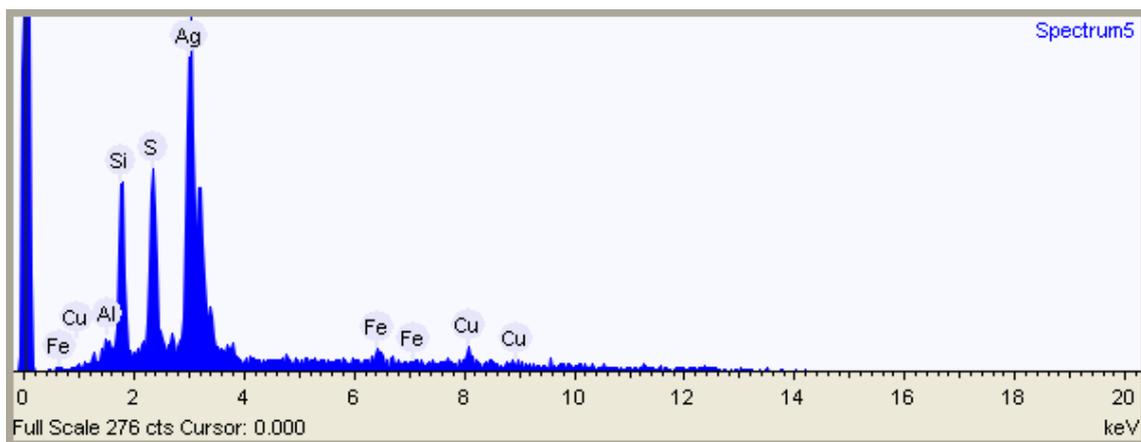
Spectrum name Spectrum5

Acquisition conditions

Acquisition time (s) 30.0

Process time 4

Accelerating voltage (kV) 15.0



Quantification Settings

Quantification method All elements (normalised)

Summary results

Element	Weight %
Aluminum	0.9

Silicon	10.8
Sulfur	13.3
Iron	3.9
Copper	1.4
Silver	69.7

BRILLANTE ABAJO DE GALENA

Spectrum details

Project New project

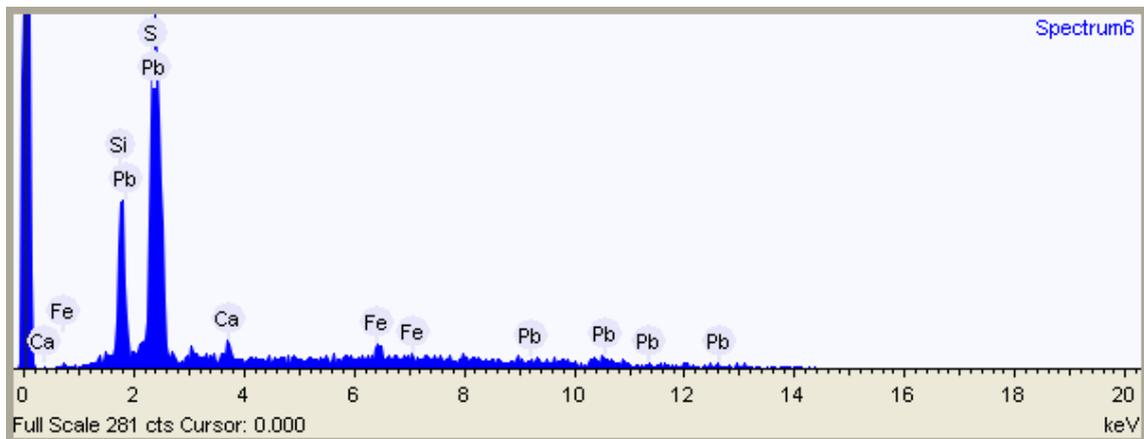
Spectrum name Spectrum6

Acquisition conditions

Acquisition time (s) 30.0

Process time 4

Accelerating voltage (kV) 15.0



Quantification Settings

Quantification method All elements (normalised)

Summary results

Element	Weight %
Silicon	13.0
Sulfur	13.2

Calcium	1.9
Iron	6.5
Lead	65.5

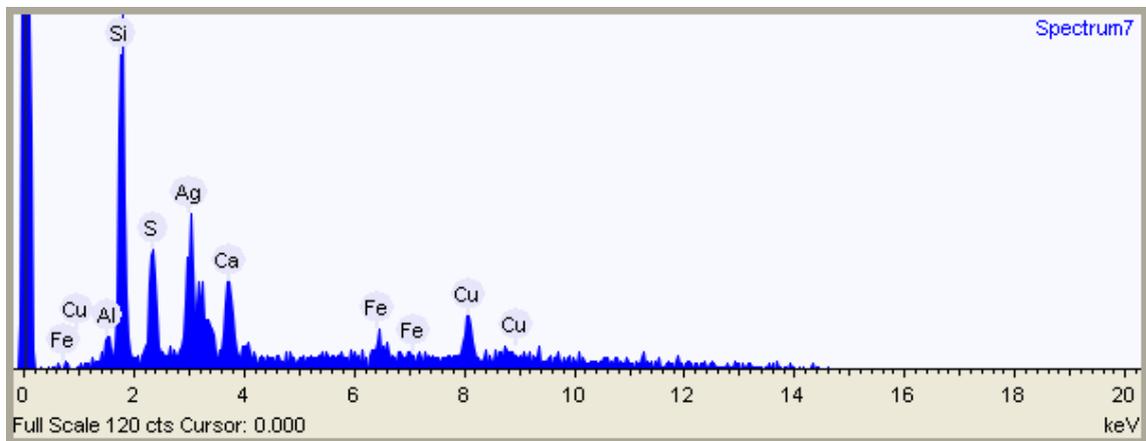
GRIS CON HABITO VERMICULAR

Spectrum details

Project	New project
Spectrum name	Spectrum7

Acquisition conditions

Acquisition time (s)	30.0
Process time	4
Accelerating voltage (kV)	15.0



Quantification Settings

Quantification method	All elements (normalised)
-----------------------	---------------------------

Summary results

Element	Weight %
---------	----------

Aluminum	1.8
Silicon	29.6
Sulfur	10.8
Calcium	13.4
Iron	7.2
Copper	0.2
Silver	37.0

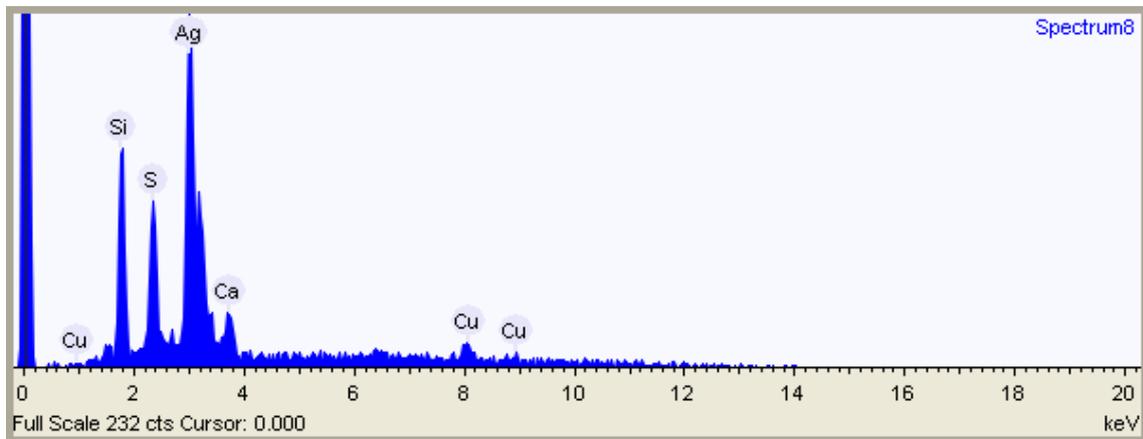
GRIS MUY CLARO

Spectrum details

Project New project
Spectrum name Spectrum8

Acquisition conditions

Acquisition time (s) 30.0
Process time 4
Accelerating voltage (kV) 15.0



Quantification Settings

Quantification method All elements (normalised)

Summary results

Element	Weight %
Silicon	13.2
Sulfur	10.6
Calcium	5.4
Copper	0.3
Silver	70.4

GRIS CLARO

Spectrum details

Project New project

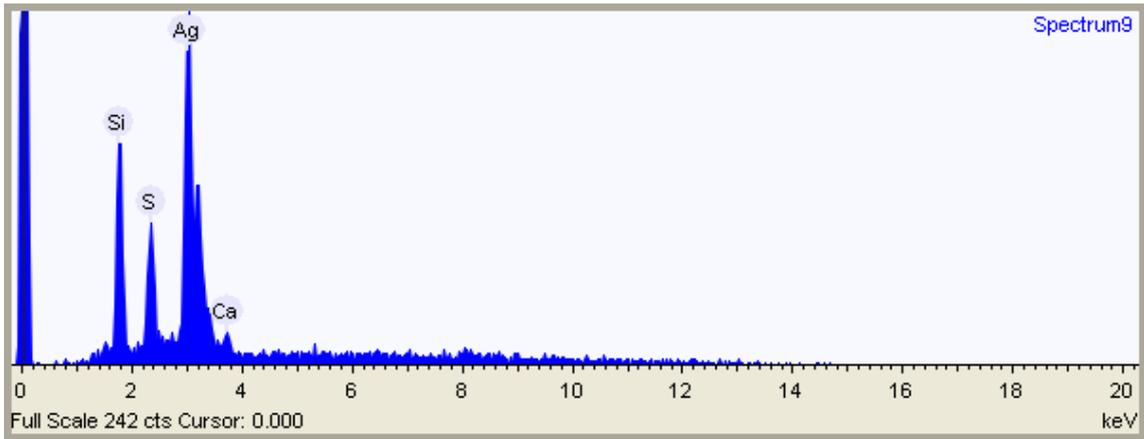
Spectrum name Spectrum9

Acquisition conditions

Acquisition time (s) 30.0

Process time 4

Accelerating voltage (kV) 15.0



Quantification Settings

Quantification method All elements (normalised)

Summary results

Element	Weight %
Silicon	15.0
Sulfur	9.5
Calcium	2.0
Silver	73.5

11-894

Spectrum details

Project New project

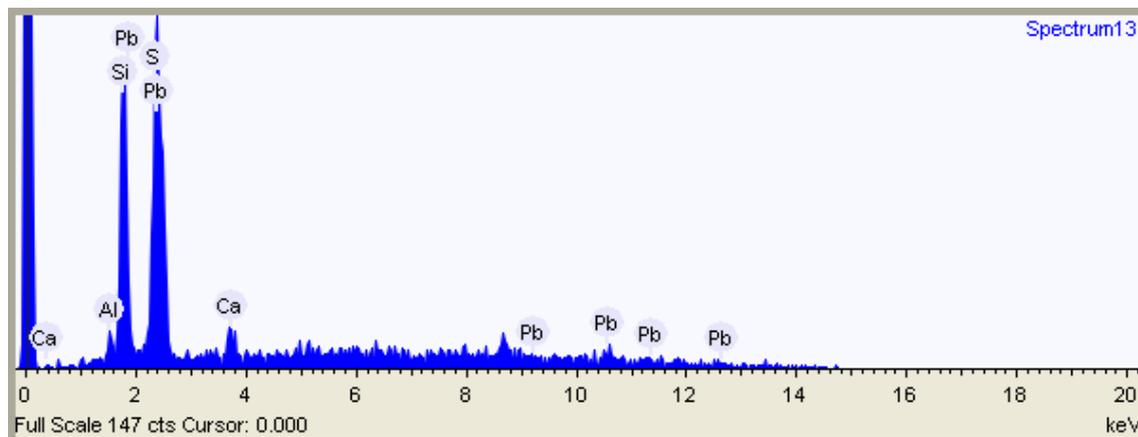
Spectrum name Spectrum13

Acquisition conditions

Acquisition time (s) 30.0

Process time 4

Accelerating voltage (kV) 15.0



Quantification Settings

Quantification method All elements (normalised)

Summary results

Element	Weight %
Aluminum	1.7
Silicon	22.5
Sulfur	7.9
Calcium	5.1
Lead	62.8

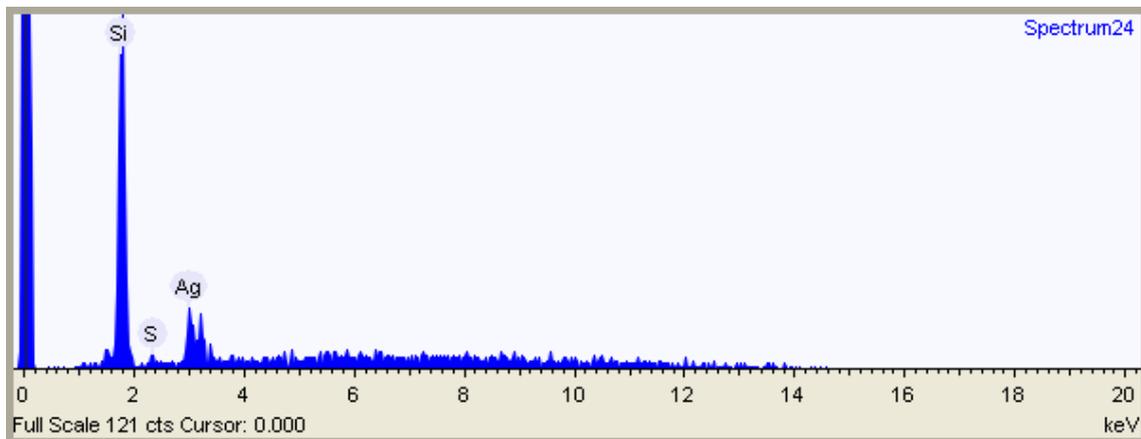
BLANCO GRISACEO

Spectrum details

Project New project
Spectrum name Spectrum24

Acquisition conditions

Acquisition time (s) 30.0
Process time 4
Accelerating voltage (kV) 15.0



Quantification Settings

Quantification method All elements (normalised)

Summary results

Element	Weight %
Silicon	63.2
Sulfur	1.4

Silver

35.5

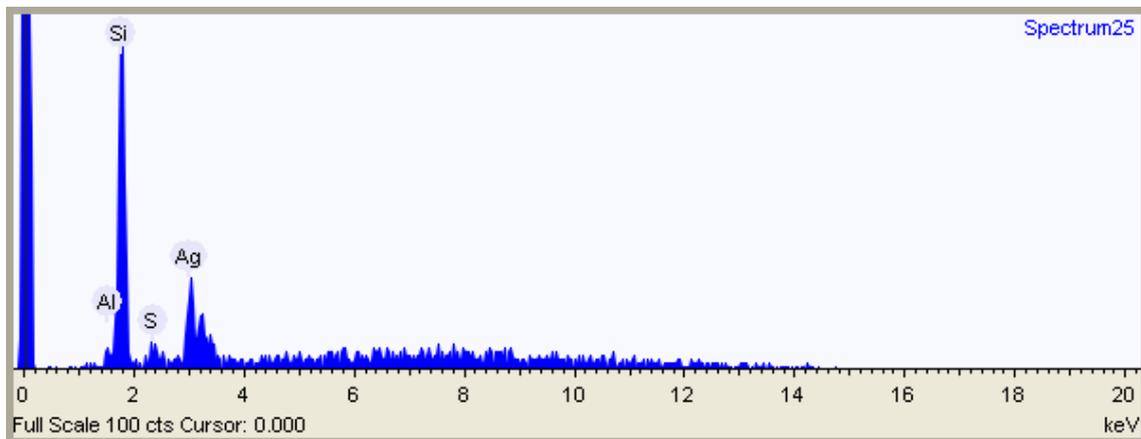
BLANCO BRILLANTE

Spectrum details

Project New project
Spectrum name Spectrum25

Acquisition conditions

Acquisition time (s) 30.0
Process time 4
Accelerating voltage (kV) 15.0



Quantification Settings

Quantification method All elements (normalised)

Summary results

Element	Weight %
Aluminum	1.9
Silicon	48.7

Sulfur	2.8
Silver	46.7
