



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**GÉNESIS Y EVOLUCIÓN DEL CUERPO DE SANTA MARÍA, DISTRITO
MINERO DE VELARDEÑA, DURANGO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(YACIMIENTOS MINERALES)

PRESENTA:
NÉSTOR ALFREDO CANO HERNÁNDEZ

TUTOR:
Dr. Antoni Camprubí Cano (Instituto de Geología, UNAM)

JURADO EVALUADOR:
Dr. Antoni Camprubí Cano (Instituto de Geología, UNAM)
Dra. Vanessa Colás Ginés (Instituto de Geología, UNAM)
Dr. Eduardo González Partida (Centro de Geociencias, UNAM)
Dr. Enrique González Torres (Instituto de Geología, UNAM)
Dr. Lisard Torró i Abat (Pontificia Universidad Católica del Perú)

Ciudad Universitaria, Ciudad de México
Agosto de 2020



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.

Declaración de ética académica

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría.

Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Néstor A. Cano H.', with a stylized flourish at the end.

Néstor Alfredo Cano Hernández
Agosto de 2020

*Con amor infinito, dedico
este trabajo a mis padres,
Emira y Félix,
a quienes debo todo
lo que soy y seré*

Sempiternamente, a Jeru

“La imaginación es más importante que el conocimiento. El conocimiento es limitado, mientras que la imaginación abarca el mundo entero, estimulando procesos, dando luz a la evolución. Ésta es, estrictamente hablando, un factor real en la investigación científica”.

-Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, me gustaría resaltar que esta Tesis de Maestría refleja el esfuerzo y la influencia de un gran número de personas que, de una manera u otra, lo enriquecieron con un manojo de ideas, conceptos, opiniones y, ¿por qué no?, sentimientos y sensaciones. Seguramente, muchas de ellas se quedarán por fuera de lo explícito en estas líneas, pero sin duda estarán en el subtexto. Por tanto, a ellos, reafirmo mi gratitud.

En primera instancia, agradezco inmensamente a la Universidad Nacional Autónoma de México, por acogerme dentro de su gran familia y concederme tantísimas experiencias y aventuras. Al Posgrado en Ciencias de La Tierra y al Instituto de Geología por haberme permitido hacer parte del programa de Maestría, por todos los conocimientos que me fueron transmitidos en la realización de éste y por el apoyo económico para la preparación de muestras y análisis especializados. Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT), a la Organización de Estados Americanos (OEA) y a la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID) por la beca que me fue otorgada. A los proyectos “GEMEX-UE PT 4.1” liderado por el Dr. Eduardo González Partida y “CONACyT-Ciencia Básica A1-S-14574” y “UNAM-PAPIIT IA-101419” encabezados por la Dra. Vanessa Colás Ginés, por brindar recursos para la elaboración de muestras y diversos estudios de laboratorio.

Gracias a mi tutor, el Dr. Antoni Camprubí Cano, quien se mostró asequible y abierto desde el primer correo, y me brindó su apoyo durante estos dos años de estudios. Debo agradecer no sólo por sus múltiples consejos, correcciones y comentarios que moldearon este trabajo hasta su versión actual, sino por haber resucitado mi amor por la investigación y por los yacimientos minerales. También, por la confianza e independencia que me brindó, y por sus palabras u opiniones acertadas en los momentos requeridos.

A los integrantes de mi comité tutor: los doctores Eduardo González Partida y Enrique González Torres, por escuchar atentamente las presentaciones semestrales y encausar la investigación con sus consejos y comentarios. Junto a ellos, extendiendo mi gratitud a los constituyentes adicionales del jurado evaluador, la Dra. Vanessa Colás Ginés y el Dr. Lisard Torró Abat, por sus correcciones y comentarios sobre el documento final, y, especialmente, por haberse dado a la casi tortuosa labor de leerlo detalladamente.

De forma especial, quiero agradecer a los profesores que dirigieron las asignaturas cursadas: Dr. Antoni Camprubí, Dra. Vanessa Colás, Dr. Mariano Elías, Dra. Elisa Fitz, Mtro. Rogelio Hernández, Ing. Carlos Linares, Dra. Barbara Martiny, Dr. Fernando Ortega, Dr. José Luis Sánchez y Dr. Peter Schaaf, porque con sus enseñanzas enriquecieron y afianzaron en gran medida mis conocimientos en geología. ¡Gracias miles!

A Industrias Peñoles y, principalmente, al Ing. Efrén Sánchez, subgerente de operaciones de la Unidad Velardeña, por facilitar las muestras con la que se llevó a cabo esta investigación. Muchas gracias, porque sin ellas no hubiera sido posible realizar el trabajo (literalmente). Asimismo, a mi compañera de tesis, Ana Karen González (¡Velardeña Team!), quien me guió en gran manera dentro de la ubicación espacial del muestreo y las características más relevantes de campo, y además me acompañó con sus risas y comentarios jocosos de alta calidad.

Gracias infinitas a la Mtra. Edith Fuentes Guzmán del Laboratorio de Catodoluminiscencia e Inclusiones Fluidas del LANGEM, quien me acompañó pacientemente durante largas horas en el laboratorio de microtermometría, mirando fijamente las inclusiones inmortales, que no se inmutaban ante los cambios de temperatura. También, porque me enseñó muchísimas cosas que fueron vitales para el desarrollo tanto del trabajo de grado como el personal. Merci beaucoup, Edith!

Agradezco enormemente a los académicos que ayudaron a la preparación de las muestras y/o llevaron a cabo los análisis que fueron imprescindibles en la realización de la tesis: al Ing. Juan Tomás Vázquez (Juanito) por su colaboración y consejos para la elaboración de las secciones delgadas y superficies pulidas; al Dr. Augusto Rodríguez del Laboratorio de Petrografía y Microtermometría de Inclusiones Fluidas del Instituto de Geofísica por colaborar con la adquisición de imágenes BSE y datos de EDS; al Ing. Calos Linares por su gentileza y constante colaboración en los análisis de química mineral (EMPA); a la Mtra. Adriana Meléndez y la Dra. María Colín por su extrema amabilidad y colaboración con los estudios de infrarrojo ATR; a la Mtra. Edith Cienfuegos y el Mtro. Francisco Otero por los análisis de isótopos estables de oxígeno y carbono en calcita; a la Dra. Pura Alfonso por los estudios isotópicos de azufre en sulfuros; y los doctores Alexander Iriondo y Dan Miggins por los fechamientos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en adularia. De igual forma, doy gracias a los estudiantes de servicio social: José Juan, Maricarmen, Rodrigo y Scarlett, quienes igualmente desempeñaron un papel importante en las actividades de laboratorio y con los que conformamos el club del elote durante nuestra estadía en Juriquilla.

A la Dra. Christina Siebe, María Luisa Reyes, Araceli Chamán, Erika Ulloa y demás personas relacionadas con los trámites administrativos en el Posgrado de Ciencias de La Tierra, por su gran diligencia en la realización de éstos y su constante gentileza.

Ahora, es el momento de agradecer a mis amigos, mis parceritos, las personas que endulzaron cada día de mi maestría con su maravillosa compañía, risas, bailes, chistes y más, muchísimo más. Para empezar, quiero dar gracias a mis geoamiguitas, Lilian y Margarita, las primeras personas con las que hablé al llegar a la universidad (en Rockenberg), a quienes aprendí a querer con todo el corazón y que, además, me entregaron momentos inolvidables. Asimismo, a Yasmany, Dainiel, Esther, Rainer y Jonathan, con quienes desarrollé lazos muy fuertes, que sé que la distancia no romperá. Adicionalmente, doy gracias a mis compañeritos de geología de campo (¡Matziti!), con quienes reafirmé la frase de cajón “nunca es tarde”, porque, aunque los conocí en el último semestre, les tomé mucho aprecio y me enseñaron una plétora de cosas.

Agradezco muy cariñosamente a la señora Gabriela, al señor Javier e hijos, por acogerme en su casa durante este tiempo y haberme hecho sentir parte de la familia. De la misma manera, doy gracias a Julio, Valentina, Brayan y Adriana, por su preciosa compañía y amistad.

Por último, pero de lejos menos importante, quiero darle gracias infinitas a mi familia y amigos de Colombia por todo el cariño y apoyo que me han brindado siempre. A mis padres, Emira y Félix, por ser excelentes personas en todo el sentido de la frase, integrales en su proceder, comprensivos y profundamente amorosos. Por ser y haber sido ellos, gracias y más gracias... los amo con la vida. Del mismo modo, agradezco a mis tíos, primos, papá, hermanos, suegros, cuñados y demás integrantes de mi familia, por tantísimo amor y soporte. Para concluir, quiero agradecer a Jeru, quien es la persona más especial que he conocido en los últimos años y que ha impactado de forma más acentuada en mi pensar y actuar. Gracias por apoyarme, hacer aflorar mi mejor versión y darme la libertad de ser yo mismo. You are one of my greatest adventures (*The Ellie Badge*)... te amo ♡.

RESUMEN

El Distrito Minero de Zn-Pb-Ag de Velardeña se encuentra localizado al noreste del estado de Durango, a 60 km al suroeste de Torreón, dentro de la terminación occidental del Sector Transversal de Parras y muy cerca de su confluencia con la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central. El cuerpo mineralizado de Santa María es uno de los múltiples yacimientos que componen este distrito y se forma en el contacto entre un dique de composición intermedia a félsica del Oligoceno y la sucesión calcárea de la Formación Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano). Allí se desarrolla un sistema tipo skarn, formado en tres estadios con características distintivas: una fase prógrada, una etapa retrógrada y un vetilleo tardío, de los cuales el segundo muestra el desarrollo predominante de la mineralización económica.

Durante la fase prógrada del sistema se exsolvieron fluidos metasomáticos de alta temperatura (>600 °C) a partir del cuerpo ígneo que migraron progresivamente por la secuencia carbonatada, permitiendo la formación de skarns anhidros formados por minerales calcisilicatados como granate, vesuvianita, wollastonita, calcita y cuarzo. Estos fluidos circularon también hacia el interior del dique y generaron una alteración potásica de biotita hidrotermal. La fase retrógrada, por su parte, se caracteriza por mostrar una mineralogía variada y por subdividirse en distintas etapas. Durante este estadio se dio el reemplazamiento de los skarns y las alteraciones de alta temperatura por minerales hidratados de menor temperatura (ca. 400 °C) como actinolita, tremolita, epidota, clorita, cuarzo, calcita, moscovita, sericita, adularia pseudoromboédrica, fluorita y turmalina. Asimismo, en la etapa 4 o estadio mineralizante principal, precipitaron los sulfuros masivos compuestos por esfalerita, pirita, arsenopirita, pirrotina, calcopirita, galena, magnetita y sulfosales. Por último, la etapa del vetilleo está representada por estructuras menores a 5 cm, compuestas enteramente por calcita y proporciones menores de arsenopirita, pirita, calcopirita, esfalerita, galena y cobres grises.

La composición química de los distintos minerales se empleó para su caracterizaron y establecimiento de condiciones de cristalización. La arsenopirita exhibe rangos de 30 a 33,5 % atómico de As y de 32,5 a 34 % atómico de Fe, y se encuentra en asociación con pirita, pirrotina y pirita-pirrotina, definiendo temperaturas de cristalización de 370 a 490 °C. El granate muestra una composición variable entre $\text{Gr}_{536}\text{Adr}_{34}\text{Psp}_{30}$ y $\text{Gr}_{538}\text{Adr}_{32}\text{Psp}_{30}$. Los cobres grises siguen dos tendencias, una hakita-tenantita (vetillas tardías) y otra freibergita-tetraedrita-hakita (sulfuros masivos), con proporciones de $\text{Ag}/(\text{Ag}+\text{Cu}) < 0,15$ y $> 0,25$, respectivamente, y de $\text{Zn}/(\text{Zn}+\text{Fe})$ de 0 a 0,9. Se obtuvieron temperaturas de cristalización de ca. 300 °C para las muestras con valores de $0,2 < \text{Zn}/(\text{Zn}+\text{Fe}) < 0,4$ y de $\text{Ag}/(\text{Ag}+\text{Cu}) \approx 0,55$, de ca. 170 °C para los cobres grises con $0,25 < \text{Ag}/(\text{Ag}+\text{Cu}) < 0,55$ y de <170 °C para aquellas con $\text{Ag}/(\text{Ag}+\text{Cu}) < 0,15$. Las sulfosales de Pb se caracterizaron como miembros intermedios de las series lilianita-gustavita y heyrovskyita-eskimoita, con proporciones de Se < 6,2 % en peso. La magnetita es un miembro intermedio de la serie magnetita-wüstita y exhibe contenidos traza de Mg, Al, Ti, Cr, Mn, Co, Ni y Zn.

Petrográficamente, se reconocieron tres asociaciones de inclusiones fluidas que están presentes en la mayoría de las muestras: 1) inclusiones fluidas primarias y pseudosecundarias bifásicas (L+V) y ocasionalmente trifásicas (L+V+S), con grados de relleno de 0,8 a 0,9, hospedadas por esfalerita, cuarzo, calcita y fluorita de la etapa 4; 2) inclusiones fluidas primarias monofásicas (V), bifásicas (L+V o V+L), trifásicas (L+V+S) y multisólidas (L+V+S₁+S₂), atrapadas en calcita del estadio de vetilleo tardío y, muy localmente, en cuarzo de la etapa 4; 3) inclusiones secundarias bifásicas (L+V) y trifásicas (L+V+S), con grado de relleno > 0,95, presentes en fluorita y cuarzo de la etapa 4. Los datos microtermométricos obtenidos indican que el sistema químico dominante en inclusiones de ambos

estadios (etapa 4 y vetilleo tardío) es $\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2-\text{NaCl}-\text{CH}_4$, basados en temperaturas eutécticas inferiores a $-100\text{ }^\circ\text{C}$ y de fusión final de los sólidos (hidrohalita-antartacita) cercanas a $-50\text{ }^\circ\text{C}$. Asimismo, las salinidades totales ($\text{NaCl}+\text{CaCl}_2$) calculadas varían en el rango de 15 a 27 % en peso (etapa 4) y de 15 a 34 % en peso (vetilleo), y las temperatura de homogenización de 325 a $450\text{ }^\circ\text{C}$ para los dos estadios. Por su parte, las asociaciones de inclusiones fluidas secundarias de la etapa 4 son de menor temperatura ($<300\text{ }^\circ\text{C}$) y salinidades totales inferiores a 30 % en peso.

Los datos isotópicos de $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ en calcita indican distintas tasas de interacción fluido/roca, representadas por variaciones entre firmas magmáticas típicas y valores de carbonatos marinos. De este modo, los exoskarns exhiben los valores claramente más magmáticos ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}=14,81$ a $18,08\text{‰}$ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}=-6,87$ a $-3,25\text{‰}$), seguidos por los mármoles ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}=14,56$ a $21,26\text{‰}$ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}=-7,99$ a $-0,93\text{‰}$), los sulfuros masivos ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}=14,61$ a $21,05\text{‰}$ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}=-2,57$ a $-0,2\text{‰}$) y las calizas frescas ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}=19,46\text{‰}$ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}=0,65\text{‰}$). Las estructuras como venas de calcita y brechas hidráulicas muestran mayor dispersión en los datos, que responde al reequilibrio isotópico con el respectivo material encajonante. Por su parte, las relaciones de $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ varían en un rango estrecho (de $-3,5$ a $1,5\text{‰}$), incluido dentro de los valores definidos para el azufre magmático, muy ligeramente modificados por interacción con el encajonante.

Las edades obtenidas mediante el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en adularia de la etapa principal de mineralización exhiben mesetas en $37,48 \pm 0,09$ y $37,62 \pm 0,09$ Ma, e isócronas inversas de $37,47 \pm 0,13$ a $37,47 \pm 0,3$ Ma. Estas edades son correlacionables con el magmatismo félsico del Oligoceno de la Sierra de Santa María, con los cuerpos intrusivos del sector suroriental de la Sierra Madre Occidental y con otros skarns polimetálicos del Sector Transversal de Parras, que prevalecieron durante el Eoceno Superior-Oligoceno.

Los fluidos relacionados con el vetilleo tardío y el estadio mineralizante en el cuerpo de Santa María, representan fracciones reequilibradas y neutralizadas de los fluidos magmáticos/metasomáticos de alta temperatura, que circularon por la secuencia carbonatada y adquirieron parte de sus características. Este proceso está soportado por: 1) la amplia influencia de las rocas sedimentarias reflejada en los isótopos de oxígeno y carbono, 2) la ligera dispersión en los datos de isótopos de azufre, 3) la presencia de metano en las inclusiones fluidas y 4) la mineralogía calcisilicatada ubicua. Asimismo, estos fluidos se caracterizaron por poseer un pH neutro a ligeramente alcalino, fugacidades de oxígeno similares o inferiores al *buffer* FMQ, es decir, predominantemente reductoras, y fugacidades de azufre aproximadamente constantes, definiendo variaciones entre condiciones de sulfuración intermedia y baja. Cuando estos fluidos alcanzaron rangos térmicos cercanos a $400\text{ }^\circ\text{C}$ y salinidades intermedias a bajas, los ligandos transportadores de los metales se desestabilizaron, ocasionando el depósito de los sulfuros. Por tanto, los mecanismos principales de precipitación mineral fueron enfriamiento conductivo, dilución y neutralización de los fluidos mineralizantes por la interacción con el encajonante y por interacción con posibles aguas connatas y/o de circulación profunda.

ABSTRACT

The Velardeña Mining District (Zn-Pb-Ag) is located in the north-eastern portion of Durango, 60 km southwest of Torreón, and belongs to the westernmost termination of the Sector Transversal de Parras (Sierra Madre Oriental) close to the contact with Sierra Madre Occidental and Mesa Central. Santa María mineralized body is one of the multiple deposits within the district and is developed at the contact between an Oligocene felsic to intermediate dyke and a carbonate succession, Albian-Cenomanian in age. This deposit is a skarn system developed during three different stages, each one with particular features: prograde and retrograde phases, and late veins-veinlets.

The prograde phase is developed due to high temperature (HT; >600 °C) magmatic-metasomatic fluids exsolved from the dyke, which migrated progressively through Cuesta del Cura carbonate succession, producing a strong metasomatism and, subsequently, the formation of anhydrous skarns (exoskarns) composed of calc-silicate minerals such as: garnet, vesuvianite, wollastonite, calcite and quartz. These fluids also affected igneous rocks and produced biotite-dominated potassic alteration. Differently, retrograde stage is characterized by an abundant and diverse mineralogy, generated during retrograding and low temperature alterations of prior HT associations. Most common minerals are actinolite, tremolite, epidote, chlorite, quartz, calcite, muscovite, sericite, pseudorhomboidal adularia, fluorite, tourmaline, among others, and relate strongly with the ore (stage 4), made up mainly by sphalerite and pyrite, with minor amounts of arsenopyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, galena, fahlores and Pb sulfosalts. As a final process, calcite veins and veinlets (<5 cm) crosscut other lithologies and might be accompanied by arsenopyrite, pyrite, chalcopyrite, sphalerite, galena, and fahlores.

Chemical compositions were used to characterize mineral phases (arsenopyrite, garnet, fahlore, magnetite and Pb sulfosalts) and estimate their crystallization conditions. Arsenopyrite composition is defined within a narrow interval, its atomic percentages of 30 to 33.5 at.% of As and 32.5 to 34 at.% of Fe and association with other Fe sulfides (pyrite, pyrrhotite or pyrite-pyrrhotite), indicate temperatures of 370-490 °C. Garnet compositions describe a solid solution between $\text{Gr}_{36}\text{Adr}_{34}\text{Psp}_{30}$ and $\text{Gr}_{38}\text{Adr}_{32}\text{Psp}_{30}$. Fahlores show two main tendencies: 1) hakite-tennantite (veins and veinlets) with $\text{Ag}/(\text{Ag}+\text{Cu}) < 0.15$ and $0.3 < \text{Zn}/(\text{Zn}+\text{Fe}) < 0.7$, indicating temperatures lower than 170 °C; 2) freibergite-tetrahedrite-hakite (massive sulfides) with $\text{Ag}/(\text{Ag}+\text{Cu}) > 0.25$ and $0.1 < \text{Zn}/(\text{Zn}+\text{Fe}) < 0.9$, defining intermediate (*ca.* 300 °C) and low temperatures (*ca.* 170 °C). Pb sulfosalts belong to lillianite-gustavite and heyrovskyite-eskimoite series, with up to 6.2 wt.% of Se. Finally, magnetite belongs to magnetite-wüstite solid solution and display trace amounts of Mg, Al, Ti, Cr, Mn, Co, Ni and Zn.

Three main fluid inclusion assemblages were recognized and described microscopically: 1) primary and pseudosecondary biphasic (L+V) and occasionally triphasic (L+V+S) fluid inclusions, with high degree of fill (0.8-0.9), trapped in sphalerite, quartz, calcite and fluorite from stage 4 (ore formation); 2) primary monophasic (V), biphasic (L+V), triphasic (L+V+S) and multisolid (L+V+S₁+S₂) fluid inclusions hosted by calcite from veins and, locally, by quartz associated to massive sulfides; 3) secondary biphasic (L+V) and triphasic (L+V+S) fluid inclusions, with very high degree of fill (>0.95), in fluorite and quartz from stage 4. Fluid inclusions microthermometry data suggest that the dominant chemical system is H₂O-CaCl₂-NaCl-CH₄ for both massive sulfide and vein phases, due to low eutectic temperatures (≤ -100 °C) and hydrohalite-antarcticite final melting temperature close to -50 °C. Additionally, total salinity values (NaCl+CaCl₂) for stage 4 and vein stage are 15-27 wt.% and 15-34 wt.%, respectively, and homogenization temperatures from 325 to 450 °C for both

phases. On the other hand, secondary associations display lower temperatures (<300 °C) and total salinities lower than 30 wt.%.

Isotopic $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ analysis made in calcite suggest different fluid/rock interaction ratios, producing purely magmatic, sedimentary (marine carbonates) and mixed signatures. Thus, exoskarns display clearly magmatic values ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = 14.81$ to 18.08‰ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = -6.87$ to -3.25‰), followed by marbles ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = 14.56$ to 21.26‰ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = -7.99$ to -0.93‰) and massive sulfides ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = 14.61$ to 21.05‰ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = -2.57$ to -0.2‰), while unaltered limestones represent the other endmember ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = 19.46\text{‰}$ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = 0.65\text{‰}$). C and O isotopes from calcite veins, veinlets and hydraulic breccias show greater dispersion due to isotopic re-equilibration with host rocks. Moreover, $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ values vary within a narrow interval (-3.5 a 1.5‰) very close to 0‰, diagnostic of magmatic sulfur, somewhat modified by the influence of sedimentary rocks.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis were carried out in adularia from the ore stage, showing plateau ages of 37.48 ± 0.09 and 37.62 ± 0.09 Ma and inverse isochrone ages of 37.47 ± 0.13 to 37.47 ± 0.3 Ma. These ages are similar to those reported for the felsic magmatism at Sierra de Santa María, for several intrusive bodies at the southeastern sector of the Sierra Madre Occidental and for multiple polymetallic skarns along the Sector Transversal de Parras (Upper Eocene to Lower Oligocene).

In summary, fluids responsible for the main mineralizing phase and late veins-veinlets in Santa María mineralized body, represent re-equilibrated and neutralized portions of high-temperature metasomatic waters, which might have circulated through the carbonate succession and inherited some of its features. This hypothesis is based upon: 1) the high influence of limestones in oxygen and carbon stable isotopes values, 2) the slight dispersion observed in sulfur isotopes, 3) the presence of methane in fluid inclusion assemblages, and 4) the ubiquitous calcsilicate mineralogy. In addition, these fluids had neutral to slightly alkaline pH, oxygen fugacity close or below the FMQ buffer (dominantly reduced conditions) and sulfur fugacity consistent with low to intermediate sulfidation fields. Once these fluids reached 400 °C and intermediate salinities, major metal transporting ligands (chloride complexes) were destabilized, inducing metal deposition. Hence, the main precipitation mechanisms were conductive cooling, fluid dilution and neutralization of mineralizing fluids during interaction with carbonate host rocks and their pore waters.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Planteamiento del problema	4
1.2	Justificación	5
1.3	Objetivos	5
1.4	Hipótesis	5
2	ESTADO DEL ARTE DE LOS DEPÓSITOS TIPO SKARN	6
2.1	Contexto tectónico y rocas asociadas	6
2.2	Depósitos relacionados	8
2.3	Clasificación y mineralogía de los skarns y depósitos tipo skarn	8
2.3.1	Depósitos de tipo skarn de Cu	10
2.3.2	Depósitos tipo skarn de Fe	11
2.3.3	Depósitos tipo skarn de W	12
2.3.4	Depósitos tipo skarn de Zn-Pb	13
2.3.5	Depósitos tipo skarn de Au	13
2.3.6	Depósitos tipo skarn de Mo	13
2.3.7	Depósitos tipo skarn de Sn	14
2.4	Origen y evolución	14
2.4.1	Fluidos mineralizantes	14
2.4.2	Secuencia de evolución	15
3	MARCO GEOLÓGICO	16
3.1	Geología regional	16
3.2	Geología local	19
3.2.1	Formación Aurora	19
3.2.2	Formación Cuesta del Cura	20
3.2.3	Formación Indidura	22
3.2.4	Formación Caracol	22
3.2.5	Formación Ahuichila	22
3.2.6	Cuerpos ígneos	23
3.3	Geología estructural	24
4	METODOLOGÍA	25
4.1	Bibliografía y selección de muestras	25

4.2	Petrografía y minerografía _____	25
4.3	Microscopía electrónica de barrido _____	26
4.4	Microsonda electrónica (EMPA) _____	26
4.5	Isótopos estables _____	27
4.5.1	Carbono y oxígeno _____	27
4.5.2	Azufre _____	27
4.6	Petrografía y microtermometría de inclusiones fluidas _____	28
4.7	Espectroscopía infrarroja _____	28
4.8	Fechaientos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ _____	28
5	MINERALOGÍA Y QUÍMICA MINERAL DEL CUERPO DE SANTA MARÍA _____	29
5.1	Descripción macroscópica _____	29
5.1.1	Rocas sedimentarias sin metamorfismo _____	29
5.1.2	Rocas ígneas _____	29
5.1.3	Mármoles _____	31
5.1.4	Exoskarns _____	31
5.1.5	Brechas hidráulicas _____	31
5.1.6	Sulfuros masivos _____	31
5.2	Mineralogía de mena y ganga _____	32
5.2.1	Wackestones _____	32
5.2.2	Mármoles _____	33
5.2.3	Exoskarns _____	35
5.2.4	Brechas _____	40
5.2.5	Rocas ígneas _____	41
5.2.6	Sulfuros masivos _____	48
5.2.7	Venas de calcita _____	50
5.3	Secuencia paragenética _____	50
5.4	Química mineral _____	53
5.4.1	Granate _____	54
5.4.2	Arsenopirita _____	55
5.4.3	Cobres grises _____	57
5.4.4	Sulfosales de Pb-Bi-Se _____	60
5.4.5	Magnetita _____	60

6	PETROGRAFÍA Y MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS	61
6.1	Petrografía de inclusiones fluidas	61
6.1.1	Etapa prógrada	66
6.1.2	Evento de mineralización principal (etapa 4)	66
6.1.3	Vetillas de calcita no mineralizadas	72
6.1.4	Vena de calcita mineralizada	73
6.2	Microtermometría de inclusiones fluidas	75
6.2.1	Etapa prógrada	80
6.2.2	Evento de mineralización principal (etapa 4)	81
6.2.3	Vetillas y venas de calcita tardías	83
7	ESTUDIOS ISOTÓPICOS	85
7.1	Isótopos estables de carbono y oxígeno en calcita	85
7.2	Isótopos estables de azufre en sulfuros	86
7.3	Fecha mientos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	88
8	DISCUSIÓN	89
8.1	Origen, características y tipología del cuerpo mineralizado de Santa María	89
8.2	Naturaleza de los fluidos mineralizantes y evolución del depósito	94
8.3	Mecanismos de precipitación mineral	99
8.4	Relación con otras zonas mineralizadas del Distrito Minero de Velardeña	100
9	APLICACIONES A LA INDUSTRIA MINERA Y BENEFICIO A LA COMUNIDAD	103
10	CONCLUSIONES	104
11	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
12	ANEXOS	113
12.1	Descripción macroscópica y microscópica	113
12.2	Isótopos estables	168
12.3	Química mineral	170
12.4	Fecha mientos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	178

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Mapa geológico G13-D44 Velardeña (SGM, 1997). C.I.: Complejo Intrusivo, SMOcc: Sierra Madre Occidental, SMOOr: Sierra Madre Oriental, MC: Mesa Central.	2
Figura 2. Modelo de formación de las mineralizaciones metálicas en la sierra de Santa María. Tomado de Jiménez-Franco (2012).	4
Figura 3. Ambientes tectónicos favorables para la generación de las distintas variedades de depósitos tipo skarn. Tomado de Meinert et al. (2005).	7
Figura 4. Características geoquímicas de los magmas relacionados con los distintos tipos de depósitos skarn. A. Diagrama AFM (Irvine y Baragar, 1971), donde se aprecia una afinidad mayoritariamente calcialcalina. B. Diagrama de K ₂ O vs SiO ₂ (% en peso), mostrando una diferenciación progresiva de los magmas relacionados con cada tipo de skarn, desde Fe en las rocas menos evolucionadas, hasta Sn y Mo en el extremo más diferenciado. Tomado de Meinert et al. (2005).	7
Figura 5. Modelo de sistema tipo pórfido cuprífero con depósitos de skarn y epitermales relacionados. Tomado de Sillitoe (2010).	8
Figura 6. Tipos de rocas calcisilicatadas generadas por la intrusión de un plutón en una sucesión siliciclástica y carbonatada. Modificado de Meinert et al. (2005). SR=skarn de reacción.	9
Figura 7. Distribución global de los principales depósitos tipo skarn de cada tipo. Tomado de Misra (2000).	10
Figura 8. Fotografías de granate (Grt) cálcico de color marrón rojizo (proximal), y verde pálido (distal) en el skarn de Payandé, Colombia. Fotografías por Andrés Felipe González Durán.	11
Figura 9. Secuencia de evolución típica en la formación de los depósitos tipo skarn. Modificado de Meinert (1992). Grt: granate, Px: piroxeno, CaSi: calcisilicatado.	15
Figura 10. Ubicación del Distrito Minero de Velardeña, localizado cerca del contacto entre la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central, e influenciado por la tectónica extensional de las Sierras y Cuencas mexicanas. Modificado de Nieto-Samaniego et al. (2005). SMA: San Miguel de Allende, SLP: San Luis Potosí, Qro: Querétaro.	17
Figura 11. Columna estratigráfica simplificada del área de Velardeña. La zona sombreada representa las mineralizaciones de tipo skarn. Modificado del Servicio Geológico Mexicano (1997).	20
Figura 12. Comparación entre la litoestratigrafía de la Sierra de Parras propuesta por Imlay (1936, 1937) y la de Lehmann et al. (1999). Tomado de Lehmann et al. (1999).	21
Figura 13. Modelo generado por Industrias Peñoles donde se muestra la morfología de los cuerpos de Santa María y Antares Norte. Asimismo, se presenta la distribución de los barrenos empleados en esta Tesis (SMBD-42, SMBD-43, SMBD-58 y SMBD-71). Las líneas punteadas representan los límites de cada cuerpo (Antares en amarillo y Santa María en azul cielo). Fuente: Industrias Peñoles (2010).	25
Figura 14. Fotografías de los núcleos más representativos de las litologías que componen el cuerpo mineralizado de Santa María. Apy: arsenopirita, Cal: calcita, Chl: clorita, Fl: fluorita, Grt: granate, Py: piritita, Qz: cuarzo, Ser: sericita, Sp: esfalerita, Wol: wollastonita.	30
Figura 15. Fotomicrografías de wackestone de peloides con mineralización de piritita y esfalerita. A y B. Microesparita, posibles foraminíferos (Foram) y peloides de micrita, cortados por vetillas sinuosas de calcita (Cal). C. Vena de calcita de aspecto terroso al núcleo y limpio al borde. D.	

- Agregados de pirita (Py) diseminados y superpuestos a las vetillas y a la microesparita. También se aprecian masas de materia orgánica superpuestas y embebiendo un grano de turmalina (Tur). E. Pirita con textura ojo de pájaro, en asociación con arsenopirita (Apy) dentro de masas de esfalerita (Sp) con inclusiones de pirrotina (Po). F. Agregados de pirita con rellenos intercrystalinos de esfalerita..... 33
- Figura 16. Fotomicrografías de los mármoles. A. Vena de calcita (Cal) dividiendo un dominio textural de grano muy fino de uno de grano fino. Nótese la forma poligonal de la calcita y la formación de ángulos diedros, causados por la recristalización estática durante el metamorfismo térmico. B. Agregados de serpentina (Srp) entre cristales de calcita. C y D. Ramilletes de tremolita-actinolita (Tr-Act), granate (Grt) diseminado y wollastonita (Wol) como fases accesorias..... 34
- Figura 17. Fotomicrografías de la mineralización metálica relacionada con los mármoles. A. Esfalerita (Sp) marrón rojiza con inclusiones tabulares de cuarzo (Qz). B. Agregados masivos de sericita (Ser) y clorita (Chl), en asociación con opacos (Op) de grano fino. Cortando, aparecen vetillas sinuosas y continuas de calcita (Cal). C y D. Galena (Gn) tardía de textura intersticial entre pirita (Py) y arsenopirita (Apy), reemplazando a la esfalerita. E. Cobres grises (Fhl) en asociación con pirita y galena, e incluidas en esfalerita. F. Exsoluciones lamerales en enrejado de calcopirita (Ccp) en esfalerita. 35
- Figura 18. Fotomicrografías de la asociación prógrada de los exoskarns. A y B. Porfirblastos idiomórficos de granate (Grt) compuestos por núcleos incoloros (grosularia-Grs) y bordes amarillos (andradita-Adr). Véanse además agregados radiales de wollastonita (Wol) asociados. C. Wollastonita en cristales fibrosos radiales asociados con granate. D. Cristales tabulares de vesubianita (Vsv) asociada con granate y calcita (Cal)..... 36
- Figura 19. Fotomicrografías de los minerales retrógrados en los exoskarns. A. Pseudomorfos de granate (Grt) y wollastonita (Wol), en calcita (Cal), clorita (Chl) y cuarzo (Qz). B. Masas de actinolita (Act) con opacos (Op), desarrolladas entre granates. C. Rellenos intersticiales de calcita-tremolita (Cal-Tr) entre granates. D. Reemplazamiento pervasivo de sericita-clorita (Ser-Chl), con parches de óxidos de Fe (FeOx) y vetillas de calcita. E. Agregados de biotita verde (Bt) y moscovita (Ms) embebidos en masas de clorita. F. Parches de zoisita-clinozoisita (Zo-Czo) y calcita sobre granate y wollastonita. G. Poiquiloblastos de granate incoloro en asociación con calcita, tremolita y minerales opacos. H. Adularia (Adl) en cristales irregulares y en rellenos. 37
- Figura 20. Fotomicrografías de minerales de la asociación entre los minerales de mena y la paragénesis retrógrada de los exoskarns. A. Agregados de clorita (Chl) acicular, intercrecida con esfalerita (Sp) y minerales opacos (Op). B. Mineralización masiva compuesta por opacos, fluorita (Fl), masas de moscovita (Ms), clorita acicular, y calcita (Cal). C. Pseudomorfos de granate en calcita y clorita, con rellenos intersticiales de cuarzo (Qz) y opacos. D. Vetilla de cristales euhedrales de pirita (Py) rodeados por clorita. 38
- Figura 21. Fotomicrografías de los minerales de mena en los exoskarns. A. Textura simplectítica entre pirita (Py) y esfalerita (Sp). B. Arsenopirita (Apy) con textura intersticial, desarrollada entre los cristales de pirita. C. Esfalerita masiva con inclusiones de arsenopirita y sulfosal de Pb (Ss), y abundantes exsoluciones lamelares de calcopirita (Ccp) y pirrotina (Po). D. Magnetita (Mag) en asociación estrecha con esfalerita, e inclusión muy fina de proustita-pirargirita (Pst-Pyr). E. Acercamiento a proustita-pirargirita incluida en esfalerita enferma. F. Esfalerita, galena (Gn) y pirrotina, cortadas por vetillas de marcasita (Mrc). 39

- Figura 22. Fotomicrografías de vetillas tardías de calcita-cuarzo. A. Minerales opacos (Op) cortados por estructuras de calcita (Cal). B. Vetillas de calcita, opacos (Op) y cuarzo (Qz), que presentan variedad de texturas entre las que resaltan: en empalizada, mosaico y masiva. C. Vetillas de calcita (Cal) en empalizada. D. Relleno de prehnita (Prh) en vetilla de calcita. 40
- Figura 23. Fotomicrografías de brechas hidráulicas y cataclásitas. A. Matriz de la brecha, compuesta por calcita (Cal), sericita (Ser), apatito (Ap) y opacos (Op) muy finos local fina. B. Clasto de sulfuro masivo compuesto por esfalerita (Sp) zonada con núcleos ricos en Fe, y abundantes inclusiones de minerales opacos. C. Esfalerita enferma con múltiples exsoluciones de calcopirita (Ccp), asociada con pirita (Py) y galena (Gn), y rodeada por pirita-marcasita (Py-Mrc). D. Cristales intersticiales de galena desarrollados entre agregados de pirita. E. Contacto entre la roca y la brecha, donde se aprecian el cambio abrupto en el tamaño de los cristales y la molienda. F. Inyección de minerales opacos en la brecha, siguiendo las zonas más permeables. 41
- Figura 24. Fotomicrografías de rocas ígneas de composición tonalítica y dacítica-andesítica (?). A y B. Textura holocristalina de la roca, conformada por cristales subhedrales de plagioclasa (Pl) ligeramente sericitizada (Ser), y cuarzo (Qz) intersticial. C. Enclave de roca tonalítica en andesita-dacita (?) con alteración pervasiva. D. Pseudomorfos de fenocristales de cuarzo beta (Qz β) en cuarzo alfa, rodeados por matriz (Mx) alterada. 42
- Figura 25. Fotomicrografías de alteraciones potásica y calcsilicatada en rocas ígneas. A. Alteración potásica de biotita (Bt), algunos de los cristales rodeados por tremolita (Tr). B. Biotita hidrotermal rodeada por masas de actinolita (Act). C. Pseudomorfos rómbicos reemplazados en calcita (Cal), tremolita y opacos (Op). D. Parches de actinolita cortados por vetillas rectilíneas de escapolita (Scp), opacos y actinolita. 43
- Figura 26. Fotomicrografías de alteraciones sericítica y propilítica en las rocas ígneas. A. Pseudomorfos tabulares completamente reemplazados en sericita (Ser) y pirita (Py) muy fina. B. Vetillas discontinuas de calcita (Cal)-clorita (Chl)-epidota (Ep) y continuas muy delgadas de calcita. C. Vetillas tardías de calcita y clorita manchadas por óxidos de Fe (FeOx) y con halos de sericita (Ser). D. Zona de contacto entre roca ígnea y sulfuro masivo, con desarrollo de sericita pervasiva y en parches, localmente asociada con pirita (Py). 44
- Figura 27. Fotomicrografías de alteración adularia-cuarzo \pm sericita en rocas ígneas. A. pseudomorfos de fenocristales de plagioclasas reemplazados por adularia (Adl). B. Alteración cuarzo-sericítica (Qz-Ser) pervasiva. C. Cristales euhedrales de adularia asociados con minerales opacos (Op). D. Fluorita (Fl) masiva con inclusiones rómbicas de adularia. E. Arsenopirita (Apy) masiva, esfalerita (Sp) y pirita (Py), con inclusiones de pirrotina (Po) y calcopirita (Ccp). F. Intercrecimientos de arsenopirita, esfalerita y adularia, rodeados por esfalerita. G. Vetillas de cuarzo cortadas por otras de calcita (Cal), ambas encajadas en roca con alteración de adularia-cuarzo \pm sericita pervasiva. H. Vetillas de cuarzo, calcita, opacos y fluorita. 45
- Figura 28. Fotomicrografías de la asociación de sulfuros y sus minerales de ganga. A. Asociación de pirita, calcopirita y galena con reemplazamiento parcial de cobres grises (Fhl). B. Imagen BSE de intercrecimientos entre sulfosales de Cu-Ag-Fe-Zn, de la serie tetraedrita (Ttr)-tenantita (Tnt)-freibergita (Fbg). C. Inclusiones de cuarzo (Qz) en esfalerita. D. Esfalerita marrón con fluorita (Fl), cuarzo y calcita (Cal) acicular. 46
- Figura 29. Fotomicrografías de texturas en los sulfuros masivos desarrollados en las rocas ígneas. A. Agregados botrioidales de pirita (Py) y galena (Gn). B. Vetilleo de arsenopirita (Apy) con

esfalerita (Sp), atravesando intercrecimientos de esfalerita, pirita y arsenopirita. C. Intercrecimientos de arsenopirita, galena y esfalerita. D. Galena intersticial entre cristales de pirita. E. Agregados de marcasita (Mrc) de alteración a partir de minerales preexistentes. F. Reemplazamiento parcial de arsenopirita por pirrotina (Po). G. Cristales masivos de esfalerita (Sp) cortados por vetillas de pirita fina y calcopirita, con textura enferma denotada por abundantes inclusiones de galena y calcopirita. H. Pirita con textura brechada e inclusiones de galena.	47
Figura 30. Fotomicrografías de la asociación principal en los cuerpos de sulfuros masivos. A. Sulfosal de Pb (Ss) con esfalerita (Sp), arsenopirita (Apy) y pirrotina, esta última reemplazada por marcasita (Mrc). B. Esfalerita, calcopirita (Ccp), arsenopirita (Apy), galena (Gn), cobres grises (Fhl) y pirita. C. Esfalerita interpenetrada con clorita (Chl). D. Cuarzo (Qz) y agregados radiales de turmalina (Tur) con esfalerita.	48
Figura 31. Fotomicrografías de texturas en sulfuros masivos. A. Pirita (Py) intersticial entre arsenopirita (Apy). B. Arsenopirita rodeando cristales de pirita. C. Cristal masivo de esfalerita (Sp) con zonación composicional e inclusiones de opacos (Op) y cuarzo (Qz). D. Esfalerita enferma con múltiples inclusiones de pirita y calcopirita. E. Cristales de pirita reemplazados parcialmente por masas de marcasita-pirita (Mrc), y cortada por vetilla de carbonato (Cb) con pirita dendrítica. F. Arsenopirita con núcleos de pirrotina (Po) en asociación con esfalerita. G. Vetilla de arsenopirita y esfalerita cortando agregados de pirita. H. Intercrecimientos complejos entre esfalerita, arsenopirita, pirita y calcopirita.....	49
Figura 32. Fotomicrografías de la mineralogía que compone las venas tardías de calcita. A y B. Cristales masivos de calcita (Cal) de la vena, con zonación denotada por los intercrecimientos con minerales opacos (Op) y por inclusiones fluidas (FIAs). C. Textura en empalizada en cristales de calcita. D. Rellenos locales de calcedonia (Chld). E. Agregados tabulares de barita (Brt). F. Líticos (Li) de rocas ígneas con alteración de adularia-cuarzo-sericita. G. Cobres grises (Fhl), esfalerita (Sp), arsenopirita (Apy), calcopirita, pirita y galena (Gn). H. Imagen BSE de intercrecimientos entre hakita (Hkt) y tenantita (Tnt).	51
Figura 33. Secuencia paragenética general del cuerpo mineralizado de Santa María.	52
Figura 34. Diagrama composicional de granates con los campos definidos para skarns de cada tipo. Modificado de Einaudi y Burt (1982).	54
Figura 35. Diagrama de FeO vs Al ₂ O ₃ (% en peso) para los granates en un exoskarn del cuerpo de Santa María.	54
Figura 36. Diagrama triangular Fe-S-As para los cristales de arsenopirita que componen los sulfuros masivos del cuerpo mineralizado de Santa María. El campo poligonal representa la composición típica de la arsenopirita naturale. Modificado de Kretschmar y Scott (1976).	55
Figura 37. Transectas borde-núcleo-borde de dos cristales de arsenopirita con zonación reconocida petrográficamente y en imágenes de electrones retrodispersados. SM-43-12 (arsenopirita-pirita) y SM-43-21 (arsenopirita-pirita-pirrotina).....	56
Figura 38. Geotermómetro de la arsenopirita indicando temperaturas de entre 370-490 °C para los sulfuros masivos y ca. 370 °C para las venas de calcita mineralizadas. Modificado de Sharp et al. (1985).....	57
Figura 39. Sulfosales de Santa María graficadas en el espacio definido por los miembros extremos del sistema Ag-Cu-Zn-Fe-As-Sb. Modificado de Sack et al. (2005).....	58
Figura 40. Proyección de los cobres grises de Santa María en diagramas X vs Y (% en peso).	58

Figura 41. Geotermómetro definido en el diagrama $Zn/(Zn+Fe)$ vs $Ag/(Ag+Cu)$, que indica temperaturas inferiores a 170 °C para los cobres grises de las venas tardías y de entre 170 °C y ca. 300 °C para los cobres grises de los sulfuros masivos. Modificado de Sack (2005). T: tendencia.....	59
Figura 42. Clasificación de sulfosales de Bi-Pb-Se del cuerpo de Santa María en el diagrama triangular $(Ag+Cu)-(Bi+Sb)-Pb$. Modificado de Buzati et al. (2015).	60
Figura 43. Diagrama composicional de óxidos de Fe-Ti y gráfico comparativo para magnetita de Santa María y de distintos tipos de depósitos. A. Diagrama composicional de óxidos de (Fe^{2+},Mg,Mn) , $(Fe^{3+},Al)_2$ y Ti. Modificado de Ivanyuk et al. (2017). B. Modelo radial mostrando ligeras similitudes entre las trazas de magnetita del cuerpo de Santa María y aquella de otros depósitos de Zn-Pb-Ag.	61
Figura 44. Asociaciones de inclusiones fluidas (IF) primarias, secundarias y pseudosecundarias, identificadas en las etapas prógrada, retrógrada (etapa 4) y tardía del cuerpo de Santa María. P: IF primarias, S: IF secundarias, PS: IF pseudosecundarias, L: líquido, V: vapor, S_1 : halita, S_2 : minerales opacos, S_3 : mineral traslúcido tabular, S_4 : mineral traslúcido circular, red.: redondeado, tab.: tabular, F: forma, GR: grado de relleno, MP: modificaciones post-atrapamiento, Eb: ebullición, S: sólidos.	62
Figura 45. Inclusiones fluidas primarias en granates de la fase prógrada. Nótese reequilibrio de éstas evidenciado por morfologías poligonales.	66
Figura 46. Inclusiones fluidas (IF) primarias en esfalerita. A-C. IF bifásicas con morfologías de cristal negativo. D. IF multisólida con cristal hijo de halita (S_1) y atrapado de un mineral opaco (S_2). E-F. IF trifásicas con cristales atrapados de opacos. G-I. Estrangulamiento parcial y total en inclusiones fluidas bifásicas.....	67
Figura 47. Inclusiones fluidas secundarias intragranulares (A) y pseudosecundarias (B) en esfalerita.	68
Figura 48. Tipos de inclusiones fluidas (IF) primarias en cuarzo. A. IF bifásica con morfología de cristal negativo. B y C. IF trifásicas con cristales atrapados de halita (S_1) y un mineral opaco (S_2), y grado de relleno variable entre 0,85 y 0,95. D-F. Asociación de inclusiones fluidas ricas en vapor, bifásicas con grados de relleno variable, trifásicas ($L+V+S_1$) y multisólidas ($L+V+S_1+S_2$) evidenciando ebullición en el sistema.	68
Figura 49. Inclusiones fluidas pseudosecundarias bifásicas ($L+V$) en cuarzo.....	69
Figura 50. Tipos de inclusiones fluidas (IF) primarias en calcita. A. IF bifásica del tipo 1. B. IF trifásica ($L+V+S_3$) con un sólido atrapado de gran tamaño. C y D. Asociación de inclusiones fluidas ricas en vapor, bifásicas y trifásicas ($L+V+S_1$) con cristal hijo de halita (tipo 3). E. IF bifásica del tipo 4. F. IF bifásica con morfología de cristal negativo.	70
Figura 51. Asociación de inclusiones fluidas secundarias transgranulares en calcita, de carácter monofásico (V), bifásico ($L+V$) y trifásico ($L+V+S$), indicativas de ebullición.	70
Figura 52. Inclusiones fluidas (IF) primarias en fluorita. A. IF trifásicas primarias ($L+V+S_1$) del tipo 1. B. IF bifásicas ($L+V$) del tipo 2. C. IF bifásicas ($L+V$) del tipo 3. D-F. IF secundarias en fluorita. D-E. Familia de inclusiones fluidas monofásicas (V), bifásicas ($L+V$), trifásicas ($L+V+S_1$) y multisólidas ($L+V+S_1+S_2$), evidenciando ebullición (tipo 1). F-G. IF bifásicas ($L+V$) asociadas con inclusiones trifásicas ($L+V+S_1$) con sólidos atrapados (tipo 2). H. IF trifásica ($L+V+S_1$) del tipo 3. I. IF bifásica ($L+V$) del tipo 4.	71

Figura 53. Inclusiones fluidas (IF) primarias en calcita de las vetillas no mineralizadas del evento tardío. A-B. IF primarias bifásicas (L+V) y trifásicas (L+V+S) con grados de relleno variados, dispuestas al azar en los cristales. C. IF con sólido atrapado de gran tamaño (S_1). D-F. Asociación de inclusiones fluidas monofásicas (V), bifásicas (L+V y V+L) y trifásicas (L+V+S), indicativas de ebullición en el medio.	72
Figura 54. Inclusiones fluidas (IF) primarias en calcita. A. Grandes IF bifásicas (L+V) relacionadas con el crecimiento esquelético del mineral. B y C. IF primarias con indicios de estrangulamiento.	73
Figura 55. Inclusiones fluidas pseudosecundarias (PS) y secundarias (S) en cristales de calcita del evento tardío. Véase inclusión fluida primaria (P) con forma cuadrada en la parte inferior derecha de la imagen A.	73
Figura 56. Inclusiones fluidas (IF) primarias características de la vena de calcita mineralizada. A-D. IF bifásicas (L+V) y trifásicas (L+V± S_1 ± S_2) del tipo 1 y 2 (T1 y T2) en calcita, con grados de relleno de ca. 0,8 a 0,9 y sólidos opacos atrapados (S_2). E. IF primaria con reequilibrio, atrapada en calcita. I. IF primaria con estrangulamiento parcial.	74
Figura 57. Inclusiones fluidas pseudosecundarias (PS) en calcita de la vena mineralizada, con formas redondeadas y grado de relleno cercano a 0,8. Véanse escasas inclusiones fluidas ricas en vapor (V) ligeramente orientadas.	74
Figura 58. Histogramas de T_e y T_f s de las inclusiones fluidas de cada etapa. Las líneas negras representan las T_e de sistemas dominados por cloruros de NaCl, CaCl ₂ , MgCl ₂ y/o FeCl ₂ , y el punto de fusión del metano (CH ₄).	77
Figura 59. Espectro de infrarrojo mostrando absorción en bandas típicamente asociadas con compuestos del grupo metileno. Los cuadros de color naranja representan los valles distintivos de calcita (vibración de estiramiento del enlace C=O en 1700 cm ⁻¹).	78
Figura 60. Diagrama de fase del sistema H ₂ O-CaCl ₂ -NaCl mostrando la composición de los fluidos en las inclusiones de las diferentes etapas y su trayectoria general de fusión. Véase la distribución de los datos a lo largo de una línea con variaciones ligeras en el contenido de NaCl y muy marcadas en el de CaCl ₂ -H ₂ O, evidenciando procesos de dilución. Tomado de Steele-McInnis et al. (2016). Líneas grises: isothermas.	79
Figura 61. Diagrama de T_h vs T_{ff} -Salinidad total, con trayectorias de evolución del fluido y temporalidad de las asociaciones de inclusiones fluidas. Las flechas azules indican procesos de dilución, la morada enfriamiento conductivo y la naranja ebullición (falsas salmueras). Diagrama de Wilkinson (2001) presentado en la parte superior izquierda, donde D: despresurización, C: calentamiento, MI: mezcla isotérmica, DFS: dilución por fluidos superficiales, EBS: ebullición a baja salinidad, E: enfriamiento, P: profundización.	80
Figura 62. Histogramas para valores de T_e , T_{ff} y T_h de inclusiones fluidas secundarias en granate.	80
Figura 63. Histogramas para valores de T_e , T_{ff} y T_h de las inclusiones fluidas en esfalerita, calcita, fluorita y cuarzo del evento mineralizante principal (etapa 4).	81
Figura 64. Trayectoria de fusión y homogenización de las inclusiones fluidas primarias en esfalerita. Nótese cristalización de hidrohilita (Hh), antarticitita (Ant) y hielo (Ice) a bajas temperaturas.	82
Figura 65. Trayectoria de fusión y homogenización de las inclusiones fluidas secundarias en la fluorita asociadas con el evento mineralizante principal.	82

Figura 66. Histogramas para valores de Tff y Th de asociaciones de inclusiones fluidas secundarias en cuarzo y fluorita.....	83
Figura 67. Histogramas para valores de Te, Tff y Th de inclusiones fluidas en venas de calcita mineralizadas.	83
Figura 68. Trayectoria de fusión y homogenización de las inclusiones primarias de las venas de calcita tardías.....	84
Figura 69. Diagrama $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ vs $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ para las muestras de calcita proveniente de vetillas y rocas caja de las distintas litologías del cuerpo mineralizado de Santa María. Para el análisis de los datos obtenidos se emplearon los valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ para aguas magmáticas, carbonatos marinos y materia orgánica sedimentaria reportados por Sheppard (1984), Zheng y Hoefs (1993), Veizer et al. (1999) y Hoefs (2009), y para unidades carbonatadas del Albiano-Cenomaniano, correlacionables con las unidades Cuesta del Cura y Aurora, como las formaciones El Abra (Armstrong-Altrin et al., 2011), El Doctor (Levresse et al., 2003; Fitz-Díaz et al., 2011) y Tepalcatepec (Zürcher et al., 2001). Asimismo, fueron incluidos los datos del cuerpo mineralizado de Antares (González-Ambrocio, en preparación) y de las rocas carbonatadas de la Plataforma de Valles-San Luis Potosí (Fitz-Díaz et al., 2011), con fines netamente comparativos.	85
Figura 70. Histograma con los valores de $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ para los sulfuros del cuerpo mineralizado de Santa María. SM: sulfuro masivo, Vet.: venas, CM: cuerpo mineralizado, Mc: marcasita, Apy: arsenopirita, Po: pirrotina, Gn: galena, Sp: esfalerita, Py: pirita.....	87
Figura 71. Diagrama de pH vs log fO ₂ , donde las líneas negras indican la diferencia entre los valores de $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ y $\delta^{34}\text{S}_{\text{fluido}}$. El campo de líneas oliva claras representa las condiciones inferidas para el cuerpo de Santa María, con base en criterios mineralógicos. Modificado de Rollinson (1993).	87
Figura 72. Diagrama comparativo de valores de $\delta^{34}\text{S}$ de diferentes fuentes. Modificado de Rollinson (1993) y Seal (2006). 1: González-Ambrocio (en preparación), 2: Jiménez-Franco (2012), 3: Gilmer et al. (1988), 4: Shanks (2014). Mag: magnetita, Ilm: ilmenita. *Los valores en los skarns pueden variar en gran medida, especialmente en los depósitos distales, donde se presenta interacción con la roca encajonante y modificación de la firma isotópica magmática (Shimazaki y Sakai, 1984; Megaw et al., 1988; Zhao et al., 2003; Ault y Williams-Jones, 2004; Meinert et al., 2005).....	88
Figura 73. Fechamientos $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ para adularia pseudoromboédrica de la etapa 4. En la parte superior, se encuentran las edades meseta y en la parte inferior las isócronas inversas respectivas.....	89
Figura 74. Distribución espacial de asociaciones minerales y datos microtermométricos en el cuerpo de Santa María. Abreviaturas minerales presentadas en apartado de petrografía y química mineral. P/R: inclusiones fluidas (IF) en granate, Ret: IF de etapa 4, Vet: IF en vetillas de calcita, Sec: IF secundarias, %P/P: % en peso. Esquema base tomado de Industrias Peñoles (2010)..	90
Figura 75. Condiciones de temperatura, salinidad total (% en peso de NaCl+CaCl ₂), fracción molar de metano y valores isotópicos ($\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$) para cada estadio de formación del cuerpo de Santa María. MT: media temperatura, Et. Prog.: etapa prógrada, AT: alteración hidrotermal de alta temperatura.	91
Figura 76. Diagrama de T vs log fS ₂ , donde se observa la evolución de los fluidos mineralizantes desde temperaturas intermedias-altas (350-500 °C) a intermedias-bajas (ca. 170 °C), a condiciones de	

sulfuración de intermedias a bajas. Modificado de Einaudi et al. (2003) y Camprubí y Albinson (2007), Cv: covelina, Dg: digenita, Bn: bornita, Eng: enargita, Fmt: famatinita.....	93
Figura 77. Distribución del metano, dióxido de carbono y agua a 400 °C y 1,35 Kbar en un fluido del sistema C-O-H, en función a la fugacidad de oxígeno. Nótese la preferencia del CH ₄ por los ambientes reductores, opuesta a la del CO ₂ . La flecha rosada representa una aproximación a las condiciones estimadas para el cuerpo de Santa María. Modificado de Zhang et al. (2019).	96
Figura 78. Comparación entre valores de isótopos de azufre en sulfuros provenientes de los cuerpos mineralizados de Santa María y Antares (González-Ambrocio, en preparación), y otras áreas mineralizadas en las sierras de Santa María y San Lorenzo (Gilmer et al., 1988; Jiménez-Franco, 2012). Los datos más negativos corresponden a muestras de las formaciones Aurora-Cuesta del Cura (-7,23‰) e Indidura-Caracol (-6,02‰).	97
Figura 79. Variación de la firma isotópica en calcita proveniente de calizas, sulfuros masivos, mármoles y skarns, mostrando variaciones acentuadas entre firmas claramente sedimentarias (carbonatos de origen marino) y tendientes a magmáticas.	97
Figura 80. Modelo evolutivo esquemático propuesto para el sistema de skarn en Santa María, explicación en el texto. MO: materia orgánica, FCC: Formación Cuesta del Cura, DSM: Dique de Santa María, FM: frente de marmorización, K: alteración potásica, SkP: skarn prógrado, SkR: skarn retrógrado, SM: sulfuro masivo, AH: alteración de adularia-cuarzo, Vet: vetillas de calcita, MT: fluidos magmáticos tardíos, AM: agua meteórica.	98
Figura 81. Diagramas de salinidad vs temperatura de homogenización para el cuerpo de Santa María (A) y otras mineralizaciones de tipo skarn y epitermales de la Sierra de Santa María (B). Datos tomados de Gilmer et al. (1988) y Jiménez-Franco et al. (2020). P, R, M: etapas prógrada, retrógrada y mineralizante, V: vetilleo, E: epitermal, T: inclusiones fluidas secundarias tardías.	99
Figura 82. Representación esquemática de la relación entre los procesos evolutivos de los cuerpos de Antares y Santa María. Con fines comparativos, en la porción inferior izquierda del diagrama se muestra el modelo de Sillitoe (2010) para depósitos skarn proximales y distales en sistemas tipo pórfido de Cu±Au±Mo. En ese orden de ideas, Santa María sería el “skarn distal” y Antares el “skarn proximal”. Abreviaturas: Figura 77.	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estándares utilizados en los análisis EMPA por cada mineral estudiado. Porcentajes en % en peso.	26
Tabla 2. Datos microtermométricos de las inclusiones fluidas por cada muestra.	75
Tabla 3. Datos microtermométricos de las asociaciones de inclusiones fluidas.	76

1 INTRODUCCIÓN

Estudiar la génesis de los yacimientos minerales es vital para establecer las condiciones a las que se formó la mineralización, los procesos que ocurrieron durante y después de la precipitación mineral, los factores que intervinieron en la distribución y tipología de la mena, las fuentes de aporte de los metales y las modificaciones póstumas. Particularmente, los depósitos de tipo skarn representan la principal fuente de W a nivel global, y además son importantes proveedores de Cu, Fe, Mo, Zn, Co, Au, Ag, Bi, Sn, etc. (Baker *et al.*, 2004). Normalmente, en estos yacimientos la mineralización se hospeda en cuerpos masivos, chimeneas, mantos, reemplazamientos pervasivos, estructuras vetiformes, *stockworks*, entre otros (Meinert, 1982; Megaw *et al.*, 1988; Misra, 2000; Meinert *et al.*, 2005).

Típicamente, estos depósitos se generan por metamorfismo de contacto y metasomatismo de rocas carbonatadas (Baker *et al.*, 2004; Meinert *et al.*, 2005), ocasionados por la intrusión de cuerpos de composición diorítica a granítica en cinturones orogénicos (Einaudi y Burt, 1982). Tales condiciones se cumplen ampliamente en México, donde el registro sedimentario marino del Cretácico está dominado por rocas calcáreas expuestas en grandes cinturones de pliegues y cabalgaduras (Eguiluz-de Antuñano *et al.*, 2000; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; Fitz-Díaz *et al.*, 2018), que son interceptados por provincias volcánicas de grandes dimensiones como la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur (Camprubí, 2013).

El Distrito Minero de Velardeña se encuentra localizado en el sector nororiental del estado de Durango (*Figura 1*), en las sierras de Santa María y San Lorenzo, dos cadenas montañosas incluidas dentro de la denominada Traversa de Parras (Eguiluz-de Antuñano *et al.*, 2000). Fisiográficamente, la zona de investigación además de pertenecer al sector transversal de la Sierra Madre Oriental se ubica en cercanías de la intersección entre esta provincia, la Mesa Central y la parte oriental de la Sierra Madre Occidental (*Figura 1*; Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992; Hoffmann, 2003). Por tal razón, su geología y metalogenia responden a la combinación de procesos que ocurrieron en estos tres dominios.

Litológicamente, el área de investigación está dominada por amplias sucesiones de rocas calcáreas cretácicas, incluidas en las formaciones Aurora, Cuesta del Cura e Indidura (*Figura 1*; SGM, 1997), las cuales son, a su vez, cortadas por cuerpos de rocas ígneas cuya composición varía entre intermedia y félsica (Gilmer *et al.*, 1988; Hernández, 1991; Ramírez-Peña, 2014). En el contacto de las rocas carbonatadas y los cuerpos intrusivos (stocks, diques aplíticos, alaskíticos y traquíticos; Spurr y Garrey, 1908; Gilmer *et al.*, 1988), se produce la mineralización metálica de Velardeña, que se compone de: esfalerita, galena, argentita, pirita, marcasita, galena argentífera, arsenopirita, entre otros (Cruz-Pérez y López-Escalona, 1981; Hernández, 1991).

La Sierra de Santa María ocupa la porción suroccidental de este distrito y sus principales cuerpos mineralizados, Antares Norte, Antares Sur y Santa María (*Figura 1*), se hallan expuestos en las minas Santa María, Los Azules y Molotitos (Jiménez-Franco, 2012). El cuerpo de Santa María, objeto de esta Tesis de Maestría, está relacionado con un dique aplítico y su mineralización está conformada por marmatita/esfalerita, galena, argentita, pirita y arsenopirita masiva (Industrias Peñoles, 2010).

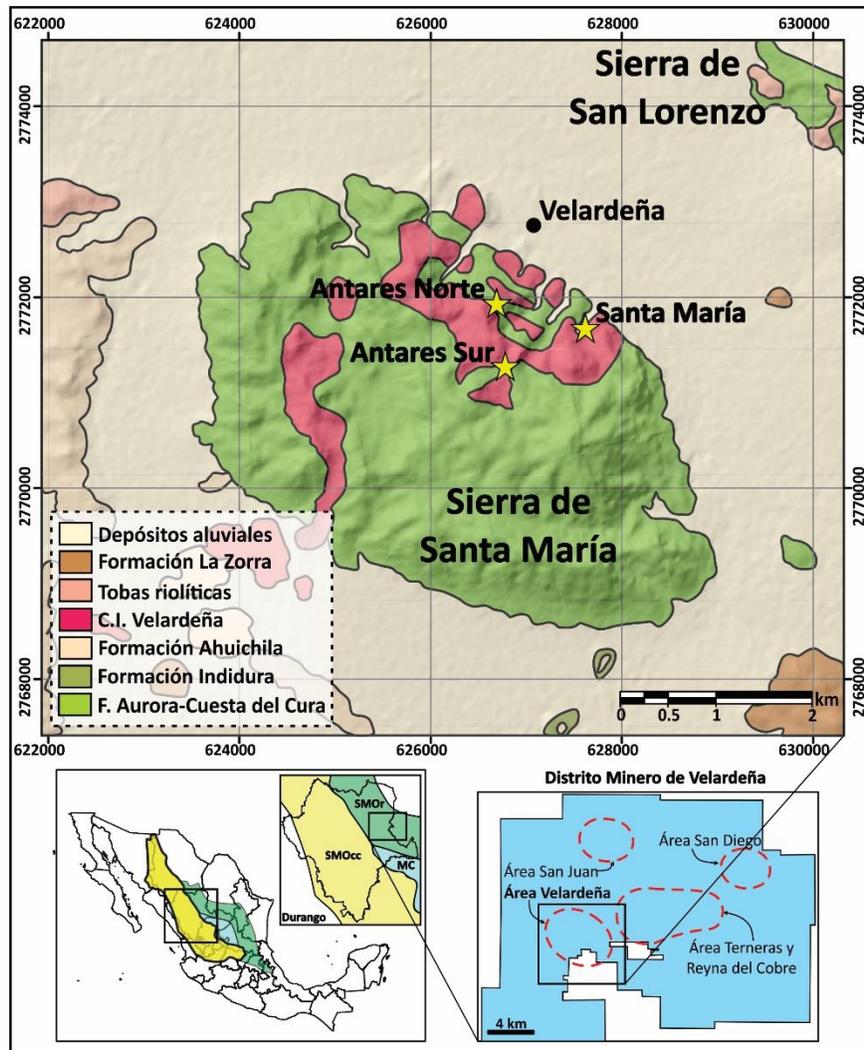


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Mapa geológico G13-D44 Velardeña (SGM, 1997). C.I.: Complejo Intrusivo, SMOcc: Sierra Madre Occidental, SMO: Sierra Madre Oriental, MC: Mesa Central.

Desde inicios del siglo pasado se empezaron a realizar investigaciones en el distrito minero de Velardeña, basadas principalmente en descripciones de campo y, en menor proporción, estudios de laboratorio. Los estudios pioneros enfocados en las mineralizaciones metálicas del área de Velardeña fueron realizados por Spurr y Garrey (1908), quienes describieron las rocas de las sierras de Santa María y San Lorenzo, y sus manifestaciones económicas asociadas. Estos autores encontraron que las rocas calcáreas están cortadas por dos familias de diques: unos traquíticos y otros alaskíticos, cada uno de ellos con una mineralogía particular desarrollada en el contacto con el encajonante calcáreo. De tal modo, observaron una mena rica en Zn-Pb-Ag rodeando los diques traquíticos, mientras que junto a los diques alaskíticos la mena es cuprífera y conforma cuerpos irregulares.

Posteriormente, Cruz-Pérez y López-Escalona (1981) revisaron las mineralizaciones de las áreas de San Lorenzo y Santa María, indicando que la mena más importante se concentra en cuerpos con abundante galena argentífera, esfalerita y calcopirita. No obstante, hallaron igualmente valores interesantes de Ag en la zona de oxidación, y en asociación con minerales como magnetita, hematita, especularita, calcita, cuarzo y granate. Además, sugirieron que los cuerpos mineralizados

se formaron por reemplazamiento pirosumático de los carbonatos y que éstos muestran formas comúnmente irregulares, en mantos y chimeneas.

Gilmer *et al.* (1988) desarrollaron un trabajo integral en las manifestaciones metálicas de la Sierra de Santa María, basados en estudios mineralógicos detallados. Estos autores definieron tres zonas mineralizadas con base en la mena predominante: zona de la pirrotina (exoskarn), zona de la arsenopirita (ubicada en pórfido cuarzolítico) y zona de la pirita (reemplazamiento de los carbonatos). Adicionalmente, describieron una variedad de alteraciones hidrotermales que incluyen alteraciones potásica y propilítica, coetáneas con la etapa prógrada del skarn, y alteraciones filica y argílica durante sus etapas tardías de formación. Por otra parte, llevaron a cabo estudios de inclusiones fluidas, encontrando que los fluidos causantes de la formación del skarn fueron dos: uno prístino poco salino y de elevada temperatura, y otro de mayor salinidad y menor temperatura relacionado con la etapa de formación de los sulfuros. Por último, a partir de análisis de isótopos estables de azufre en los sulfuros, sugirieron que la fuente de este elemento es juvenil (magmática).

Más recientemente, Hernández (1991) estudió rocas del área de Santa María y San Lorenzo, y encontró que la mineralización metálica tiende a ser más abundante alrededor de los diques alaskíticos en comparación con los traquíticos, posiblemente porque son rocas más homogéneas y, por ende, más fáciles de fracturar y permear. Asimismo, indicó que los principales minerales de mena son arsenopirita, pirita, marcasita, galena argentífera y esfalerita, en ese orden de abundancia.

Hoffmann (2003) realizó un estudio estructural de las venas epitermales y fallas normales de la Sierra de San Lorenzo, y propuso que la mayoría de los fluidos hidrotermales mineralizantes circularon por las fallas extensionales principales, durante un régimen tectónico extensional y un periodo de magmatismo. Asimismo, indicó que el grueso de los fluidos se movilizó por las fallas, generando estructuras vetiformes con valores de Au y Ag variables (3-16 ppm de Au y 470-1110 ppm de Ag en venas San Juanes y San Mateo), que se relacionan con una mineralización rica en pirita, calcopirita, tetraedrita, covelina, esfalerita, entre otros.

Posteriormente, Pinet y Tremblay (2009) llevaron a cabo estudios estructurales enfocados en las venas epitermales de la zona de San Lorenzo y hallaron que algunas de éstas son de alto grado, presentan formas estrechas, están controladas por fallas y pueden tener una continuidad lateral de hasta 3 km. Por sus características, estos autores indican que el vetilleo es contemporáneo con la intrusión de los cuerpos ígneos y la mineralización de tipo skarn, y que se desarrolló durante un evento extensional con dirección NNE, previo a la formación de las Sierras y Cuencas mexicanas.

Por otra parte, en el estudio de prefactibilidad de Industrias Peñoles (2010) se describieron los cuerpos mineralizados más grandes de la Sierra de Santa María, que denominan Antares Norte, Antares Sur y Santa María. De acuerdo con este estudio, el cuerpo de Santa María se relaciona con un dique aplítico que intruye a la Formación Cuesta del Cura, y su mineralización consta de marmatita/esfalerita, galena, argentita, pirita y arsenopirita con textura masiva; es decir, minerales ricos en Zn, Fe y As, con valores subordinados de Pb y Ag. En este mismo estudio, la Minera El Roble (Industrias Peñoles) calculó un potencial de 8 millones de toneladas de material explotable en Antares Norte, Antares Sur y Santa María, con una ley de 0,23 g/t de Au, 25 g/t de Ag, 0,3-0,6% de Pb, 0,2% de Cu y 5-6% de Zn.

Las investigaciones más recientes realizadas en la zona de Velardeña fueron llevadas a cabo por Jiménez-Franco (2012) y Jiménez-Franco *et al.* (2020), quienes emplearon una amplia gama de análisis en muestras provenientes de Antares y Santa María (Sierra de Santa María), y Reyna del Cobre (Sierra de San Lorenzo). De este modo, caracterizaron el depósito de Antares como un skarn rico en Zn desarrollado en el contacto entre calizas de la Formación Cuesta del Cura y un pórfido riolítico (Figura 2). Asimismo, estos autores indicaron que el cuerpo registra una etapa prógrada y una retrógrada, de alta y media temperatura, respectivamente, esta última relacionada con la mineralización metálica de arsenopirita, calcopirita, galena, pirita, pirrotina y esfalerita. Además, con ayuda de isótopos de azufre establecieron que el origen de este compuesto es magmático.

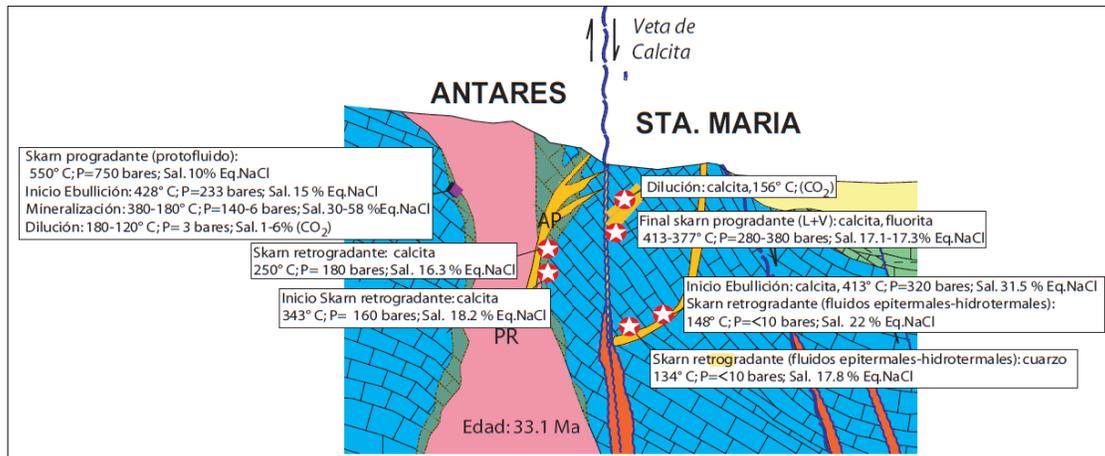


Figura 2. Modelo de formación de las mineralizaciones metálicas en la sierra de Santa María. Tomado de Jiménez-Franco (2012).

De los autores mencionados con antelación, Gilmer *et al.* (1988), Jiménez-Franco (2012) y Jiménez-Franco *et al.* (2020) fueron quienes estudiaron con mayor detalle distintos sectores de las Sierras de Santa María y de San Lorenzo, abarcando un área significativa del distrito, pero sin hacer especial énfasis en alguno de los cuerpos mineralizados. Por tal motivo y por la variación mineralógica, composicional e isotópica que pueden mostrar este tipo de yacimientos (ej., Meinert *et al.*, 2005), se propone un trabajo enfocado en el cuerpo mineralizado de Santa María, concretamente en establecer su mineralogía, edad de formación y la procedencia de sus fluidos formadores. Para ello se realizaron estudios petrográficos-metalográficos, microtermométricos, de química mineral, de isótopos estables y fechamientos de ⁴⁰Ar/³⁹Ar, con los cuales fue posible tipificar el depósito de Santa María, describir los procesos que contribuyeron a su formación y evolución, caracterizar los fluidos mineralizantes, evaluar los mecanismos de precipitación mineral y proponer algunas directrices para la exploración en el distrito.

1.1 Planteamiento del problema

A pesar de que el cuerpo mineralizado de Santa María representa una de las zonas mineralizadas más importantes del Distrito Minero de Velardeña, no se han llevado a cabo estudios detallados que se enfoquen en la génesis de éste. Por tanto, con este trabajo se busca ampliar el conocimiento actual de este depósito al contestar los siguientes interrogantes:

- 1) ¿Cuál fue la génesis y los procesos involucrados en la formación y evolución del cuerpo mineralizado de Santa María en el Distrito Minero de Velardeña?,
- 2) ¿cómo fue la secuencia de depósito en los diferentes eventos y cuál fue la naturaleza de los fluidos asociados con cada uno de

ellos?, 3) ¿cuál es la relación entre los diques félsicos a intermedios y las sucesiones carbonatadas con la mineralización metálica del depósito?, y 4) ¿cuál es la edad de la mineralización y su relación con otros depósitos del Sector Transversal de Parras?

1.2 Justificación

El Distrito Minero de Velardeña es una de las regiones mineras más importantes del estado de Durango, con una producción significativa de Zn, Pb, Ag, Cu y Au. En este distrito minero, el denominado cuerpo de Santa María es una de las zonas mineralizadas más relevantes, por sus concentraciones económicas de Zn, Pb y Ag en sulfuros masivos. A pesar de su importancia, hasta la fecha no existen trabajos mineralógicos detallados enfocados específicamente en el cuerpo de Santa María y a la naturaleza de sus fluidos formadores. Además, a pesar de que las asociaciones cambiar de un sector a otro, las secuencias paragenéticas establecidas hasta el momento son generales para todo el distrito. Asimismo, no se han realizado fechamientos de la actividad hidrotermal en el sistema.

Los estudios mineralógicos detallados en zonas con mineralizaciones metálicas, combinados con análisis microtermométricos e isotópicos son imprescindibles para establecer las condiciones de formación y la evolución de un yacimiento, y para su correcta clasificación. Particularmente, las mineralizaciones metálicas del distrito de Velardeña responden a la conjugación de varios procesos como: la movilización y mezcla de fluidos magmáticos y aguas connatas, la generación de zonas metasomáticas y de reemplazamiento, entre otros, que deben ser estudiados a detalle para entender su temporalidad e implicaciones. Por tales razones, se plantea un estudio enfocado en el cuerpo mineralizado de Santa María, que emplee técnicas especializadas para abarcar los interrogantes planteados anteriormente.

1.3 Objetivos

- Entender la génesis y evolución de la mineralización de tipo skarn en el Distrito Minero de Velardeña, particularmente en el cuerpo de Santa María, para contribuir al conocimiento de los depósitos de este distrito y del norte de México.
- Establecer la secuencia paragenética para el cuerpo mineralizado de Santa María.
- Estudiar las características fisicoquímicas de los fluidos mineralizantes, su evolución durante el desarrollo del yacimiento y sus fuentes.
- Fechar la mineralización metálica y realizar un acercamiento preliminar a su posible relación con otros depósitos en el Sector Transversal de Parras.

1.4 Hipótesis

El cuerpo mineralizado de Santa María se formó entre finales del Eoceno e inicios del Oligoceno, en la fase inicial del magmatismo silíceo de la Sierra Madre Occidental, y estuvo relacionado con la intrusión de diques félsicos en una sucesión calcárea, que originaron un sistema tipo skarn rico en sulfuros y sulfosales. Por tanto, los fluidos involucrados fueron mayoritariamente de origen magmático e interactuaron con las rocas encajonantes y fluidos de otras fuentes en los diferentes estadios de formación. En primera instancia, se generó metamorfismo térmico y metasomatismo a partir de fluidos magmáticos poco modificados. Conforme tales fluidos circularon e interactuaron con las calizas encajonantes disminuyó la temperatura del sistema, dando pie a la etapa retrógrada, en la que precipitaron sulfuros y sulfosales de Fe-Pb-Zn-Cu-Ag. Por último, se produjo la exhumación del depósito, la cual facilitó la percolación de aguas de origen meteórico que alteraron parcialmente los minerales hipógenos.

2 ESTADO DEL ARTE DE LOS DEPÓSITOS TIPO SKARN

El término skarn ha variado en gran medida con el tiempo (Burt, 1982), siendo utilizado inicialmente para hacer referencia a la ganga rica en calcisilicatos (granate-piroxeno-epidota), asociada con los depósitos de magnetita y calcopirita suecos (Misra, 2000). Actualmente, se conserva de forma parcial la definición original, ya que la palabra skarn hace alusión a un tipo de roca constituido por una mineralogía calcisilicatada, donde predominan granate y piroxeno, y que, además, no es representativa de la composición del protolito (Meinert, 1992; Meinert *et al.*, 2005; Misra, 2000).

En la mayoría de los casos, estas rocas se generan por metamorfismo de contacto de rocas carbonatadas (Baker *et al.*, 2004; Meinert *et al.*, 2005), originado por la intrusión de cuerpos de composición diorítica a granítica en cinturones orogénicos (Einaudi y Burt, 1982). Asimismo, los skarns pueden desarrollarse por metamorfismo regional de esta u otra litología, siempre y cuando exista contraste composicional y metasomatismo por movilización de fluidos magmáticos, metamórficos, meteóricos y/o marinos (Meinert, 1992; Meinert *et al.*, 2005; Misra, 2000).

No obstante, la palabra skarn hace referencia a la roca rica en CaO y SiO₂ como tal, sin tener en cuenta la presencia de mineralizaciones metálicas económicamente explotables. En caso de poseerlas, se utiliza la denominación de “depósitos tipo skarn”, y se dividen teniendo en cuenta el elemento o elementos metálico(s) predominante(s): skarns de Au, Au-Cu, Cu, Mo, W, etc. (Misra, 2000; Meinert, *et al.*, 2005). Estos yacimientos se forman en una gran gama de contextos tectónicos y en un amplio rango temporal que incluye desde el Precámbrico hasta el Cenozoico (Einaudi y Burt, 1982), estando su afloramiento en superficie controlado principalmente por el nivel de erosión de la región, más allá del cambio en los procesos generadores (Burt, 1977; Misra, 2000).

Los depósitos tipo skarn representan la principal fuente de W a nivel global y son, además, importantes proveedores de Cu, Fe, Mo y Zn; y menores de Co, Au, Ag, Bi, Sn, entre otros (Misra, 2000; Baker *et al.*, 2004; Meinert, *et al.*, 2005). Típicamente, en estos yacimientos la mineralización se hospeda en una gran variedad de estructuras como cuerpos masivos, chimeneas, mantos, reemplazamientos pervasivos, estructuras vetiformes, *stockworks*, etc. (Meinert, 1982; Megaw *et al.*, 1988; Misra, 2000; Meinert *et al.*, 2005).

2.1 Contexto tectónico y rocas asociadas

Los procesos que derivan en la formación de los depósitos tipo skarn pueden darse en una variedad de contextos tectónicos (*Figura 3*), si bien están típicamente relacionados con zonas de subducción de tipo margen continental activo o, en menor proporción, arco de islas (Misra, 2000), ligados a plutones tipo I de composición entre diorítica y granítica (Meinert *et al.*, 2005). De igual forma, se desarrollan en cuencas de tras-arco y en zonas de extensión continental, en estas últimas asociadas con granitoides tipo S (Meinert, 1992), generados por fusión parcial de rocas supracorticales, típicamente meta-sedimentarias (Chappell y White, 1974).

Cabe resaltar que la composición del skarn está completamente influenciada por las rocas magmáticas asociadas, las cuales, a su vez, se relacionan estrechamente con el contexto tectónico. Esto permite trazar *grosso modo* una relación directa entre el grado de diferenciación magmática, la cantidad de interacción de los plutones con la corteza y los metales en que están enriquecidos los depósitos (Misra, 2000, Meinert *et al.*, 2005). De este modo, a mayor contaminación cortical, incrementan las concentraciones de Mo, Sn y W en los magmas, y disminuye el Zn, Bi, Cu y F en ellos (Meinert *et al.*, 2005).

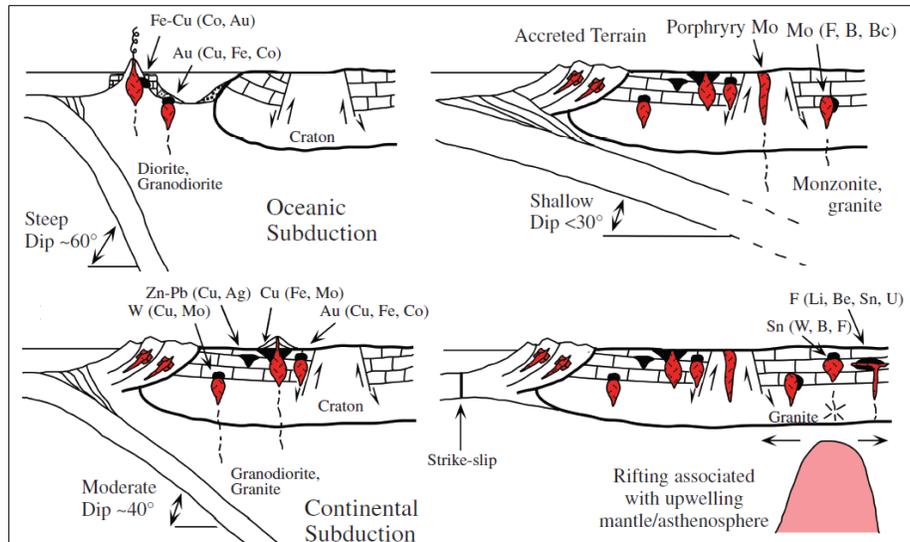


Figura 3. Ambientes tectónicos favorables para la generación de las distintas variedades de depósitos tipo skarn. Tomado de Meinert et al. (2005).

Dado que los depósitos tipo skarn comúnmente se relacionan con arcos magmáticos asociados a zonas de subducción, los magmas predominantes son de tipo calcialcalino (Meinert et al., 2005; Figura 4A); no obstante, existen ejemplos de depósitos tipo skarn ligados con magmas alcalinos y tholeiíticos (Corriveau y Gorton, 1993). Adicionalmente, la gran mayoría de los yacimientos de esta clase se asocian con magmas metaluminosos y peraluminosos, que pueden ser tanto oxidados (serie magnetita), como reducidos (serie ilmenita; Ishihara, 1977; Einaudi y Burt, 1982; Meinert, 1992). Utilizando estos criterios, se observa una clara correspondencia de los skarns de Sn por los magmas peraluminosos y, junto con los de Au, por los magmas reducidos. En contraste, los skarns de Cu, Zn y Mo se asocian con magmas oxidados (Meinert, 1992).

Por tanto, teniendo en cuenta la composición de los cuerpos magmáticos asociados con los skarns, se denota una preferencia de los skarns ricos en Fe por los magmas más primitivos y de los ricos en Mo por los términos más evolucionados (Meinert, 1992; Misra, 2000). Al graficar el contenido de K_2O con respecto a SiO_2 en suites magmáticas ligadas con varios tipos de skarns, se aprecia la secuencia Fe, Au, Cu, Zn, W, Sn y Mo, desde los magmas más primitivos hasta los más diferenciados (Meinert et al., 2005; Figura 4B).

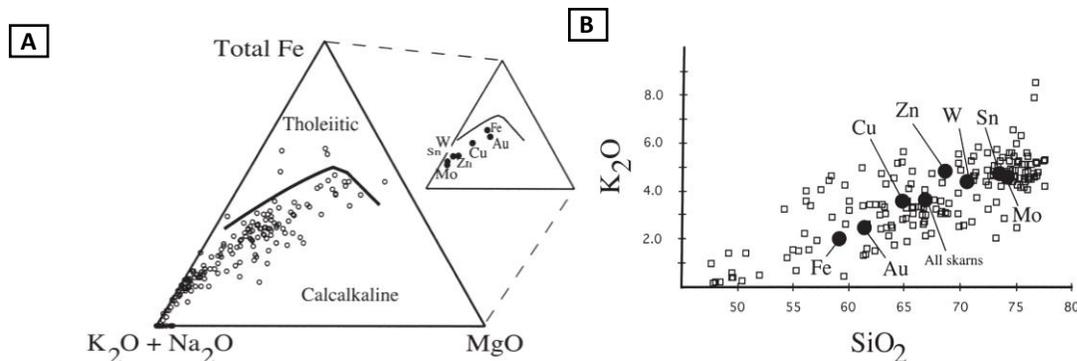


Figura 4. Características geoquímicas de los magmas relacionados con los distintos tipos de depósitos skarn. A. Diagrama AFM (Irvine y Baragar, 1971), donde se aprecia una afinidad mayoritariamente calcialcalina. B. Diagrama de K_2O vs SiO_2 (% en peso), mostrando una diferenciación progresiva de los magmas relacionados

con cada tipo de skarn, desde Fe en las rocas menos evolucionadas, hasta Sn y Mo en el extremo más diferenciado. Tomado de Meinert *et al.* (2005).

2.2 Depósitos relacionados

Los depósitos de tipo skarn pueden estar estrechamente relacionados con otros tipos de yacimientos magmático-hidrotermales como pórfidos cupríferos (Sillitoe, 2010), epitermales (Gilmer *et al.*, 1988), depósitos del clan de los IOCG (*iron oxide copper gold*; Camprubí *et al.*, 2018), greisens (Kwak, 1987; Burt, 1977), entre otros. Frecuentemente, la relación más directa se encuentra con sistemas tipo pórfido, principalmente entre yacimientos de skarn de Cu y pórfidos cupríferos (Burt, 1977; Einaudi y Burt, 1982; Meinert, 1992; *Figura 5*), existiendo una relación directa entre las distintas etapas de formación de ambos depósitos y los fluidos mineralizantes involucrados (Kouzmanov y Pokrovski, 2012; Meinert *et al.*, 2005; Sillitoe, 2010).

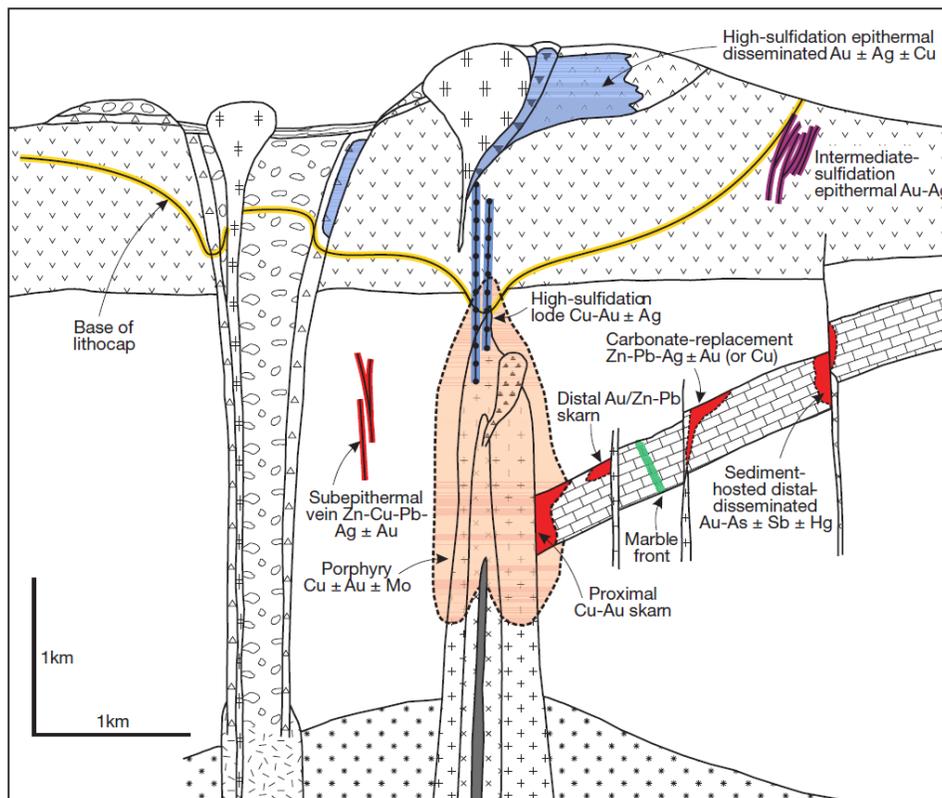


Figura 5. Modelo de sistema tipo pórfido cuprífero con depósitos de skarn y epitermales relacionados. Tomado de Sillitoe (2010).

2.3 Clasificación y mineralogía de los skarns y depósitos tipo skarn

La clasificación de los skarns y depósitos de tipo skarn varían dependiendo de una amplia gama de características (Burt, 1977), pero siempre conservándose una relación estrecha entre ambos. Para el caso de las rocas calcisilicatadas, se toman en cuenta criterios texturales, composicionales y de cercanía con el intrusivo (Einaudi y Burt, 1982), que permiten definir algunos términos como: exoskarn, endoskarn, hornfelsa calcisilicatada, skarn de reacción y skarnoide (Meinert *et al.*, 2005; *Figura 6*).

La denominación de cornubiana u hornfelsa calcisilicatada (*Figura 6*) es principalmente descriptiva y hace referencia a rocas de grano fino ricas en Ca y Si, producto del metamorfismo isoquímico de rocas calcáreas impuras (Meinert, 1992). Por su parte, un skarn de reacción se forma por metamorfismo de sucesiones finamente interstratificadas, que pueden incluir chert y caliza (Einaudi y Burt, 1982). Cabe resaltar, que para formar tanto las hornfelsas calcisilicatadas como los skarns de reacción no hace falta la introducción de componentes exóticos ajenos a las rocas sedimentarias (Einaudi y Burt, 1982). Skarnoide también es un término puramente descriptivo que define una roca calcisilicatada pobre en Fe, que parcialmente refleja la composición del protolito, por lo que se considera un término intermedio entre una hornfelsa y un skarn *sensu-stricto* (Misra, 2000; Meinert *et al.*, 2005).

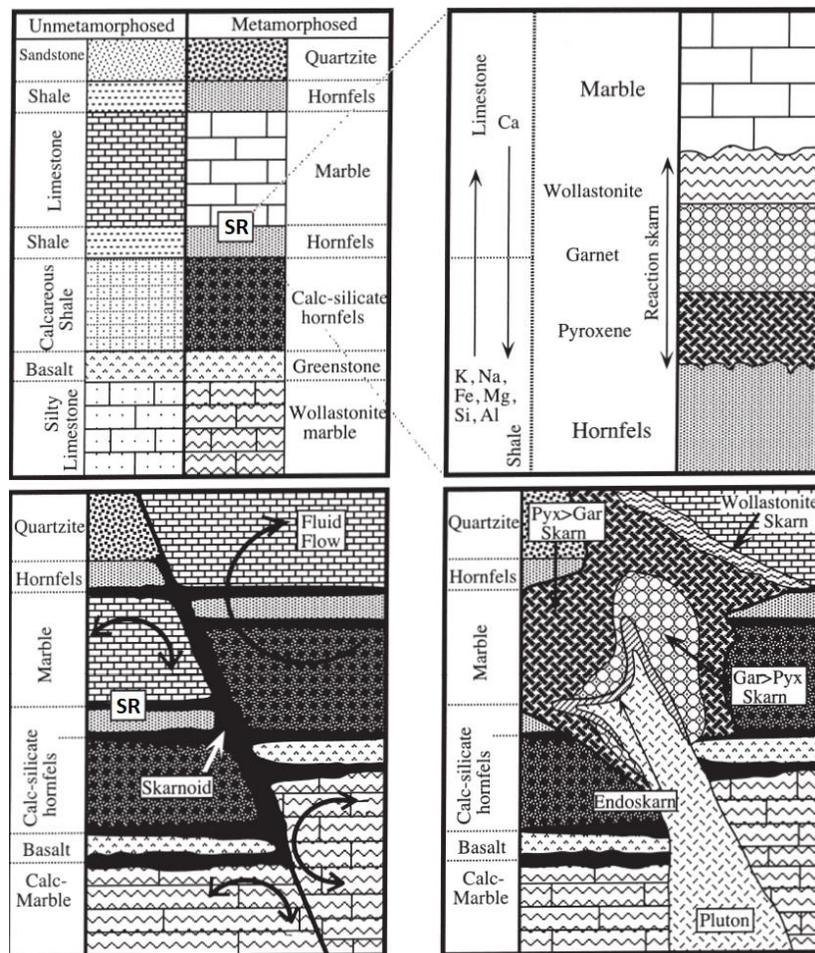


Figura 6. Tipos de rocas calcisilicatadas generadas por la intrusión de un plutón en una sucesión siliciclástica y carbonatada. Modificado de Meinert et al. (2005). SR=skarn de reacción.

Los términos endoskarn y exoskarn se emplean para indicar el tipo de protolito (ígneo o sedimentario) del skarn (Burt, 1977; Misra, 2000). De acuerdo con Einaudi y Burt (1982), el desarrollo de los endoskarns está en gran medida influenciado por una movilización de los fluidos hacia el intrusivo o a lo largo del contacto con las rocas encajonantes, de modo que el proceso dominante en la formación de estas rocas es la infiltración. Por su parte, los exoskarns están definidos por su mineralogía, reflejo del tipo de roca reemplazada (calizas puras, dolomías, margas, etc.), y por la composición de los fluidos metasomáticos (Meinert *et al.*, 2005). Cabe mencionar que

el grueso de la mena se desarrolla normalmente en el exoskarn y que la gran mayoría de los depósitos tipo skarn económicos, están relacionados con exoskarns cálcicos (Einaudi y Burt, 1982).

Por otra parte, los depósitos de tipo skarn se clasifican teniendo en cuenta tanto criterios descriptivos, que incluyen la composición del protolito, el tipo de roca y el metal económico predominante, como las características genéticas tales como mecanismos de flujo, temperatura de formación e influencia magmática en su desarrollo (Meinert *et al.*, 2005). No obstante, la clasificación más utilizada es la que se basa en el metal económico más abundante (Einaudi y Burt, 1982; Meinert, 1992; Misra, 2000), permitiendo definir siete tipos principales: Fe, Au, W, Cu, Zn, Mo y Sn (Meinert *et al.*, 2005). Si bien, existe un continuo entre los extremos mencionados (Misra, 2000).

Teniendo en cuenta el ambiente geotectónico, Einaudi y Burt (1982) describieron una evolución en las rocas que varía desde dioríticas-andesíticas de arco de islas, pasando por granodioritas-cuarzomonzonitas de arco continental y granitoides post-orogénicos y anorogénicos, asociados con skarns de Fe, skarns de W, Cu y Zn-Pb, y skarns de Sn-W, respectivamente. Por tal motivo, los yacimientos tipo skarn se distribuyen globalmente siguiendo estos criterios tectónicos, concentrándose principalmente en márgenes continentales activos y arco de islas como el Cinturón de Fuego del Pacífico (*Figura 7*).

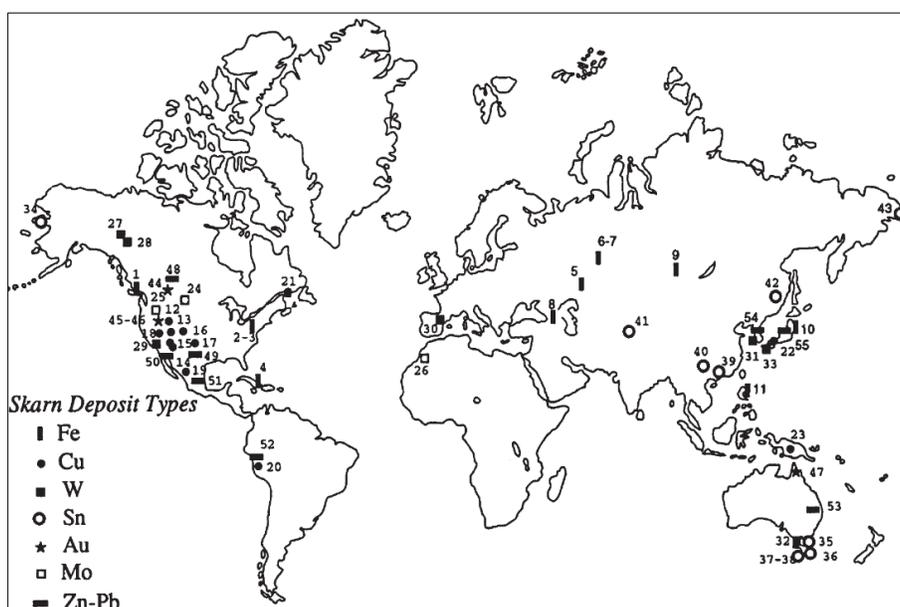


Figura 7. Distribución global de los principales depósitos tipo skarn de cada tipo. Tomado de Misra (2000).

2.3.1 Depósitos de tipo skarn de Cu

Los skarns de Cu son posiblemente el tipo más abundante y la gran mayoría ocurren en skarns cálcicos desarrollados por la intrusión de granitoides tipo I, calciocalinos y de la serie magnetita, cuya composición varía de granodiorítica a cuarzomonzonítica y se emplazan a bajas profundidades en cinturones orogénicos (Meinert, 1992; Misra, 2000; Meinert *et al.*, 2005; *Figura 7*). Estos yacimientos muestran una asociación espacial característica con stocks de composición félsica y textura porfirítica y con sucesiones volcánicas; además, desarrollan zonas de *stockwork* y alteración hidrotermal, indicando ambientes someros (Misra, 2000; Meinert *et al.*, 2005).

La mayoría de los skarns cupríferos se desarrollan próximos al contacto con los cuerpos ígneos, presentando una mineralogía rica en granate andradítico, magnetita y hematita, indicativos de condiciones oxidantes, con cantidades variables de diópsido, vesuvianita, wollastonita, actinolita y epidota (Meinert, 1992). Estos minerales presentan una zonación conformada por granate masivo en cercanías del intrusivo, pasando a sectores ricos en piroxeno al alejarse y wollastonita masiva en la interfaz con el frente de marmorización (Einaudi y Burt, 1982).

Por su distribución, el granate y piroxeno representan buenos indicadores de la distancia con la fuente de calor, porque exhiben una zonación composicional expresada en el color (Meinert, 1982; Murakami, 2005). Este comportamiento es particularmente evidente en el granate, el cual muestra color marrón rojizo oscuro en la cercanía del contacto y marrón claro o verde pálido al alejarse de éste (Murakami, 2005; *Figura 8*).



Figura 8. Fotografías de granate (Grt) cálcico de color marrón rojizo (proximal), y verde pálido (distal) en el skarn de Payandé, Colombia. Fotografías por Andrés Felipe González Durán.

Los minerales de mena más comunes son calcopirita y pirita, con cantidades menores de magnetita, hematita, bornita, pirrotina, molibdenita y sulfosales de la serie tetraedrita-tenantita (Einaudi y Burt, 1982; Misra, 2000). Estos minerales generalmente se ubican en aureolas desde un sector rico en pirita y calcopirita en cercanía con el plutón, seguidas por una zona con más calcopirita y, finalmente, una dominada por bornita cercana al frente de mármoles (Meinert *et al.*, 2005). En algunos casos, cuando la roca encajonante es dolomítica, pueden desarrollarse cuerpos masivos de magnetita (Meinert, 1992).

Existe una buena correlación entre la presencia de pórfidos cupríferos emplazados en sucesiones carbonatadas, y la generación de depósitos de skarn de Cu (Einaudi y Burt, 1982; Meinert, 1992; Misra, 2000; Meinert *et al.*, 2005; Sillitoe, 2010). De hecho, los estadios de metamorfismo prógrado y retrógrado del skarn, están ligados con las fases de alteración potásica y sericítica del sistema pórfido, respectivamente (Misra, 2000; Meinert *et al.*, 2005; Sillitoe, 2010; Kouzmanov y Pokrovski, 2012). Aquellos skarns que no presentan asociación espacial con pórfidos cupríferos, muestran menores tamaños y leyes de Cu superiores al 1%; asimismo, su ganga calcisilicatada es de grano más grueso y la densidad del venilleo es menor (Misra, 2000).

2.3.2 Depósitos tipo skarn de Fe

Representan los depósitos más grandes de este tipo y son minados por sus altas concentraciones de magnetita, aunque pueden presentar cantidades menores de Cu, Co, Ni y Au (Meinert, 1992).

Adicionalmente, son el único tipo de skarn presente en arcos de islas y se asocian espacialmente con intrusivos de composición gabroica a diorítica, emplazados en secuencias cogenéticas de basaltos-andesitas, y se caracterizan por desarrollar un extenso endoskarn (Misra, 2000). Dependiendo de si se trata de skarns cálcicos o magnésicos su mineralogía varía, predominando fases ricas en Fe que incluyen granate, piroxeno, epidota y actinolita, en los primeros; y forsterita, dióxido, periclasa, talco y serpentina en los segundos (Meinert, 1992; Meinert *et al.*, 2005). En estos depósitos, la magnetita representa el mineral metálico predominante, aunque pueden aparecer también proporciones menores de calcopirita, cobaltita y pirrotina (Misra, 2000).

Misra (2000) mencionó características que permiten diferenciarlos de otros tipos de skarns ricos en magnetita, como son: 1) asociación con stocks gabroicos a dioríticos, 2) presencia de ganga calcisilicatada rica en Fe, incluyendo epidota, grosularia y hedenbergita; 3) gran desarrollo de endoskarn con metasomatismo sódico en las rocas ígneas; 4) escasos sulfuros y concentraciones minoritarias de Cu, Zn, Co, Au y Ni; y 5) ausencia de Sn, W y Pb.

Carriveau (2007) indicó que los skarns de Fe comparten algunas características con los depósitos tipo Kiruna, y los incluye en el conjunto de los IOCG por presentar fases anhidras como granate y piroxeno en asociación con la mineralización metálica, las cuales también se hallan en otros subtipos de este clan.

2.3.3 Depósitos tipo skarn de W

Estos depósitos están muy relacionados con plutones calciálicos en cinturones orogénicos (Meinert, 1992), siendo particularmente abundantes en la Cordillera Occidental de Norteamérica, donde se encuentran muchos de los yacimientos más grandes del mundo (Kwak, 1987; Misra, 2000; *Figura 7*). Estos cuerpos intrusivos son de grano grueso y textura equigranular, muestran asociación espacial con pegmatitas y diques aplíticos, y están rodeados por aureolas metamórficas de gran tamaño y alta temperatura, por lo que se asocian con ambientes profundos (Kwak, 1987; Meinert *et al.*, 2005). Las litologías encajonantes comúnmente corresponden a rocas carbonatadas impuras, con intercalaciones de margas y rocas volcánicas (Misra, 2000).

Newberry y Swanson (1986) indicaron que los granitoides tipo I relacionados con los skarns de tungsteno se diferencian de aquellos asociados con los skarns de Cu en que presentan un grado de diferenciación mayor, permitiendo el enriquecimiento en tungsteno de los fundidos magmáticos residuales, de donde posteriormente se exsuelven los fluidos mineralizantes. El grado de evolución de los magmas está en gran parte favorecido por el espesor de la corteza que atraviesa, por lo que se presume que los ambientes idóneos para su formación son aquellos donde existe un sobre-engrosamiento cortical, debidos, por ejemplo, a eventos de colisión continental (Newberry y Swanson, 1986).

La principal mena de tungsteno en estos depósitos es la scheelita, la cual representa aproximadamente el 95% de los minerales de este elemento y generalmente se restringe a los mármoles metasomatizados (Misra, 2000). Los skarns de W de mayor importancia global son reducidos (encajonante de carbonatos) y su mineralogía prógrada está dominada por piroxeno hedenbergítico, andradita y escasa scheelita rica en Mo (Meinert *et al.*, 2005). La asociación mineral retrógrada se compone de espesartina-almándino, biotita, hornblenda y la mayoría de los minerales de mena como scheelita, molibdenita, calcopirita, esfalerita y pirrotina (Einaudi y Burt, 1982).

2.3.4 Depósitos tipo skarn de Zn-Pb

La gran mayoría de estos skarns se localizan en arcos continentales y en zonas de extensión, y los metales comúnmente explotados son Zn, Pb y Ag (Meinert *et al.*, 2005, Meinert, 1992). Genéticamente, estos depósitos están relacionados con batolitos, stocks y diques de composición de diorítica a granítica, siendo no siempre evidente esta conexión porque se desarrollan distales con respecto a los cuerpos ígneos (Megaw *et al.*, 1988). Comúnmente, estos depósitos se encuentran emplazados en contactos estructurales o litológicos donde desarrollan menas masivas en chimeneas y mantos, y sus intrusivos asociados no generan amplias aureolas de contacto (Misra, 2000).

Mineralógicamente, estos depósitos están dominados por una ganga rica en manganeso, que incluye hedenbergita-johannsenita, andradita, olivino, rodonita, actinolita, rodocrosita, entre otros (Meinert, 1992; Misra, 2000). La mena, por su parte, se conforma de esfalerita, galena, pirita, pirrotina y magnetita, y se asocia estrechamente con el clinopiroxeno manganésico (Einaudi y Burt, 1982).

De acuerdo con Jiménez-Franco (2012), los cuerpos de Antares y Santa María pueden catalogarse como skarns cálcicos proximales ricos en Zn por su mineralogía y texturas. Este autor encontró valores de manganeso en diópsido, epidota y actinolita, típicos de este tipo de yacimientos.

2.3.5 Depósitos tipo skarn de Au

El Au se presenta como subproducto en muchos de los otros tipos de skarns, principalmente en los de Cu (Misra, 2000), pero el término “skarn de Au” se aplica a los depósitos que se explotan principalmente para Au (Meinert *et al.*, 2005), aunque también pueden presentar cantidades variables de Cu, Fe, Pb, Zn, As, Bi, Sn, Sb y Co (Misra, 2000). La mayoría de los yacimientos de mayor ley son skarns cálcicos y se encuentran relacionados con plutones y complejos de diques y silos de composición diorítica a granodiorítica, pertenecientes a la serie ilmenita (Ishihara, 1977), emplazados en sucesiones carbonatadas y clásticas-volcanoclásticas a lo largo de cinturones orogénicos y arcos de isla (Misra, 2000; Meinert *et al.*, 2005).

Dependiendo de las condiciones redox y las rocas encajonantes de los depósitos, éstos pueden desarrollar una mineralogía contrastante. Los skarns reducidos se caracterizan por presentar piroxeno hedenbergítico en las zonas proximales, además de grosularia, pirrotina y arsenopirita; y menores cantidades de feldespato potásico, escapolita, vesubianita, apatito y anfíbol (Meinert, 1992). Por su parte, los depósitos oxidados están dominados por granate y cantidades menores de sulfuros como pirita, pirrotina, calcopirita, esfalerita y galena (Meinert *et al.*, 2005). Para el caso de los skarns magnésicos de Au, están constituidos por minerales ricos en Mg como forsterita, espinela y serpentina (Meinert *et al.*, 2005).

2.3.6 Depósitos tipo skarn de Mo

Los skarns de Mo forman depósitos ya sea de alta ley y bajo tonelaje (>1% MoS₂ y 1-7 Mt) o de baja ley y alto tonelaje (0,1-0,2% de MoS₂ y 100 Mt), comúnmente relacionados con intrusivos silíceos muy diferenciados encajados en sucesiones carbonatadas impuras (Misra, 2000; Meinert, 1992). De igual forma, pueden desarrollarse en cratones estables, asociados con cuerpos pegmatíticos, aplitas y rocas leucocráticas (Meinert *et al.*, 2005). La asociación metálica más común en este tipo de yacimiento es Mo-W-Cu-Bi, representada por la presencia de molibdenita, scheelita, calcopirita y bismutina, siendo localmente importantes las ocurrencias de Zn, Pb, U y Sn (Misra, 2000).

Los minerales de ganga más comunes corresponden a piroxeno hedenbergítico con proporciones menores de grosularia, wollastonita, fluorita y anfíbol (Meinert, 1992; Meinert *et al.*, 2005). Adicionalmente, contrario a como sucede en los skarns de Cu, los skarns de Mo normalmente no se asocian con pórfidos de Mo (Misra, 2000).

2.3.7 Depósitos tipo skarn de Sn

Estos depósitos se relacionan casi exclusivamente con granitos muy diferenciados y ricos en SiO₂, los cuales se generan por fusión parcial de corteza continental durante eventos extensionales (Meinert, 1992). Estos cuerpos intrusivos son reducidos (serie ilmenita), se encuentran enriquecidos en F, Rb, Li, Sn, Be, W y Mo (Kwak, 1987; Misra, 2000), y pueden desarrollar etapas de greisenización que se superponen al skarn prógrado, a las rocas ígneas y al encajonante carbonatado, especialmente en la región próxima al intrusivo (Kwak, 1987; Meinert, 1992).

Durante la fase prógrada del sistema, se forman zonas ricas en granate, titanita y vesuvianita, minerales que pueden incorporar hasta un 0,6 % en peso de Sn en su estructura cristalina (Misra, 2000). Posteriormente, cuando la actividad de flúor permite el desarrollo de la etapa greisen (Kwak, 1987), se producen minerales como topacio, fluorita, turmalina y cuarzo, que se superponen a las fases ya formadas, permitiendo la liberación del Sn y su posterior concentración en regiones más distales a modo de óxidos (casiterita) y sulfuros (estannita; Meinert *et al.*, 2005). Otros minerales presentes en esta etapa son pirrotina, arsenopirita, esfalerita, bornita, magnetita y löellingita (Einaudi y Burt, 1982; Misra, 2000).

2.4 Origen y evolución

La formación de depósitos tipo skarn guarda una relación estrecha con las etapas prógrada y retrógrada del sistema (Meinert *et al.*, 2005). A su vez, estas etapas responden al proceso de emplazamiento (prógrada), cristalización, alteración y enfriamiento (retrógrada) del plutón que aporta el calor (Meinert, 1992). Cada estadio se caracteriza por poseer mineralogías particulares, que dependen en gran medida del tipo de skarn; no obstante, algunas fases son ubicuas y forman soluciones sólidas que varían de composición dependiendo de las condiciones del medio (Misra, 2000). Algunos ejemplos de estos minerales de metamorfismo prógrado son el granate, clinopiroxeno, anfíbol y piroxenoide.

Por su parte, la fase retrógrada está dominada por minerales hidratados como anfíbol, epidota y clorita que se superponen a los minerales prógrados, y está controlada estructuralmente y (Meinert, 1992). Sin embargo, se debe considerar que los minerales hidratados no se forman exclusivamente durante el metamorfismo retrógrado, como es el caso de los skarns de Sn, donde la elevada actividad de flúor estabiliza estas fases incluso a temperaturas altas (Meinert *et al.*, 2005). Además, es durante esta etapa cuando precipita la mayor parte de la mineralización en los distintos tipos de skarn, en muchos casos debido a la redistribución y redeposición de los minerales metálicos (Misra, 2000; Meinert *et al.*, 2005).

2.4.1 Fluidos mineralizantes

Los estudios enfocados a la caracterización de los skarns se realizan principalmente en inclusiones fluidas, por medio de técnicas microtermométricas, isotópicas y de análisis químico, con el fin de establecer las características de los fluidos mineralizantes, su evolución temporal y su posible fuente (Megaw *et al.*, 1988; Misra, 2000; Baker *et al.*, 2004; Meinert *et al.*, 2005; Kouzmanov y Pokrovski, 2012). Los minerales más utilizados son cuarzo, carbonato y fluorita (Meinert, 1992; Misra, 2000);

no obstante, estas fases son estables a condiciones de temperatura, presión y composición muy amplias, por lo que en algunos casos se utilizan minerales de alta temperatura como granate y clinopiroxeno para la caracterización de los fluidos prístinos (Meinert *et al.*, 2005).

Durante la formación de los depósitos tipo skarn, los fluidos involucrados pueden evolucionar en gran medida y tener características distintivas, por lo que ocupan un amplio rango de temperaturas (200-700 °C) y salinidades (16-55 % en peso equiv. NaCl; Misra, 2000). Tales variaciones están muy relacionadas con las fases prógrada y retrógrada, en las que se observa un cambio marcado en las condiciones de temperatura y salinidad de los fluidos (Meinert, 1992). Durante el metamorfismo prógrada, los fluidos son monofásicos o hipersalinos y muestran temperaturas que comúnmente exceden los 350-400 °C; mientras que, en la fase retrógrada, la temperatura y salinidad son considerablemente más bajas (Kouzmanov y Pokrovski, 2012). Adicionalmente, en muchos depósitos de tipo skarn la temperatura y salinidad reportadas en las inclusiones fluidas decrece con la distancia al intrusivo (Misra, 2000).

Por otra parte, las relaciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^2\text{H}$ indican que los fluidos magmáticos primarios pueden experimentar mezclas con aguas meteóricas y/o connatas, especialmente cuando se trata de depósitos distales, y que durante la movilización estos fluidos pueden equilibrarse con las rocas encajonantes (Meinert *et al.*, 2005, Mira, 2000). Los minerales generados durante la fase prógrada (granate, piroxeno y cuarzo) muestran gran afinidad con fluidos magmáticos, mientras que las fases hidratadas típicas de la etapa retrógrada (epidota, anfíbol y biotita) registran procesos de mezcla entre fluidos magmáticos y aguas sedimentarias y/o meteóricas (Megaw *et al.*, 1988; Meinert, 1992).

2.4.2 Secuencia de evolución

En términos generales, los depósitos tipo skarn se desarrollan siguiendo una secuencia de evolución característica (Figura 9). Inicialmente se produce el emplazamiento de cuerpos intrusivos en sucesiones carbonatadas, durante el cual se da un metamorfismo isoquímico de alta temperatura (500-700 °C) responsable de la generación de aureolas de cornubianas y, localmente, skarnoides (Meinert, 1992; Misra, 2000).

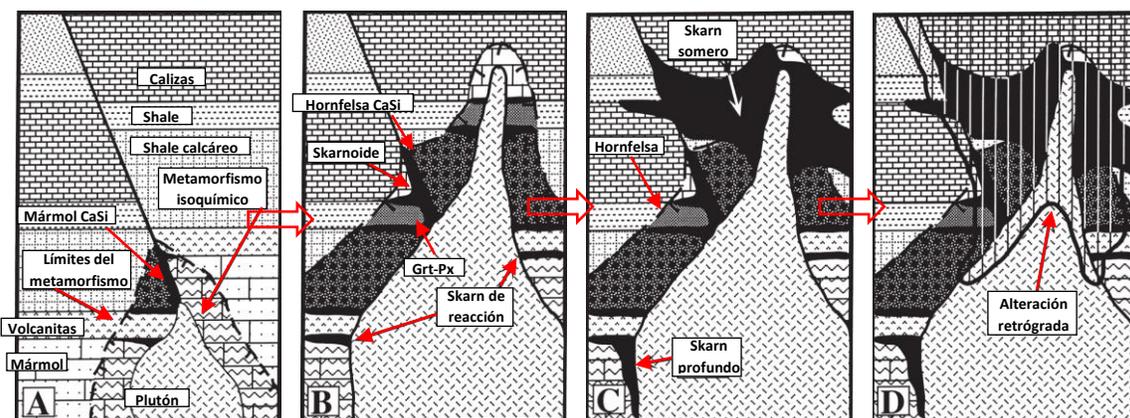


Figura 9. Secuencia de evolución típica en la formación de los depósitos tipo skarn. Modificado de Meinert (1992). Grt: granate, Px: piroxeno, CaSi: calcisilicatado.

Conforme avanza la cristalización del magma, se liberan fluidos hidrotermales mineralizantes de alta temperatura y salinidad, que permiten el metasomatismo de las rocas calcáreas (Kouzmanov y Pokrovski, 2012), lo que conlleva al desarrollo de la primera zona de skarns (400-600 °C), compuesta de silicatos anhidros como piroxeno y granate, y escasa mineralización metálica (Burt, 1977). Posteriormente, tiene lugar una etapa de alteración retrógrada favorecida por fluidos de menor temperatura (<450 °C), durante la cual continúan formándose minerales metálicos, y está ligada con las fases finales de cristalización de los intrusivos y con la entrada de aguas meteóricas y/o connatas al sistema (Burt, 1977; Misra, 2000; Kouzmanov y Pokrovski, 2012).

El principal mecanismo de precipitación de metales en los depósitos de tipo skarn es la alta capacidad de neutralización de las rocas calcáreas (Misra, 2000), observándose comúnmente una zonación entre Cu-Au proximal y Zn-Pb distal, la cual responde también a la disminución de la temperatura del sistema (Kouzmanov y Pokrovski, 2012). Homológamente, las mayores concentraciones de Zn, Pb y Ag en las áreas periféricas de los depósitos tipo pórfido son aquellas hospedadas en sucesiones calcáreas (Sillitoe, 2010).

Existen muchas variables que controlan la forma y geometría de los depósitos tipo skarn, siendo la profundidad una de las más importantes (Megaw *et al.*, 1988; Meinert, 1992; Misra, 2000). En caso de que la intrusión se dé a profundidad, el volumen de roca afectado por las aureolas de contacto y la duración de éstas es mucho mayor, debido a que la temperatura ambiental es más alta, respecto a un ambiente más somero (Newberry y Swanson, 1986). Por lo tanto, la geometría de los cuerpos también va a estar contralada por el régimen dúctil, haciendo que los contactos intrusivos entre la roca ígnea y la sucesión sedimentaria encajonante sean concordantes con la estratificación (Meinert, 1992; Meinert *et al.*, 2005; Murakami, 2005; *Figura 9C*).

En contraste, cuando la formación de estos yacimientos se produce en niveles superiores de la corteza donde predomina un régimen frágil, los contactos entre el intrusivo y la sucesión encajonante son preferencialmente discordantes (Murakami, 2005), generando amplias zonas de fractura, donde el skarn se desarrolla masivamente en los niveles más reactivos (Misra, 2000; Meinert *et al.*, 2005; *Figura 9*). Del mismo modo, las fracturas generadas pueden servir como conductos tanto para los fluidos metasomáticos como para aquellos de origen meteórico (Meinert, 1992).

3 MARCO GEOLÓGICO

3.1 Geología regional

El Distrito Minero de Velardeña hace parte de la región transversal de la Sierra Madre Oriental u Orógeno Mexicano (Fitz-Díaz *et al.*, 2018), y se localiza cerca de la intersección con la Mesa Central y la Sierra Madre Occidental (*Figura 10*; Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992; Hoffmann, 2003), de modo que su génesis responde a procesos ocurridos en estas tres provincias geológicas. Asimismo, está localizado dentro de la provincia de Sierras y Cuencas mexicanas, una zona de tectónica extensional que estuvo activa entre 13 y 5,5 Ma, la cual favoreció la movilización de fluidos hidrotermales y la consecuente formación de algunas estructuras vetiformes mineralizadas en el distrito minero (Henry y Aranda-Gómez, 1992).

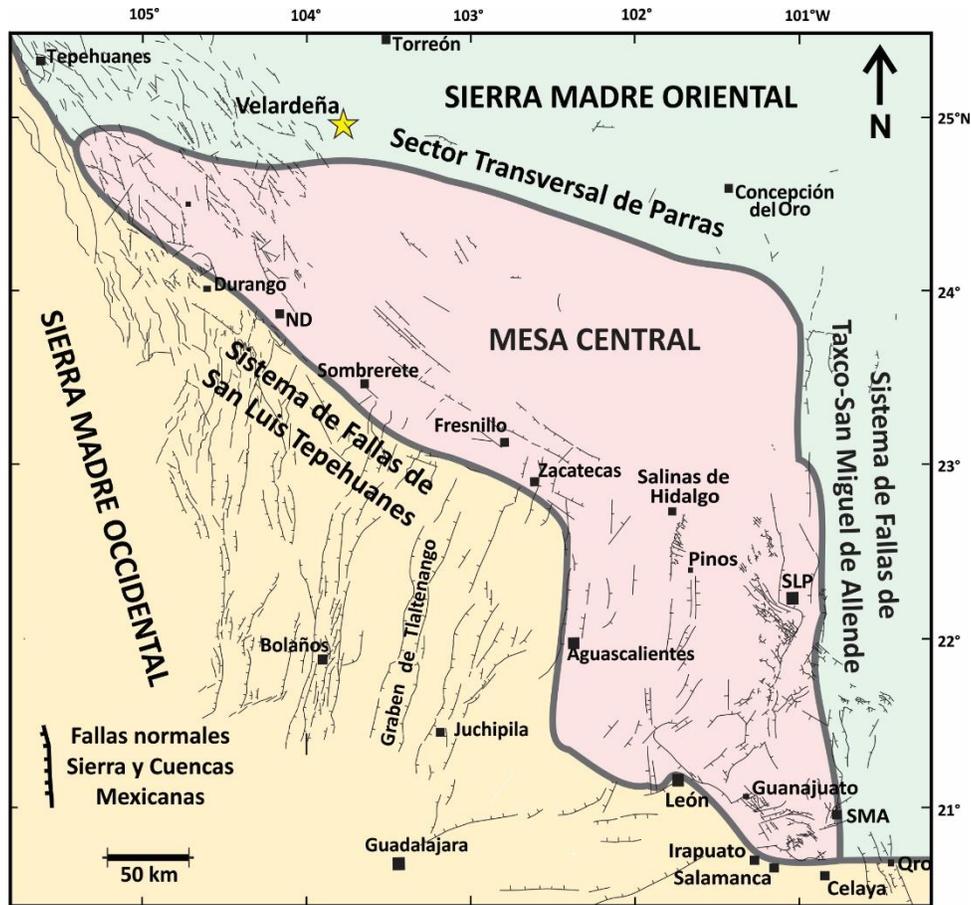


Figura 10. Ubicación del Distrito Minero de Velardeña, localizado cerca del contacto entre la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central, e influenciado por la tectónica extensional de las Sierras y Cuencas mexicanas. Modificado de Nieto-Samaniego et al. (2005). SMA: San Miguel de Allende, SLP: San Luis Potosí, Qro: Querétaro.

La Sierra Madre Oriental es parte del denominado Orógeno Mexicano, un rasgo orográfico de más de 2000 km de largo y algunos cientos de kilómetros de ancho, que se extiende desde el Istmo de Tehuantepec en Oaxaca hasta el sector noroccidental de Sonora (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992; Fitz-Díaz *et al.*, 2018). Este cinturón montañoso está constituido en su mayor parte por gruesas sucesiones carbonatadas (>3 km) del Jurásico Superior al Cretácico Superior, depositadas sobre rocas sedimentarias del Triásico Inferior al Jurásico Medio (Pinet y Trembley, 2009), cuyo basamento regional está compuesto por gneises y rocas metamórficas de alto grado del Precámbrico (Eguiluz-de Antuñano *et al.*, 2000). Estas rocas fueron deformadas durante varios episodios entre el Cretácico Superior y el Eoceno (Fitz-Díaz *et al.*, 2018). Las estructuras principales de la Sierra Madre Oriental se orientan NW-SE en la parte central de México, E-W en la curvatura de Monterrey y nuevamente NW-SE en el noroccidente de México, en la reentrante de Torreón (Eguiluz-de Antuñano *et al.*, 2000; Fitz-Díaz *et al.*, 2018). A pesar de que el Orógeno Mexicano comparte algunos rasgos estructurales con los cinturones Laramide y Sevier de Estados Unidos de América, muestra particularidades que lo diferencian de éstos (Fitz-Díaz *et al.*, 2018).

Por su parte, la Mesa Central es una planicie que se localiza en la región centro-norte de México, con alturas normalmente superiores a los 2000 m. En el sector occidental, su basamento está conformado por sucesiones volcano-sedimentarias del Terreno Compuesto Guerrero, mientras que,

en la zona oriental, éste se constituye de rocas cristalinas de Oaxaquia (Zamora-Vega *et al.*, 2018). De acuerdo con Nieto-Samaniego *et al.* (2005), la evolución geológica de esta provincia está representada por dos ciclos regresivos-transgresivos: uno entre el Triásico y el Jurásico Inferior, y otro entre el Jurásico Superior y el Cretácico Tardío. El segundo de ellos está claramente documentado por tres ambientes marinos: 1) en el borde oriental de la Mesa Central, por potentes (>4000 m) sucesiones carbonatadas de la Plataforma de Valles San Luis Potosí; 2) al occidente de la plataforma de Valles San Luis Potosí, por gruesos paquetes de sedimentos marinos depositados en ambientes de aguas profundas; 3) en la región occidental de la Mesa Central, por sucesiones volcano-sedimentarias marinas (basaltos almohadillados, lavas, entre otros), intercaladas con radiolaritas y pedernales.

Finalmente, la Sierra Madre Occidental es un cinturón cordillerano de 1200 km de largo y 200-300 km de ancho, que se extiende desde la frontera con Estados Unidos de América hasta la ciudad de Guadalajara (McDowell y Keizer, 1977) y representa una de las provincias silíceas más grandes del mundo (Bryan, 2007). De acuerdo con Ferrari *et al.* (2018), las rocas de la Sierra Madre Occidental registran tres grandes eventos de magmatismo continental: 1) magmatismo laramídico (100-50 Ma); 2) magmatismo silíceo sin-extensional (*ca.* 45-12,5 Ma); 3) volcanismo bimodal asociado con el *rifting* transtensional del Golfo de California (*ca.* 12,5 Ma al presente). El segundo de los eventos ígneos corresponde a la principal fase de magmatismo y se compone por potentes paquetes de ignimbritas, domos riolíticos y algunos cuerpos intrusivos, todos ellos del Oligoceno y Mioceno (Ferrari *et al.*, 2018).

La evolución geológica de la zona de estudio inició con el depósito de las rocas calcáreas coralinas de las Formación Aurora (Albiano) en un ambiente somero-submareal bajo condiciones tectónicamente estables (Imlay, 1936; 1937; Lehmann *et al.*, 1999; Hoffmann, 2003). Seguidamente, se produjo una profundización de la cuenca representada por la Formación Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano) y una somerización subsiguiente indicada por las lodolitas y capas de yeso presentes en la Formación Indidura del Cenomaniano-Turoniano (Imlay, 1936). De acuerdo con Levich (1973; en Hoffmann, 2003), la existencia de facies indicativas de ambientes menos profundos podría estar ligada a un levantamiento lento de la cuenca. Posteriormente, el depósito de rocas clásticas pertenecientes a la Formación Caracol (Santoniano-Coniaciano), marca un evento regresivo que puso fin a las condiciones marinas prevalecientes desde el Jurásico Superior (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

Durante el Cretácico Superior y el Eoceno se dieron tres pulsos episódicos de deformación en la sucesión carbonatada (93-80 Ma, 75-64 Ma y 55-43 Ma), que construyeron el Orógeno Mexicano, siendo el evento comprendido entre el Campaniano Tardío y el Paleoceno Temprano el responsable de la deformación registrada en la Traversa de Parras (Fitz-Díaz *et al.*, 2018). Entre el Eoceno y el Oligoceno se generó un período distensivo que produjo una serie de fosas y pilares, las cuales favorecieron la destrucción de las estructuras laramídicas y, conjuntamente, el depósito discordante de las molasas continentales de la Formación Ahuichila (Tardy *et al.*, 1974; SGM, 1977).

Posteriormente, se dio el emplazamiento de cuerpos intrusivos post-tectónicos del Complejo Intrusivo Velardeña (Ramírez-Peña, 2014) durante el Oligoceno (Felder, 1979; en Gilmer *et al.*, 1988) en la sucesión carbonatada, y con ello, la generación de las mineralizaciones metálicas en yacimientos de tipo skarn (Spurr y Garrey, 1908; Gilmer *et al.*, 1988; Jiménez-Franco, 2012). Cabe resaltar que el límite norte de la Mesa Central representa un cinturón de depósitos asociados con

sistemas tipo skarn, que incluye a Peñasquito, Velardeña, Mapimí y Concepción del Oro (Camprubí, 2013).

Durante el Mioceno Tardío dominó una tectónica extensional con orientación preferente ENE-WSW, la cual afectó la parte sur de la provincia de Sierras y Cuencas mexicanas, desde el sur de Arizona y Nuevo México hasta la Faja Volcánica Transmexicana (Henry y Aranda-Gómez, 2000). Durante este episodio se produjeron fosas y pilares que cortaron a las rocas de la Traversa de Parras (Tardy *et al.*, 1974), y que se relacionan con el emplazamiento de estructuras vetiformes de calcita (Pinet y Trembley, 2009).

3.2 Geología local

El área de Velardeña se localiza en la región norte de la Sierra de Santa María (*Figura 1*), la cual forma una estructura dómica de 35 km² elongada en dirección N45°W y paralela al eje del Anticlinorio de San Lorenzo (SGM, 1997). Allí afloran principalmente unidades sedimentarias del Cretácico Inferior y Superior cortadas por intrusiones subvolcánicas, y cubiertas parcialmente por depósitos volcanoclásticos y detríticos del Cenozoico, relacionados con el volcanismo de la Sierra Madre Occidental y con la sedimentación de sistemas fluviales recientes (SGM, 1997). De acuerdo con Nieto-Samaniego *et al.* (2005), las unidades sedimentarias del Jurásico Superior y Cretácico que componen el borde occidental de la Mesa Central fueron depositadas en un ambiente de mar profundo, dentro de la denominada Cuenca Mesozoica del Centro de México.

3.2.1 Formación Aurora

Las rocas más antiguas en el área de Velardeña pertenecen a la Formación Aurora (*Figura 11*), una unidad principalmente carbonatada introducida por Burrows (1910) como “Caliza Aurora” para referirse a una sucesión de calizas aflorantes en la Sierra La Aldea, cerca de la mina Aurora, en el tramo medio de la Cuenca de Chihuahua (SGM, 2013). Esta formación se extiende por todo el tramo transversal de la Sierra Madre Oriental (Sierra de Parras) y conforma los flancos de los anticlinales de las sierras de Santa María y San Lorenzo (Jiménez-Franco, 2012).

Imlay (1937) indicó que dentro de la unidad se distinguen dos facies principales, las cuales son transicionales entre sí. La primera aflora al norte en cercanías de la Sierra de Cupido, donde alcanza un espesor aproximado de 700 m y se compone principalmente de calizas dispuestas en capas gruesas intercaladas con estratos delgados de dolomías de grano fino. Asimismo, en estos niveles aparece una fauna dominada por rudistas, caprínidos y otros pelecípodos del género *Requienia*; y al tope, aparecen concreciones amarillas de chert. En contraste, la segunda facies aflora en la región sur donde tiene un espesor cercano a los 200 m y se compone de calizas estratificadas en capas gruesas y medianas, alternadas con delgadas capas de chert negro.

En el área de estudio la Formación Aurora está conformada principalmente por capas de caliza de 1,3 a 3 m de espesor con intercalaciones de pedernal en nódulos y concreciones (SGM, 1997). Por sus características, esta unidad puede confundirse con las calizas de la Formación Cuesta del Cura; sin embargo, la abundancia en amonoides en la primera, su menor cantidad de componentes aloquímicos y la ausencia de estratificación ondulosa, son características que permiten distinguirlas (Imlay, 1937; Hernández, 1991). De acuerdo con Hernández (1991), por la pureza composicional de las calizas, en el contacto con cuerpos intrusivos cenozoicos se generan aureolas de contacto formadas enteramente por granate y wollastonita.

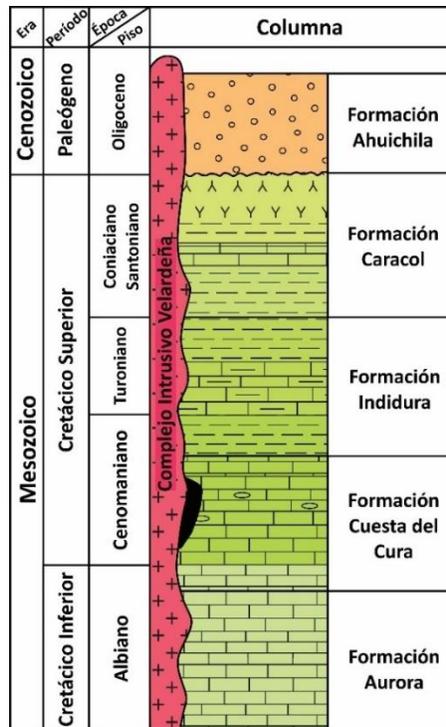


Figura 11. Columna estratigráfica simplificada del área de Velardeña. La zona sombreada representa las mineralizaciones de tipo skarn. Modificado del Servicio Geológico Mexicano (1997).

Por su contenido faunístico de cefalópodos y rudistas, Burrows (1910) proponuso una edad Albiano para la Formación Aurora, concordante con el intervalo Albiano-Turoniano que Garduño-Monreal (1983) estableció basado en criterios estratigráficos. Asimismo, Imlay (1937) precisó que la Formación Aurora representa una plataforma arrecifal de rudistas del Cretácico Inferior, la cual estaba influenciada hacia el sur por una zona de aguas más profundas y hacia el norte por un sector lagunar.

De acuerdo con Lehmann *et al.* (1999), la presencia de *Globigerinelloides algerianus* (foraminífero plantónico) y *Dufrenoyia* sp. (ammonoideo) en un intervalo arcilloso localizado entre las porciones media y superior de la Formación Aurora, sugieren una edad entre el Aptiano Medio y Superior. Dado que esta misma fauna se encuentra en la Formación La Peña de la Sierra Madre Oriental cerca de Saltillo y Monterrey, ambos intervalos arcillosos pueden correlacionarse y, de este modo, las rocas que infrayacen corresponderían a la Formación Cupido en vez de Aurora (Figura 12). Por tanto, estos autores indicaron que la Formación Aurora se restringe a los niveles carbonatados que suprayacen al bloque de Coahuila, hacia el noroeste. No obstante, en esta Tesis de Maestría se sigue la denominación inicialmente propuesta por Imlay (1936, 1937), por ser la de mayor aceptación entre las investigaciones que se enfocan en la zona de Velardeña.

3.2.2 Formación Cuesta del Cura

Sobreyaciendo a la Formación Aurora se ubica la Formación Cuesta del Cura (Figura 11), conformada principalmente por rocas calcáreas con interestratificaciones de pedernal y lodolitas (Ángeles-Villeda *et al.*, 2005). Esta unidad fue definida inicialmente por Imlay (1936), como una sucesión de calizas finamente estratificadas intercaladas con chert negro, que constituye los altos de la Sierra de Parras y se ubica estratigráficamente entre calizas coralinas de la Formación Aurora y calizas

arcillosas-yesíferas de la Formación Indidura. La sección tipo descrita por este autor, corresponde a la cuesta del Cura, localizada 4 millas al oeste de Parras, Coahuila. Cabe destacar que en la zona de estudio la formación compone los flancos exteriores de las Sierras de Santa María y San Lorenzo (Hernández, 1991) y, según Jiménez-Franco (2012), aflora en todo el largo de la traversa Monterrey-Torreón de la Sierra Madre Oriental.

PREVIOUS STRATIGRAPHIC INTERPRETATION (Sierra de Parras Imlay 1936, 1937)		GENERALIZED LITHOSTRATIGRAPHY SIERRA DE PARRAS	REVISSED STRATIGRAPHIC INTERPRETATION (Sierra de Parras)
CENOMANIAN	Cuesta del Cura	Deep water laminites	Cuesta del Cura
ALBIAN	Aurora ("rudist-bearing limestone")	Lime mudstones	Upper Tamaulipas (deep-water Aurora equivalent)
		Shales	"New" La Peña
		Shallow subtidal to peritidal carbonates	Cupido
		Dolomitized grainstones	
APTIAN	La Peña	Lime mudstones and intercalated wackestones/packstones	
		Shales and lime mudstones	Taraises
BARREMIAN	Cupido	Lime mudstones	HAUTERIVIAN

Figura 12. Comparación entre la litoestratigrafía de la Sierra de Parras propuesta por Imlay (1936, 1937) y la de Lehmann et al. (1999). Tomado de Lehmann et al. (1999).

Imlay (1937) distingue dos porciones diferenciables de la unidad: la superior y la inferior. La parte superior está compuesta por calizas de color gris medio a oscuro y marrón, con estratificación ondulosa y fina (espesores de 8 a 10 cm), e intercalaciones ocasionales de lodolitas. Por su parte, la porción inferior de la unidad comparte muchas características con la superior, pero difiere en que se presenta en capas más gruesas, de entre 10 y 20 cm.

Según Hoffmann (2003), en el área de estudio la Formación Cuesta del Cura está conformada por sucesiones monótonas de calizas de color gris oscuro a negro en bancos delgados a medianos (de 10 a 20 cm de espesor), con intercalaciones y lentejones de flint negro, limolitas y arcillolitas. Adicionalmente, las principales zonas con desarrollo de mineralizaciones metálicas en el área de Velardeña se encuentran localizadas en el contacto entre esta formación y los diques félsicos asociados con los intrusivos de la Sierra de Santa María (Hernández, 1991).

La edad de la Formación Cuesta del Cura fue inicialmente establecida por Imlay (1936, 1937) como Albiano Superior, quien, en ausencia de fósiles, sustentó su hipótesis en la similitud entre esta unidad y otras de tal edad localizadas en el norte de México. Sin embargo, investigaciones posteriores adelantadas por Bacon (1978) y Stinnesbeck (1983) en la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, caracterizaron fauna de ammonoideos del Albiano Superior-Cenomaniano.

Villarreal-Fuentes (2007) afirma que la Formación Cuesta del Cura puede correlacionarse con las formaciones Caliza Sierra Madre (Tabasco e Istmo de Tehuantepec), Tamaulipas Superior y Caliza El Abra de la cuenca Tampico-Misantla; y en su porción inferior con la Formación Kiamichi del Grupo Washita (noreste de México y oriente de Texas).

3.2.3 Formación Indidura

La Formación Indidura fue introducida inicialmente por Bose (1906) en la Sierra de Parras, Coahuila, y posteriormente descrita a detalle por Kelly (1936) como una sucesión conformada por tres partes: la inferior y superior ricas en lutitas, y la intermedia compuesta por calizas arcillosas, calizas lajosas y lutitas calcáreas. Su sección tipo se ubica en el Cerro Indidura de la Sierra de Santa Ana, a 20 km al WSW de Las Delicias, Coahuila. Asimismo, Kelly (1936) definió su límite inferior en la última capa de caliza maciza de color gris de la Formación Aurora, y el superior en los conglomerados discordantes.

Por su parte, Imlay (1936) realizó una descripción detallada de las facies que componen esta unidad en distintos sectores de la Sierra de Parras, indicando la presencia de cinco miembros con contactos transicionales entre sí. Litológicamente, estos paquetes están constituidos por intercalaciones de lutitas, calizas arcillosas y calizas, con variaciones en las proporciones de cada una. En la zona de estudio esta formación muestra un contacto transicional con la Formación Cuesta del Cura (*Figura 11*) y se considera como una sucesión tipo flysch (SGM, 1997).

Las capas calcáreas de esta unidad corresponden a micritas y biomicritas con abundancia de componentes biogénicos como: calciesferas, *Inoceramus labiatus*, equinoideos, pelecípodos, cefalópodos y foraminíferos de las especies *Globigerina sp.*, *Heterohelix sp.* y *Globotruncana sp.* (Kelly, 1936; Barboza-Gudiño *et al.*, 2004). Con base en el contenido faunístico y en la posición estratigráfica de la Formación Indidura, se considera una edad del Cenomaniano Superior al Turoniano (Kelly, 1936; Imlay, 1936, 1937; Barboza-Gudiño *et al.*, 2004).

3.2.4 Formación Caracol

El término Formación Caracol fue introducido por Imlay (1937) para referirse a una serie de tobas devitrificadas y lodolitas negras con cantidades subordinadas de calizas, que suprayacen concordantemente a la Formación Indidura e infrayacen concordantemente a la Lutita de Parras en el Arroyo Caracol, región central de la Sierra de Parras en Coahuila. De acuerdo con este autor, se distingue de la Formación Indidura por la presencia de tobas y de la Lutita de Parras por poseer una menor cantidad de lodolitas negras.

En la zona de estudio, esta unidad se compone de interestratificaciones de arenitas feldespáticas de grano fino y lodolitas ligeramente calcáreas (Jiménez-Franco, 2012; SGM, 2013; Ramírez-Peña, 2014). Su edad Santoniano-Coniaciano fue establecida por Imlay (1937) basado en criterios estratigráficos, dado que su contacto inferior es transicional con la Formación Indidura y el superior discordante con la Formación Ahuichila (*Figura 11*; Jiménez-Franco, 2012). De acuerdo con Nieto-Samaniego *et al.* (2005), esta unidad fue depositada en un ambiente continental-transicional, marcando la fase regresiva que finalizó con las condiciones marinas que prevalecieron desde el Jurásico Superior.

3.2.5 Formación Ahuichila

Esta unidad fue introducida por Rogers *et al.* (1961; en SGM, 1997) para referirse a una sucesión de conglomerados, arenitas, lodolitas, calizas lacustres y tobas que afloran en proximidades de Ahuichila, Coahuila. En el área de estudio, esta unidad está representada por conglomerados mal seleccionados con clastos de caliza y pedernal embebidos en una matriz limo-arenosa, intercalados con lentejones ocasionales de material epiclástico (Ramírez-Peña, 2014).

La Formación Ahuichila suprayace discordantemente a las rocas cretácicas previamente descritas (Figura 11), representando depósitos molásicos formados por la destrucción de las estructuras laramídicas (Tardy *et al.*, 1974), y compone principalmente lomeríos suaves y elevaciones poco pronunciadas (SGM, 1997). Fries *et al.* (1955) incluyeron a esta unidad dentro de las localidades de conglomerados rojos en México y les asignaron una edad Eoceno Superior-Oligoceno, basados en bioestratigrafía de vertebrados.

3.2.6 Cuerpos ígneos

Las rocas ígneas del área de estudio aparecen como intrusiones o flujos lávicos, siendo las primeras dominantes en las sierras de Santa María y San Lorenzo, donde se presentan como stocks alaskíticos y diques traquíticos que cortan la sucesión cretácica (Hernández, 1991; Figura 11), cuya edad K-Ar es de $33,1 \pm 1,4$ Ma (Felder, 1979; en Jiménez-Franco, 2012). Jiménez-Franco (2012) indicó que estos intrusivos son calcalcalinos, tipo I y metaluminosos. Según Gilmer *et al.* (1988), en la Sierra de Santa María afloran tres tipos principales de cuerpos ígneos: pórfidos cuarzolíticos, diques riolíticos y pórfidos con sanidina, los cuales se describen a continuación.

Los *pórfidos cuarzolíticos* constituyen el núcleo de la Sierra de Santa María y forman diques, silos y pequeños stocks ubicados hacia el sector nororiental de la sierra. En muestra de mano, estas rocas presentan textura porfirítica representada por fenocristales de cuarzo, plagioclasa, clinopiroxeno y biotita englobados en una matriz afanítica compuesta de feldespato alcalino y cuarzo, con pequeñas cantidades de titanita, circón y apatito. Estos cuerpos, a su vez, están cortados por *diques riolíticos* (muy relacionados con los principales cuerpos mineralizados del distrito) que se componen de cuarzo y feldespato alcalino como minerales principales, y menores concentraciones de apatito, definiendo una textura afanítica seriada. Por último, los *pórfidos de cuarzo y sanidina* afloran en la región suroccidental de la Sierra de Santa María y presentan alteración hidrotermal pervasiva que no permite caracterizarlos correctamente.

Otros autores como Spurr y Garrey (1908), Hernández (1991) y SGM (2013) afirmaron que predominan dos tipos de diques en la Sierra de Santa María: alaskíticos y traquíticos, relacionados en distinto grado con la mineralización metálica. Un ejemplo es el denominado dique de Santa María, una estructura regional de 25 m de espesor que se extiende aproximadamente 2,5 km y que, además, representa un control importante en los yacimientos de Velardeña (Hernández, 1991).

Por su parte, Ramírez-Peña (2004) introdujo una nueva denominación para hacer referencia a las rocas ígneas de este sector y estudió las relaciones de su emplazamiento. Es así como agrupó a cuerpos porfiríticos (La Esperanza y Velardeña, cuarzomonzodiorita y granodiorita, respectivamente) y cuerpos félsicos (La Aplita y La Industria) en lo que denominó "Complejo Intrusivo Velardeña". Asimismo, indicó que la forma cómica de la Sierra de Santa María responde a las relaciones geométricas que existen entre el fallamiento, el plegamiento periférico y la estratificación de las rocas sedimentarias cretácicas.

3.2.6.1 Intrusivo La Esperanza

Este cuerpo aflora en la porción occidental de la sierra de Santa María, como un dique de composición cuarzomonzodiorítica y textura porfirítica, de ca. 2 km de longitud, espesor aproximado de 400 m y rumbo N-S. El intrusivo está encajado en rocas sedimentarias del Cretácico Inferior y se compone de fenocristales de plagioclasa, anfíbol, piroxeno y cuarzo, embebidos en una matriz de grano fino.

3.2.6.2 *Intrusivo Velardeña*

Intrusivo de composición granodiorítica que aflora al noreste de la sierra de Santa María encajado en rocas de la Formación Cuesta del Cura, el cual define un dique orientado NW-SE con una continuidad lateral de 2,5 km y un espesor de entre 400 y 550 m. Su textura general es porfirítica, aunque locamente brechoide, y se compone de fenocristales de cuarzo y plagioclasa inmersos en una matriz microcristalina de color gris.

3.2.6.3 *Intrusivo La Aplita*

Las rocas de este intrusivo afloran al noreste de la sierra de Santa María, y se encuentran encajadas en las formaciones Cuesta del Cura al sur y Caracol al norte. Al igual que los otros cuerpos, se trata de un dique de cerca de 2 km de longitud y 100-200 m de espesor, conformado por rocas de textura microcristalina y alteración hidrotermal moderada. Localmente, esta unidad presenta un fallamiento significativo que genera zonas de brecha de hasta 0,6 m de espesor.

3.2.6.4 *Intrusivo La Industria*

El Intrusivo de La Industria aflora en la porción suroccidental de la sierra de Santa María y corresponde a un silo félsico con alteración hidrotermal pervasiva, orientado NW-SE y de cerca de 250 m de longitud. Dado que la roca muestra fuerte hidrotermalismo, sus características primarias están obliteradas casi totalmente, presentando fenocristales de cuarzo relictos.

3.3 Geología estructural

Los estilos de deformación presentes en la zona de Velardeña responden a un conjunto de procesos ligados con la historia tectónica del sector transversal de la Sierra Madre Oriental (o Traversa de Parras; *Figura 10*). Es así, como en esta zona se registran tres eventos asociados con diversas estructuras (ej., fallas y pliegues): la tectónica compresiva de la Orogenia Laramide (pre-mineralización), los eventos extensionales post-Laramide y pre-Sierras y Cuencas (sin-mineralización), y la fase extensional de las Sierras y Cuencas Mexicanas (post-mineralización; Pinet y Tremblay, 2009).

Entre el Cretácico Tardío y el Eoceno, en el Sector Transversal de Parras se desarrolló una tectónica de piel fina, cuya zona de despegue se localizó en los niveles evaporíticos depositados durante el Jurásico Medio (Formación La Boca; Tardy *et al.*, 1974; Fitz-Díaz *et al.*, 2018), y su estilo de deformación estuvo dominado por pliegues en vez de fallas (Eguiluz-de Antuñano *et al.*, 2000). Los pliegues son angostos y alargados, están orientados N70°W y registran un acortamiento aproximado del 37% (Eguiluz-de Antuñano *et al.*, 2000).

Dado el rasgo morfológico pronunciado de la Sierra de Parras, algunos autores han sugerido la existencia de una estructura cenozoica de grandes dimensiones que controla tanto el tramo de la Sierra Madre Oriental como el desarrollo de varios yacimientos metálicos (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005); aunque aún no se han encontrado evidencias suficientes para confirmar esta hipótesis. Para ello, Camprubí (2013) propone la posible existencia de una zona de debilidad cortical relacionada con la reactivación de la sutura entre el Terreno Central y Oaxaquia durante los eventos orogénicos Laramide y Sevier, que permitió el ascenso de magmas y la formación de múltiples yacimientos.

De acuerdo con Ramírez-Peña (2014), la intrusión de los cuerpos ígneos no estuvo controlada por fallas y, por tal, su emplazamiento produjo fallas normales, pliegues periféricos y algunas fallas de acomodo. Asimismo, este autor mencionó la existencia de “vetas-falla” de espesores muy variables

(entre 4 cm y 4 m), formadas enteramente por calcita en diente de perro. Estas estructuras, según Pinet y Tremblay (2009), no muestran relación ni con mineralización metálica ni con el fallamiento asociado con las venas epitermales, y se asocian con una tectónica extensional póstuma de tipo Sierras y Cuencas.

4 METODOLOGÍA

4.1 Bibliografía y selección de muestras

Inicialmente, se realizó una recopilación bibliográfica centrada en la geología regional y local de la Sierra de Santa María, y en los estudios previos realizados en los cuerpos mineralizados del Distrito Minero de Velardeña. Esta investigación incluyó artículos científicos, reportes técnicos de la mina, mapas geológicos, tesis de maestría y doctorado, entre otras fuentes.

Actualmente, Industrias Peñoles realiza labores mineras en la zona de Velardeña y fueron quienes proporcionaron las muestras estudiadas en esta Tesis de Maestría. La mayoría de éstas fueron tomadas de los barrenos SMBD-58, SMBD-42, SMBD-43 y SMBD-71, que cortan al cuerpo de Santa María en distintas direcciones (*Figura 13*) y son representativos de las áreas mineralizadas y sus litologías asociadas. De tal modo, se seleccionaron un total de 67 muestras de mano (56 núcleos de perforación y 11 muestras del interior de la mina).

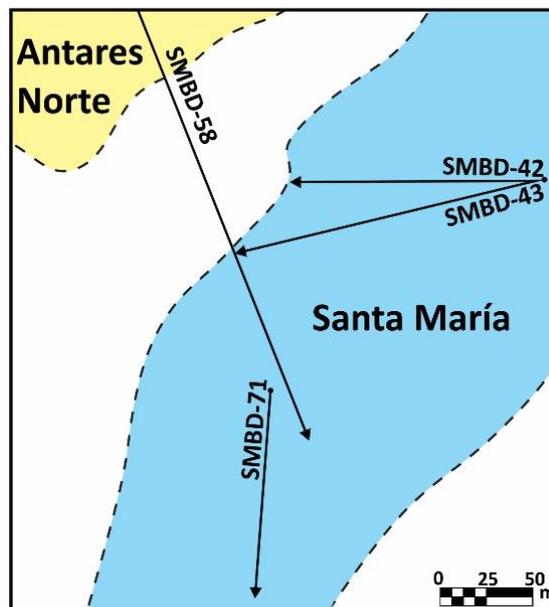


Figura 13. Modelo generado por Industrias Peñoles donde se muestra la morfología de los cuerpos de Santa María y Antares Norte. Asimismo, se presenta la distribución de los barrenos empleados en esta Tesis (SMBD-42, SMBD-43, SMBD-58 y SMBD-71). Las líneas punteadas representan los límites de cada cuerpo (Antares en amarillo y Santa María en azul cielo). Fuente: Industrias Peñoles (2010).

4.2 Petrografía y minerografía

Fueron estudiadas un total de 30 secciones delgadas y 29 briquetas en un microscopio de luz reflejada y transmitida Olympus BX-60, ubicado en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Con ello, se realizó una descripción detallada de las fases minerales, sus asociaciones y texturas para así establecer la secuencia de cristalización.

4.3 Microscopía electrónica de barrido

La obtención de imágenes de electrones retrodispersados y análisis semicuantitativos se realizó en un microscópico electrónico de barrido ambiental con un EDS acoplado, Hitachi TM-1000, localizado en el Laboratorio de Petrografía y Microtermometría de Inclusiones Fluidas del Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Estos análisis se llevaron a cabo a 15KeV con un tiempo de adquisición de 30 s, y su principal objetivo fue la caracterización de fases desconocidas y observación de variaciones composicionales internas de los minerales.

4.4 Microsonda electrónica (EMPA)

Los análisis puntuales de química mineral se realizaron en cristales de arsenopirita, cobres grises, sulfosales de Pb-Bi-Se, granates y magnetita para su caracterización composicional y posterior cálculo de la temperatura de cristalización mediante geotermometría. Estos estudios se llevaron a cabo en la microsonda electrónica JEOL JXA-8900R ubicada en el Laboratorio Universitario de Petrología del Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Los análisis se realizaron con un voltaje de 20 KeV, 20 nA de corriente en la muestra, 4000 magnificaciones, un spot de 1 μm de diámetro y, en promedio, 40 s de conteo de pico por elemento. Los estándares empleados para cada mineral se presentan en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Estándares utilizados en los análisis EMPA por cada mineral estudiado. Porcentajes en % en peso.

Magnetita		
Elemento	Estándar	Procedencia
Ti	Ilmenita	SPI #02753-AB
Fe	Magnetita	
Si	Diópsido	
V	Espinela	Estándar interno del laboratorio [Cr (58,55%), Fe (14,08%), Mg (13,74%), Al (13,07%), Mn (0,44%), V (0,15%), Ti (0,06%), Ni (0,06%)]
Mn	Espinela	
Al	Espinela	
Cr	Magnetita	SPI #02753-AB
Co	Pentlandita	
Mg	Espinela	Estándar interno del laboratorio
Ni	Olivino	SPI #02753-AB
Zn	Bustamita	
Arsenopirita		
Elemento	Estándar	Procedencia
S	Arsenopirita	Estándar interno del laboratorio [Fe (34,00%), S (19,00%), As (47,00%)]
Fe	Marcasita	SPI #02753-AB
As	Arsenopirita	Estándar interno del laboratorio
Bi	BiSe	SPI #02753-AB
Ni	Pentlandita	
Sb	Estibina	
Co	Pentlandita	
Cobres grises y sulfosales de plomo		
Elemento	Estándar	Procedencia
S	Marcasita	SPI #02753-AB
Fe	Marcasita	
Ag	Plata pura	SPI #02757-AB
Pb	Galena	SPI #02753-AB
Te	Te puro	SPI #02757-AB

Sn	Casiterita	SPI #02753-AB
As	Arsenopirita	Estándar interno del laboratorio
Bi	BiSe	SPI #02753-AB
Cu	Cuprita	
Se	BiSe	
Sb	Estibina	
Zn	Esfalerita	

4.5 Isótopos estables

4.5.1 Carbono y oxígeno

Se separaron un total de 50 muestras de calcita provenientes de las calizas frescas y recristalizadas, mármoles, venas, rellenos y otras estructuras menores, para establecer sus valores $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$, y, con ello, la(s) fuente(s) de estos componentes. Estos análisis isotópicos se efectuaron en el Laboratorio de Isótopos Estables del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, ubicado en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El método empleado en las mediciones es el explicado en McCrea (1950), en el cual el CO_2 analizado se libera durante la reacción entre calcita y ácido ortofosfórico (H_3PO_4) a 25 °C y durante 36 horas. Los materiales involucrados, las muestras y los análisis fueron manejados y preparados siguiendo el procedimiento descrito en Révész *et al.* (2001) y Révész y Landwehr (2002), empleando un Gas Bench II acoplado a un espectrómetro de masas Thermo Finnigan MAT 253. Los datos de $\delta^{13}\text{C}$ son reportados en desviaciones por mil (‰) del estándar VPDB (*Vienna Pee Dee Belemnite*), normalizados a los valores de -46,6‰ para LSVEC (LiCO_3) y 1,95‰ para NBS19 (Coplen *et al.*, 2006). Por su parte, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ son expresados en desviaciones por mil de los estándares VPDB y VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*), normalizados como se indica en Coplen (1988).

Para las mediciones fueron empleados los materiales de referencia: LSVEC, NBS-19 y NBS-18. Además, cada 7 muestras se introdujo un estándar interno de CaCO_3 (producido por Sigma-Aldrich Corporation) con el fin de verificar la repetitividad y reproductibilidad de los resultados, que para el caso de oxígeno y carbono es menor a 0,2‰. Cabe resaltar que el estándar de CO_2 empleado, tiene una pureza del 99,998%, la cual es calibrada diariamente con un estándar de dióxido de carbono de OZTECH Trading Corporation, cuya composición isotópica es de: $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} = -9,78\text{‰}$ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = -10,99\text{‰}$. Un estándar adicional de calcita con composición isotópica conocida ($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = -8,08 \pm 0,05\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} = -21,4 \pm 0,06\text{‰}$) fue analizado cada 7 muestras, para garantizar la repetitividad y reproductibilidad de los datos.

4.5.2 Azufre

Fueron preparadas 33 muestras de sulfuros provenientes de los sulfuros masivos, rocas ígneas, exoskarns y estructuras (vetillas, venas y rellenos), para realizar estudios de isótopos estables de azufre. La principal finalidad de esta técnica fue establecer la fuente de este elemento (magmática, sedimentaria, sulfatos, etc.). Para ello, se molieron fragmentos de zonas mineralizadas, los cuales fueron purificados con un limpiador ultrasónico previo a la separación manual de cristales de esfalerita, arsenopirita, pirita, pirrotina, galena y marcasita, en una lupa binocular Zeiss Stemi 508 del Laboratorio de Separación de Arcillas, Instituto de Geología (UNAM).

Los análisis se llevaron a cabo en los Centres Científics i Tecnològics de la Universitat de Barcelona, con ayuda de un espectrómetro de masas de relación isotópica Delta Plus XP Thermofisher, con

pirolizador TC-EA y analizador elemental Carlo Erba 1108. Se emplearon cápsulas de Sn para producir la reacción de los sulfuros con un agente oxidante (V_2O_5) y así liberar SO_2 , que posteriormente fue medido en el espectrómetro. Los resultados obtenidos son expresados en la notación delta ($\delta^{34}S$), como desviaciones por mil (‰) del estándar VCDT (*Vienna-Canyon Diablo Troilite*) cuya desviación es de $\pm 0,2\text{‰}$. Asimismo, los datos fueron calibrados empleando los siguientes materiales de referencia internacional: IAEA NBS-127 ($\delta^{34}S_{VCDT} = +20,3 \pm 0,4\text{‰}$), IAEA SO-5 ($\delta^{34}S_{VCDT} = +0,5 \pm 0,2\text{‰}$), IAEA SO-6 ($\delta^{34}S_{VCDT} = -34,1 \pm 0,2\text{‰}$), IAEA S-1 ($\delta^{34}S_{VCDT} = -0,3\text{‰}$), IAEA S-2 ($\delta^{34}S_{VCDT} = +22,7 \pm 0,2\text{‰}$), IAEA S-3 ($\delta^{34}S_{VCDT} = -32,3 \pm 0,2\text{‰}$), IAEA S-4 ($\delta^{34}S_{VCDT} = +16,9 \pm 0,2\text{‰}$) y YCEM ($\delta^{34}S_{VCDT} = +12,8\text{‰}$).

4.6 Petrografía y microtermometría de inclusiones fluidas

La petrografía de inclusiones fluidas fue realizada en 17 secciones delgadas doblemente pulidas en un microscopio de luz transmitida Olympus BX-52 localizado en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, con el fin de establecer las diferentes asociaciones de inclusiones fluidas y sus características (forma, grado de relleno, modificaciones post-atrapamiento, etc.). Por su parte, la microtermometría de inclusiones fluidas se llevó a cabo en 18 muestras con ayuda de la platina Linkam THMSG 600 acoplada a un microscopio Olympus BX60, ubicada en el Laboratorio de Catodoluminiscencia e Inclusiones Fluidas del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología (UNAM). Este equipo cuenta con una precisión de $\pm 0,2\text{ °C}$ y $\pm 2\text{ °C}$ a bajas y altas temperaturas, respectivamente.

El procesamiento de los datos se realizó con ayuda del *software* BULK (Bakker, 2003), empleando el sistema químico $H_2O-NaCl-CaCl_2-CH_4$, el modelo de interacción iónico de Bakker (1999) y proporciones de $NaCl:CaCl_2$ de 0,05:0,95.

4.7 Espectroscopía infrarroja

Fueron realizados estudios de espectroscopía infrarroja en una sección delgada doblemente pulida (muestra SM-58-11) para caracterizar los compuestos orgánicos presentes en los fluidos de las inclusiones. Para la medición, no se realizó ningún tratamiento previo a la muestra y se empleó un espectrofotómetro de Infrarrojo de la marca Perkin Elmer® modelo FT-IR Spectrophotometer Spectrum 100, que cuenta con un accesorio de muestreo ATR (Attenuated Total Reflection), ubicado en el Instituto de Ciencias Nucleares (UNAM).

4.8 Fechamientos $^{40}Ar/^{39}Ar$

Los análisis de $^{40}Ar/^{39}Ar$ fueron llevados a cabo en dos muestras de adularia obtenidas de rocas ígneas pervasivamente alteradas y con sulfuros asociados, por lo que las edades obtenidas son representativas del evento mineralizante. Las muestras fueron inicialmente trituradas y separadas con ayuda de un microscopio estereoscópico Zeiss Stemi 508, localizado en el Laboratorio de Separación de Arcillas del Instituto de Geología (UNAM) y seguidamente purificadas en el Geochronology Laboratory de la Oregon State University (OSU). La irradiación empleada fue la 20-OSU-01 efectuada en el reactor TRIGA CLICIT del Radiation Center (OSU), junto con un monitor de flujo FCT-NM ($28,201 \pm 0,023\text{ Ma}$; Kuiper *et al.*, 2008). Para bloquear los neutrones lentos (termales), el equipo cuenta con una cobertura de Cd.

El equipo usado para la medición fue un espectrómetro de masas multicolector ARGUS VI disponible en el Geochronology Laboratory de la OSU, el cual cuenta con cinco detectores Faraday, todos equipados con resistores de $10^{13}\ \Omega$, y un multiplicador de electrones CuBe de conteo iónico próximo

al detector Faraday de masa 36. Las muestras irradiadas se ubicaron en una cámara de ultra-alto vacío, y fueron calentadas progresivamente (*stepwise heating*) con un láser de CO₂ Synrad de 25 W, para provocar la liberación del Ar. Adicionalmente, se realizaron correcciones para Ar no radiogénico (interferencia por Cl, Ca y K, *blank* Ar y Ar atmosférico). Las ecuaciones de edad empleadas son las presentadas por Min *et al.* (2000) y los datos se muestran con una precisión analítica de 2σ.

5 MINERALOGÍA Y QUÍMICA MINERAL DEL CUERPO DE SANTA MARÍA

5.1 Descripción macroscópica

Por medio de la descripción macroscópica detallada de los núcleos de perforación y muestras de mano (ver *Anexo 12.1*) se logró distinguir varias litologías en el cuerpo mineralizado de Santa María, siendo las principales: aplitas, mármoles, exoskarns, rocas sedimentarias (carbonatadas y clásticas), brechas y sulfuros masivos.

5.1.1 Rocas sedimentarias sin metamorfismo

Estas muestras proceden de los núcleos del barreno SMBD-71 e incluyen calizas grisáceas, conglomerados, arenitas y lodolitas. Este barreno atraviesa las zonas más distales del yacimiento, donde los efectos de metamorfismo de contacto, alteración hidrotermal y circulación de fluidos son incipientes o inexistentes (*Figura 14A-C*).

Los conglomerados están constituidos por clastos de calizas muy alteradas de tonalidades gris, gris verdoso y beige rodeados por una matriz mayoritariamente calcárea, con bandas sinuosas de color negro (horizontes lodolíticos). Puntualmente, se hallan diseminaciones de piritita cúbica en la matriz. Por su parte, las calizas son de color gris claro a gris marrón, fueron clasificadas como wackestones y mudstones (Dunham, 1962) y exhiben pequeños peloides y, ocasionalmente, cristales redondeados de calcita que podrían corresponder a organismos inmersos en una matriz calcárea de grano más fino. Estas rocas muestran distintos grados de recristalización por efectos de metamorfismo térmico. Por lo regular, las calizas están cortadas por vetillas y venas multidireccionales y de distintos espesores (<5 cm) de calcita lechosa, y, en menor proporción, por esfalerita y piritita. Localmente, se desarrollan mantos masivos de sulfuros en estas estructuras.

5.1.2 Rocas ígneas

Estas rocas son de color gris claro y beige (*Figura 14D-H*) y componen cuerpos irregulares de distintos espesores, que ocasionalmente tienen continuidad de un par de metros en los barrenos. Su composición es difícil de establecer con certeza, por la alteración cuarzo-sericítica intensa y pervasiva, ya que solo se conservan pequeños relictos de cristales tabulares, posiblemente de plagioclasa. Adicionalmente, fueron identificadas otras alteraciones hidrotermales como: cloritización, alteración potásica de biotita secundaria y silicificación.

Los minerales de mena se encuentran en asociación cercana con la alteración hidrotermal y se disponen diseminados, en reemplazamientos pervasivos y en clústeres. Asimismo, se relacionan con vetillas de carbonato (<3,5 cm) con geometrías discontinuas y rectilíneas, que desarrollan cristales euhedrales con texturas drusiformes en algunas cavidades. Cortando a lo anterior, se aprecian óxidos de Fe en parches, vetillas y *stockworks*, formados por la oxidación incipiente a moderada de los sulfuros. En algunas muestras, se aprecian estructuras circulares compuestas por núcleos de fluorita y adularia (cristales rómbicos), y bordes de carbonato, esfalerita, piritita y arsenopiritita.

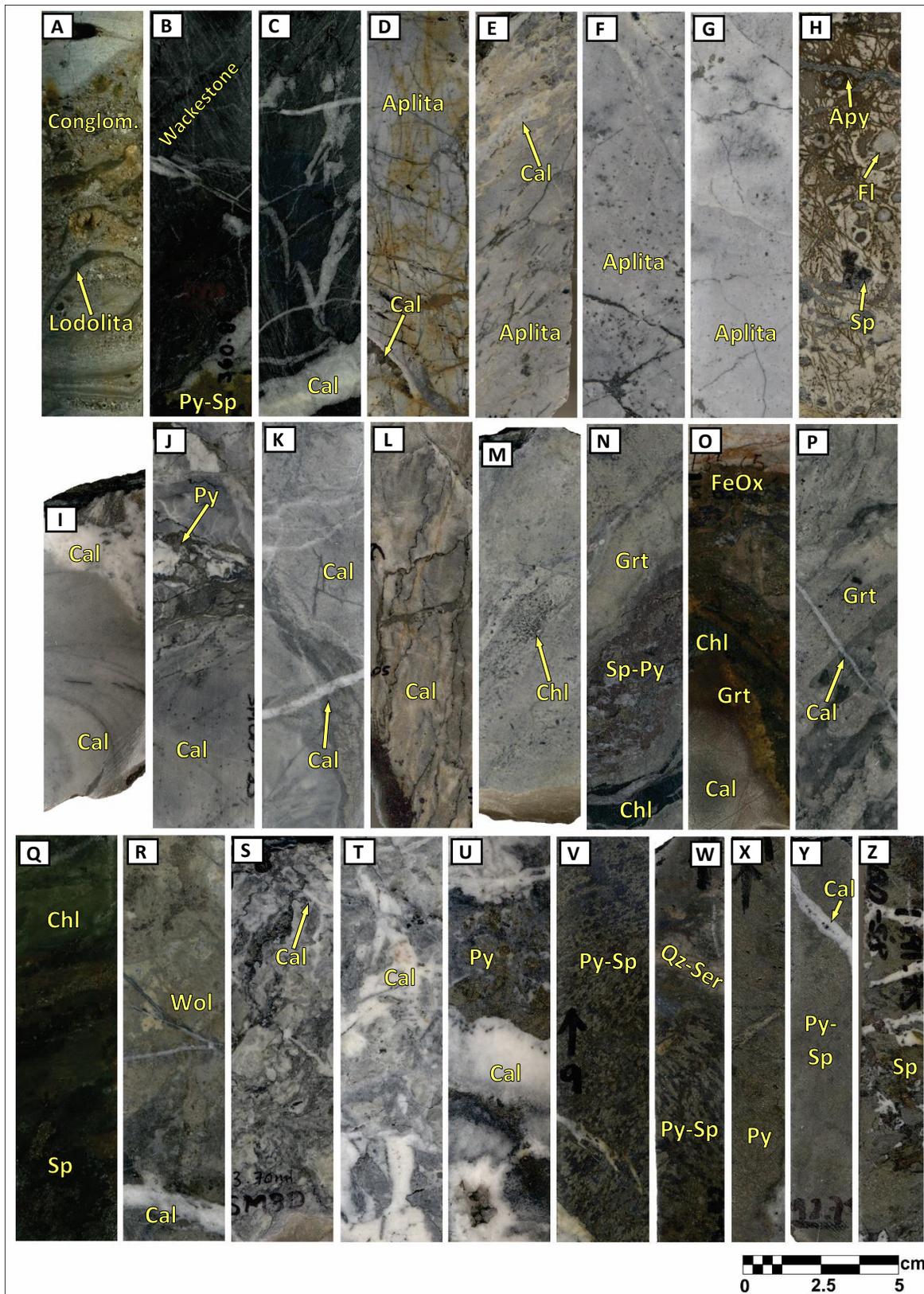


Figura 14. Fotografías de los núcleos más representativos de las litologías que componen el cuerpo mineralizado de Santa María. Apy: arsenopirita, Cal: calcita, Chl: clorita, Fl: fluorita, Grt: granate, Py: pirita, Qz: cuarzo, Ser: sericita, Sp: esfalerita, Wol: wollastonita.

5.1.3 Mármoles

Hacia la periferia y en otras regiones del yacimiento se aprecian mármoles de color gris y beige (*Figura 14I-M*), con variaciones texturales muy marcadas, denotadas por las diferentes tonalidades y tamaño de los cristales de fino a medio. Mineralógicamente, estas rocas son muy monótonas, mostrando una predominancia de carbonatos y, muy localmente, cuarzo, fluorita, clorita, minerales de la arcilla y epidota. Cortando a los mármoles, se encuentran vetillas y venas de calcita con escaso cuarzo, de diferentes espesores (<1 a 3 cm) y geometrías rectilíneas y sinuosas. Por lo regular, los mármoles exhiben escasa pirita y arsenopirita diseminadas, sin asociación preferencial. No obstante, la proporción de sulfuros (pirita, esfalerita y arsenopirita) y algunas sulfosales puede incrementarse en las venas de calcita, desarrollándose en cristales euhedrales y en agregados.

5.1.4 Exoskarns

El exoskarn es una de las litologías más recurrentes en el yacimiento (*Figura 14N-R*), encontrándose principalmente en la zona distal del cuerpo de Santa María, siguiendo el trazo del barrenado SMBD-43. Estas rocas normalmente muestran un bandeamiento composicional definido por intercalaciones de sectores beige (wollastonita), grises (calcita) y verdes (granate, clorita y/o epidota). Mineralógicamente, se constituyen de fases anhidras como granate, wollastonita, cuarzo y calcita, y fases hidratadas como clorita y epidota. Asimismo, los exoskarns pueden presentar agregados masivos de sulfuros (esfalerita-arsenopirita pirita-calcopirita) que componen bandas y reemplazamientos pervasivos.

Adicionalmente, estas rocas pueden estar cortadas por venas y vetillas (<2 cm) rectilíneas de calcita lechosa, con desarrollos locales de halos milimétricos de color gris verdoso y sin mineralización metálica asociada (*Figura 14P*).

5.1.5 Brechas hidráulicas

Las brechas son clasto-soportadas a matriz-soportadas (*Figura 14S-U*), y están compuestas por una matriz de carbonatos de color blanco y gris medio a oscuro, que embebe fragmentos angulares a subangulares de calizas, mármoles y cuerpos de sulfuros masivos. Los carbonatos de la matriz pueden mostrar desarrollos drusiformes en algunas cavidades y zonación marcada por minerales metálicos muy finos que definen los bordes de crecimiento del mineral.

Por su parte, los minerales de mena aparecen en muy bajas proporciones y corresponden a pirita y esfalerita, esta última localmente zonada. La mena se dispone diseminada indistintamente en cristales de grano muy fino en la matriz, y de mayor tamaño en los clastos.

5.1.6 Sulfuros masivos

Se trata de aglomeraciones masivas de minerales metálicos localizadas en sectores específicos del depósito, que pueden desarrollar bandeamientos, agregados, clústeres, vetillas, entre otras texturas (*Figura 14V-Z*). Normalmente, se localizan en proximidad de las rocas ígneas y se componen de pirita, esfalerita (caramelo y rica en hierro), galena, calcopirita y pirrotina. No obstante, también se asocian puntualmente con los mármoles y exoskarns, y, en ocasiones, su filiación con algún tipo de roca es difícil de establecer por lo masivo del reemplazamiento. La ganga encontrada en estas rocas se compone principalmente de cuarzo, fluorita y calcita. Muy frecuentemente, los sulfuros masivos están cortados por vetillas y venas de calcita lechosa (<3 cm), gris y beige, con morfología sinuosa, rectilínea y, ocasionalmente, textura brechada.

5.2 Mineralogía de mena y ganga

Mediante la descripción microscópica de secciones delgadas y superficies pulidas, fueron caracterizadas las siguientes litologías en el yacimiento de Santa María: exoskarns, rocas ígneas de composición intermedia con distintos grados y tipos de alteración hidrotermal, wackestones, sulfuros masivos, brechas y venas de calcita. Las descripciones de cada muestra están disponibles en el *Anexo 12.1*.

La mineralogía del depósito es muy diversa, especialmente en cuanto a minerales traslúcidos respecta, y muestra variaciones pronunciadas en distancias cortas. En general, las fases más recurrentes son calcita y cuarzo, presentes tanto en las fases prógrada (alta temperatura) y retrógrada (baja temperatura) del skarn, como en las alteraciones hidrotermales de las rocas ígneas (adularia pseudoromboédrica-cuarzo±sericita, biotita-moscovita y clorita-epidota-calcita). La calcita y el cuarzo también se observan a modo de estructuras vetiformes y formando parte de la ganga. Asimismo, fue identificada una asociación calcisilicatada de alta temperatura en los exoskarns, conformada mayoritariamente por granate, wollastonita y vesubianita, a la que se superponen minerales de menor temperatura como tremolita-actinolita, clorita, sericita, moscovita, epidota, entre otros. Cabe destacar que el grueso de la mineralización viene acompañado por los silicatos de menor temperatura y se dispone en parches, vetillas, rellenos intercristalinos y reemplazamientos pervasivos.

Por su parte, los minerales de mena son principalmente sulfuros y se disponen en agregados masivos, en venas, parches y diseminados, en asociación preferencial con la fase retrógrada de los skarns (tremolita, clorita, actinolita, epidota, cuarzo, fluorita, adularia y calcita) y con la alteración hidrotermal en las rocas ígneas (adularia, fluorita, cuarzo, sericita y calcita). Los minerales más comunes son pirita y esfalerita (70-90% de la mineralización), y se asocian con cantidades muy variables de galena, calcopirita, arsenopirita, pirrotina, marcasita, cobres grises, magnetita y sulfosales de Pb-Se-Bi.

5.2.1 Wackestones

Las calizas componen la zona distal del cuerpo de Santa María y corresponden a wackestones de peloides, con ligeras evidencias de modificación por efectos del metamorfismo térmico y metasomatismo (*Figura 15A-B*). Estas rocas se componen principalmente de microesparita que rodea peloides de micrita con escasa recristalización, organismos redondeados (¿foraminíferos?), algunos granos aislados de cuarzo y turmalina, y masas de materia orgánica. Cortando, se aprecian vetillas (<1 cm) continuas, rectilíneas, sinuosas y multidireccionales de calcita limpia y terrosa (*Figura 15B-D*), con mineralización puntual en agregados y semi-masiva.

Los minerales de mena se disponen en un manto de aproximadamente 3,5 cm de ancho, en asociación con calcita, diseminados a modo de pequeños clústeres en toda la roca y en vetillas menores a 1 cm. Los principales constituyentes son esfalerita (60%) y pirita arseniosa (30%), en forma de agregados masivos mayores a 5 mm, asociados con cantidades subordinadas de arsenopirita (5%), calcopirita (<1%), galena (<1%) y pirrotina (<1%); estos últimos en agregados finos e inclusiones sólidas dentro de la esfalerita y pirita (*Figura 15E-F*). Comúnmente, la esfalerita muestra textura enferma por la abundancia de inclusiones de pirrotina, calcopirita, pirita y arsenopirita; y la pirita tiene textura ojo de pájaro (*Figura 15E*).

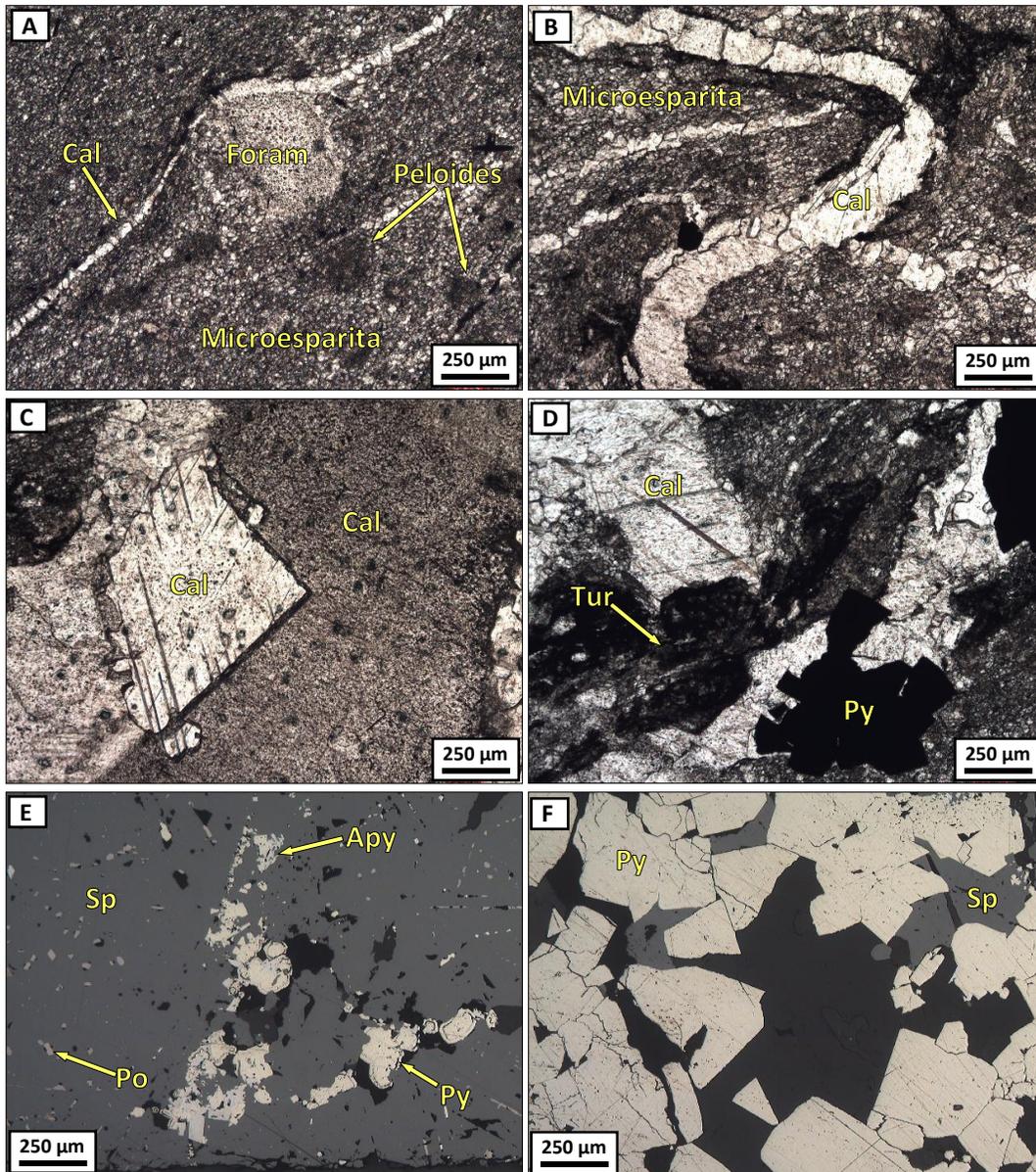


Figura 15. Fotomicrografías de wackestone de peloides con mineralización de pirita y esfalerita. A y B. Microesparita, posibles foraminíferos (Foram) y peloides de micrita, cortados por vetillas sinuosas de calcita (Cal). C. Vena de calcita de aspecto terroso al núcleo y limpio al borde. D. Agregados de pirita (Py) disseminados y superpuestos a las vetillas y a la microesparita. También se aprecian masas de materia orgánica superpuestas y embebiendo un grano de turmalina (Tur). E. Pirita con textura ojo de pájaro, en asociación con arsenopirita (Apy) dentro de masas de esfalerita (Sp) con inclusiones de pirrotina (Po). F. Agregados de pirita con rellenos intercrystalinos de esfalerita.

5.2.2 Mármoles

Los mármoles componen paquetes de espesores variables entre algunos milímetros (intercalados con exoskarns) y decenas de centímetros. Su textura es granoblástica con foliación incipiente local, y el tamaño de grano exhibe variaciones entre 50 y 250 μm (Figura 16); asimismo, predominan los cristales de calcita poligonales con formación de ángulos diedros (Figura 16A).

Mineralógicamente, estas rocas están constituidas por calcita y, en menor medida, cuarzo, tremolita-actinolita, granate, wollastonita, clorita, sericita y serpentina (Figura 16B-D). Los granates y la wollastonita se muestran en asociación cercana con calcita y en cristales esqueletas, a los que se superponen las fibras de tremolita-actinolita (Figura 16C-D). La clorita, sericita y serpentina se disponen en agregados masivos de cristales anhedrales finos, en paragénesis ocasional con sulfuros. La asociación de calcita-cuarzo-granate±wollastonita coincide con la parte alta de la facies hornfelsa-hornblenda y, dado el reemplazamiento de éstos por tremolita-cuarzo-actinolita-calcita-clorita-serpentina, se infiere un descenso de las condiciones metamórficas hasta la facies hornfelsa albíta-epidota. Del mismo modo, son comunes las venas (1-5 cm) y vetillas (150-500 µm) de geometría rectilínea y continua (Figura 16A), formadas por calcita y contenidos menores de sulfuros, sulfosales y minerales de la arcilla.

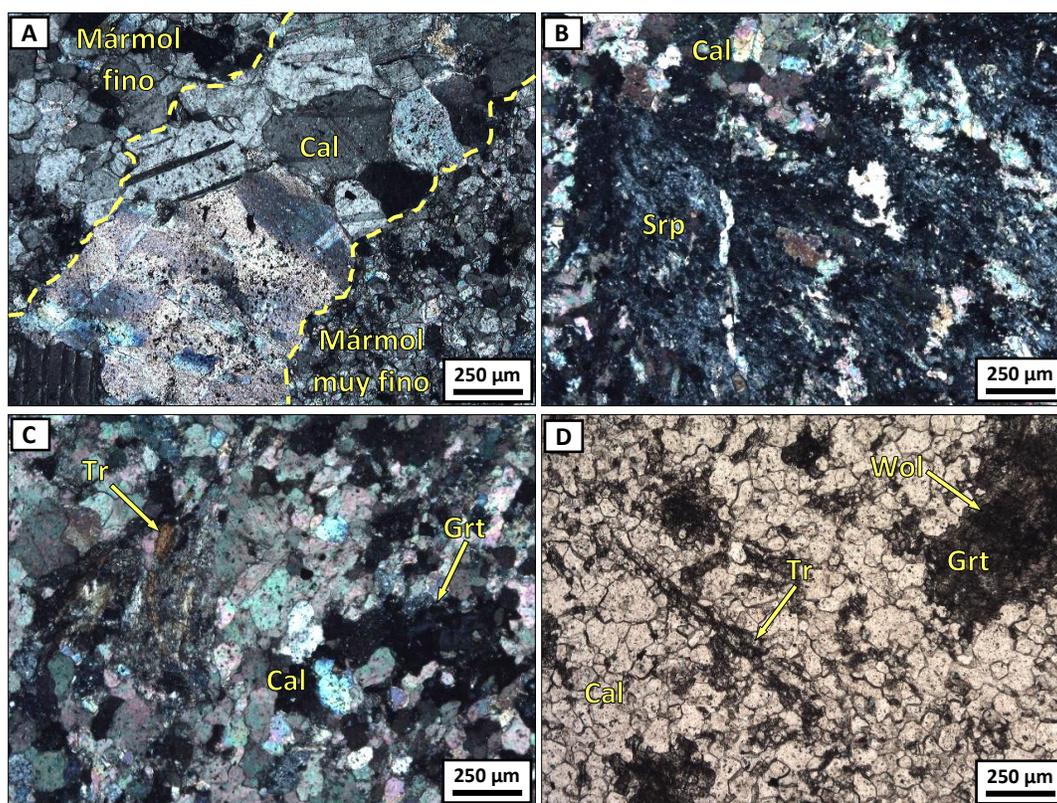


Figura 16. Fotomicrografías de los mármoles. A. Vena de calcita (Cal) dividiendo un dominio textural de grano muy fino de uno de grano fino. Nótese la forma poligonal de la calcita y la formación de ángulos diedros, causados por la recristalización estática durante el metamorfismo térmico. B. Agregados de serpentina (Srp) entre cristales de calcita. C y D. Ramilletes de tremolita-actinolita (Tr-Act), granate (Grt) diseminado y wollastonita (Wol) como fases accesorias.

Por su parte, los minerales metálicos se agrupan en zonas con textura masiva (Figura 17) y se asocian estrechamente con cuarzo, sericita, clorita y calcita (Figura 17A-B). Las fases dominantes son pirita y esfalerita rica en Fe (ca. 85% de la mineralización; Figura 17A-F), con cantidades menores de galena (5-9%), arsenopirita (3%), calcopirita (<1%), cobres grises (<1%) y pirrotina (<1%; Figura 17C-F). La pirita y la esfalerita muestran texturas masivas e incluyen minerales como galena, pirrotina y calcopirita. La arsenopirita (3%) se encuentra en inclusiones dentro de la galena y en agregados, y la galena en grandes cristales que rellenan intersticios de la arsenopirita y pirita (Figura 17C) y reemplazan a la esfalerita (Figura 17C-D). En sectores, la esfalerita muestra enfermedad de la

calcopirita en enrejado (Figura 17F) y desarrolla intercrecimientos irregulares con galena (Figura 17D).

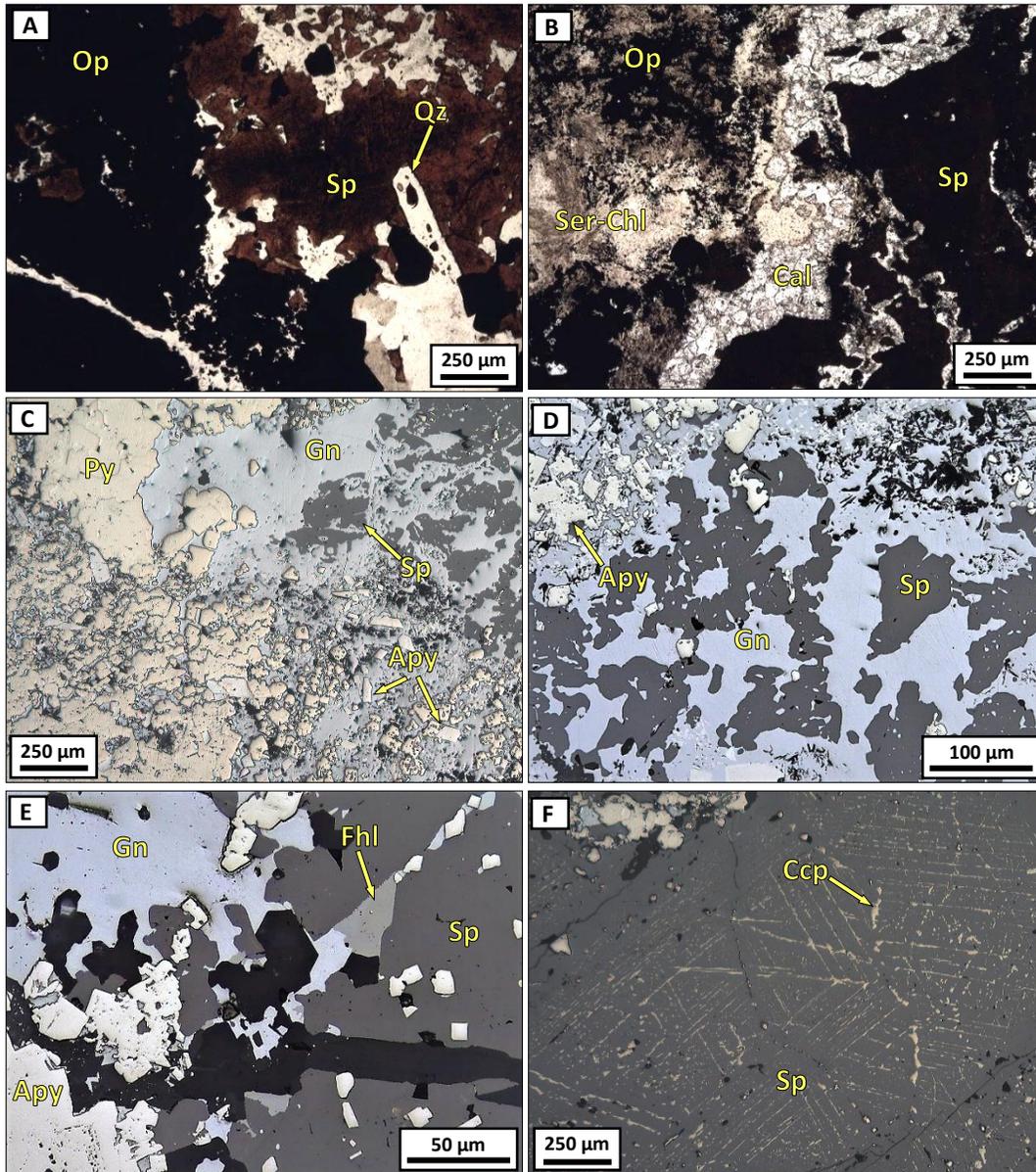


Figura 17. Fotomicrografías de la mineralización metálica relacionada con los mármoles. A. Esfalerita (Sp) marrón rojiza con inclusiones tabulares de cuarzo (Qz). B. Agregados masivos de sericita (Ser) y clorita (Chl), en asociación con opacos (Op) de grano fino. Cortando, aparecen vetillas sinuosas y continuas de calcita (Cal). C y D. Galena (Gn) tardía de textura intersticial entre pirita (Py) y arsenopirita (Apy), reemplazando a la esfalerita. E. Cobres grises (Fhl) en asociación con pirita y galena, e incluidas en esfalerita. F. Exsoluciones lamerales en enrejado de calcopirita (Ccp) en esfalerita.

5.2.3 Exoskarns

Rocas de textura granoblástica de grano grueso (ca. 3 mm) con bandeamiento mineralógico y textural muy común, conformadas por una asociación de fases calcisilicatadas de alta temperatura con retrogradación moderada a pervasiva (Figura 18, 19) y vetilleo de calcita tardío.

Los minerales traslúcidos anhidros más comunes en los exoskarns son granate, wollastonita y vesuvianita (*Figura 18A-D*), todos ellos de alta temperatura y representativos de la fase prógrada del sistema. El granate aparece en porfiriblastos idiomórficos con pseudoanisotropía, extinción en reloj de arena y sectorizada, y zonación marcada por variaciones de color (*Figura 18A-B*). La wollastonita y vesuvianita se disponen en agregados fibrosos y tabulares radiales (*Figura 18C-D*), de relieve alto y tonos de interferencia de bajo orden (wollastonita) y ligeramente anómalos (vesuvianita). Estas fases muchas veces se superponen como parches sobre el granate. Cabe destacar que la mena relacionada con estos minerales es muy escasa y restringida a pequeños cristales diseminados de pirita, esfalerita y arsenopirita.

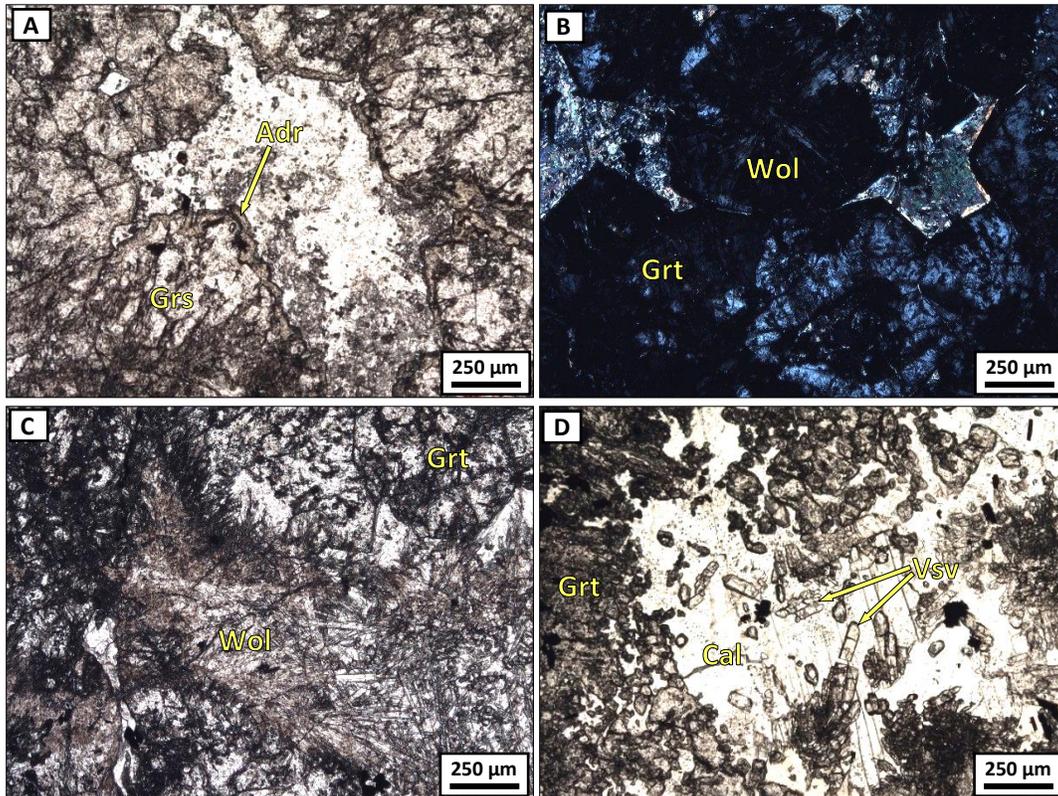


Figura 18. Fotomicrografías de la asociación prógrada de los exoskarns. A y B. Porfiriblastos idiomórficos de granate (Grt) compuestos por núcleos incoloros (grossularia-Grs) y bordes amarillos (andradita-Adr). Véanse además agregados radiales de wollastonita (Wol) asociados. C. Wollastonita en cristales fibrosos radiales asociados con granate. D. Cristales tabulares de vesuvianita (Vsv) asociada con granate y calcita (Cal).

Superpuesto a la mineralogía prógrada, se aprecia una asociación de menor temperatura (retrógrada) constituida por tremolita-actinolita, calcita, cuarzo, epidota (pistacita, zoisita y clinozoisita), clorita, sericita y moscovita, acompañada localmente por cantidades subordinadas de biotita verde, feldespato (adularia), serpentina, granate de grano fino (poiquiloblastos con inclusiones tremolita), prehnita y fluorita (*Figura 19*). Las asociaciones retrógradas más comunes son tremolita/actinolita-calcita-cuarzo-epidota y epidota-calcita-biotita-moscovita-clorita-sericita, ambas indicativas de la facies hornfelsa albita-epidota. La tremolita, actinolita y epidota componen parches, rellenos, bandas y reemplazamientos en asociación con calcita, cuarzo y algunos sulfuros (*Figura 19B-F*). Son comunes los pseudomorfos de clorita-calcita a partir de granate (*Figura 20C*). Las micas, en cambio, se hallan en masas de cristales muy finos en asociación con la mena (*Figura 19D-E, 20A-B*).

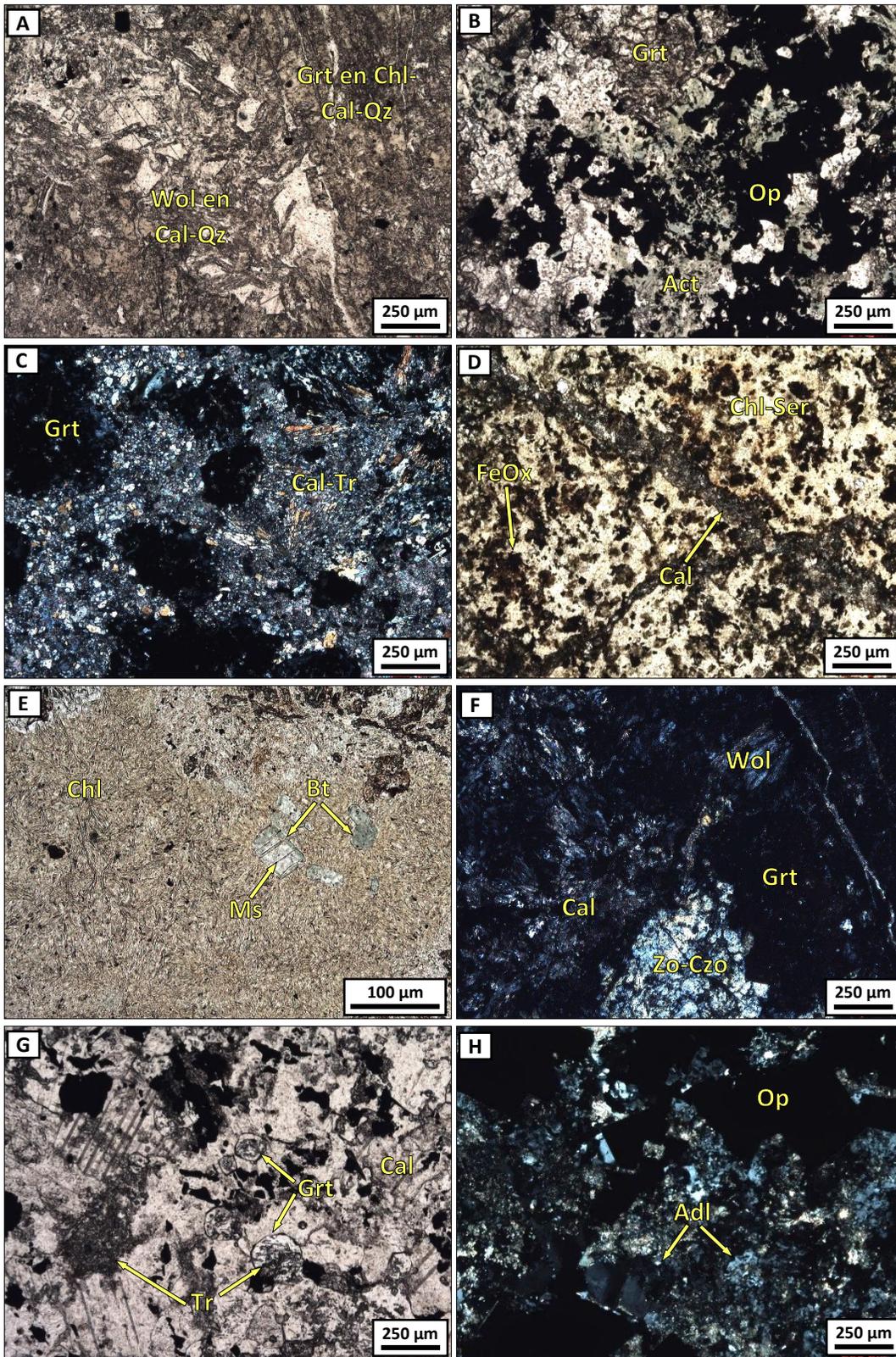


Figura 19. Fotomicrografías de los minerales retrógrados en los exokarns. A. Pseudomorfos de granate (Grt) y wollastonita (Wol), en calcita (Cal), clorita (Chl) y cuarzo (Qz). B. Masas de actinolita (Act) con opacos (Op), desarrolladas entre granates. C. Rellenos intersticiales de calcita-tremolita (Cal-Tr) entre granates. D.

Reemplazamiento pervasivo de sericita-clorita (Ser-Chl), con parches de óxidos de Fe (FeOx) y vetillas de calcita. E. Agregados de biotita verde (Bt) y moscovita (Ms) embebidos en masas de clorita. F. Parches de zoisita-clinozoisita (Zo-Czo) y calcita sobre granate y wollastonita. G. Poiquiloblastos de granate incoloro en asociación con calcita, tremolita y minerales opacos. H. Adularia (Adl) en cristales irregulares y en rellenos.

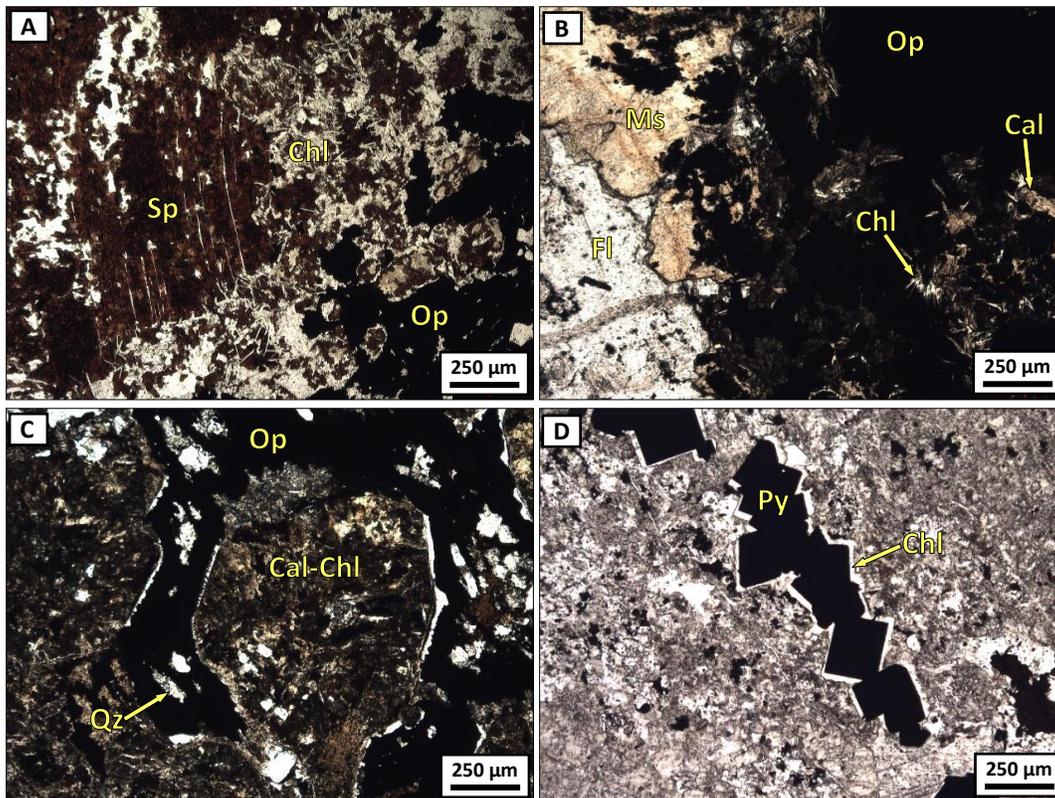


Figura 20. Fotomicrografías de minerales de la asociación entre los minerales de mena y la paragénesis retrógrada de los exoskarns. A. Agregados de clorita (Chl) acicular, intercrecida con esfalerita (Sp) y minerales opacos (Op). B. Mineralización masiva compuesta por opacos, fluorita (Fl), masas de moscovita (Ms), clorita acicular, y calcita (Cal). C. Pseudomorfos de granate en calcita y clorita, con rellenos intersticiales de cuarzo (Qz) y opacos. D. Vetilla de cristales euhedrales de pirita (Py) rodeados por clorita.

Por otro lado, en las zonas de sulfuros masivos (Figura 20) predomina la asociación de fluorita-clorita-cuarzo-calcita-adularia, a modo de interdigitaciones e inclusiones (clorita y cuarzo; Figura 20A), cristales masivos (fluorita y calcita; Figura 20B) y vetillas o rellenos (adularia; Figura 19H). Estos sulfuros masivos se componen de pirita y esfalerita rica en Fe, distinguibles por sus cortes cuadrados euhedrales y por su color marrón rojizo, respectivamente. La disposición de estos minerales puede darse: en agregados masivos con fluorita (Figura 20B), en venas con calcita, en mantos, intersticiales entre los minerales prógrados (Figura 20C), diseminados, en vetillas (Figura 20D) y en parches. Además, exhiben intercrecimientos con clorita acicular (Figura 20A) y múltiples inclusiones de cuarzo.

Particularmente, los mantos de sulfuros masivos (Figura 21) están constituidos por esfalerita y pirita (60-70%). No obstante, pueden mostrar concentraciones variables de arsenopirita (ca. 15%), calcopirita (3%), galena (<1%), pirrotina (<1%), marcasita (<1%), sulfosales de Pb (<1%; Figura 21C), magnetita (<1%; Figura 21D) y proustita-pirargirita (<1%; Figura 21E). Los cristales de pirita y esfalerita son masivos y anhedrales, y pueden mostrar textura simplectítica (Figura 21A). Asimismo,

la esfalerita resalta por su abundancia de inclusiones de arsenopirita, galena, pirrotina, sulfosales de Pb y magnetita, así como por sus múltiples exsoluciones de calcopirita que le otorgan una textura enferma (Figura 21E). Por su parte, la arsenopirita compone agregados oquerosos, masivos y esqueletales, que pueden rellenar espacios intercristalinos de la pirita y la esfalerita (Figura 21B). De manera tardía se desarrolla marcasita en forma de agregados de cristales muy finos y vetillas (<100 µm) discontinuas (Figura 21F), que reemplazan parcialmente a la pirita.

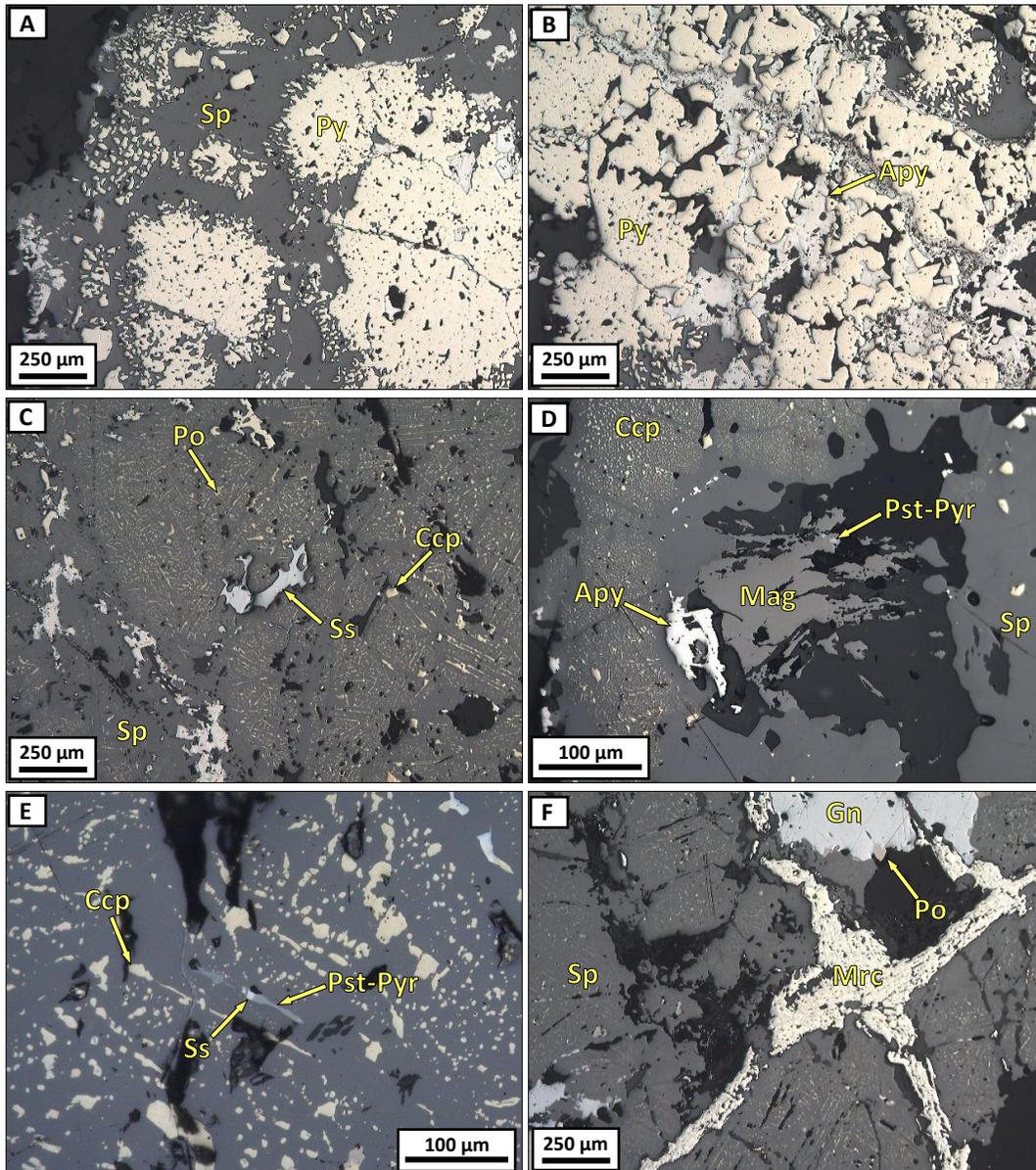


Figura 21. Fotomicrografías de los minerales de mena en los exoskarns. A. Textura simplectítica entre pirita (Py) y esfalerita (Sp). B. Arsenopirita (Apy) con textura intersticial, desarrollada entre los cristales de pirita. C. Esfalerita masiva con inclusiones de arsenopirita y sulfosal de Pb (Ss), y abundantes exsoluciones lamelares de calcopirita (Ccp) y pirrotina (Po). D. Magnetita (Mag) en asociación estrecha con esfalerita, e inclusión muy fina de proustita-pirargirita (Pst-Pyr). E. Acercamiento a proustita-pirargirita incluida en esfalerita enferma. F. Esfalerita, galena (Gn) y pirrotina, cortadas por vetillas de marcasita (Mrc).

De manera tardía con respecto a las asociaciones anteriormente mencionadas, aparecen venas y vetillas de calcita y cuarzo con textura masiva, mosaico y en empalizada (*Figura 22A-C*), localmente con deformación frágil denotada por la presencia de subgranos y textura en mortero en cuarzo (*Figura 22B*). Estas estructuras tienen geometría rectilínea, sinuosa-irregular, son continuas y su espesor no excede los 6 mm. Asimismo, pueden o no acarrear escasa mineralización metálica, principalmente pirita, y relacionarse con agregados de prehnita (*Figura 22D*), sericita y minerales de arcilla.

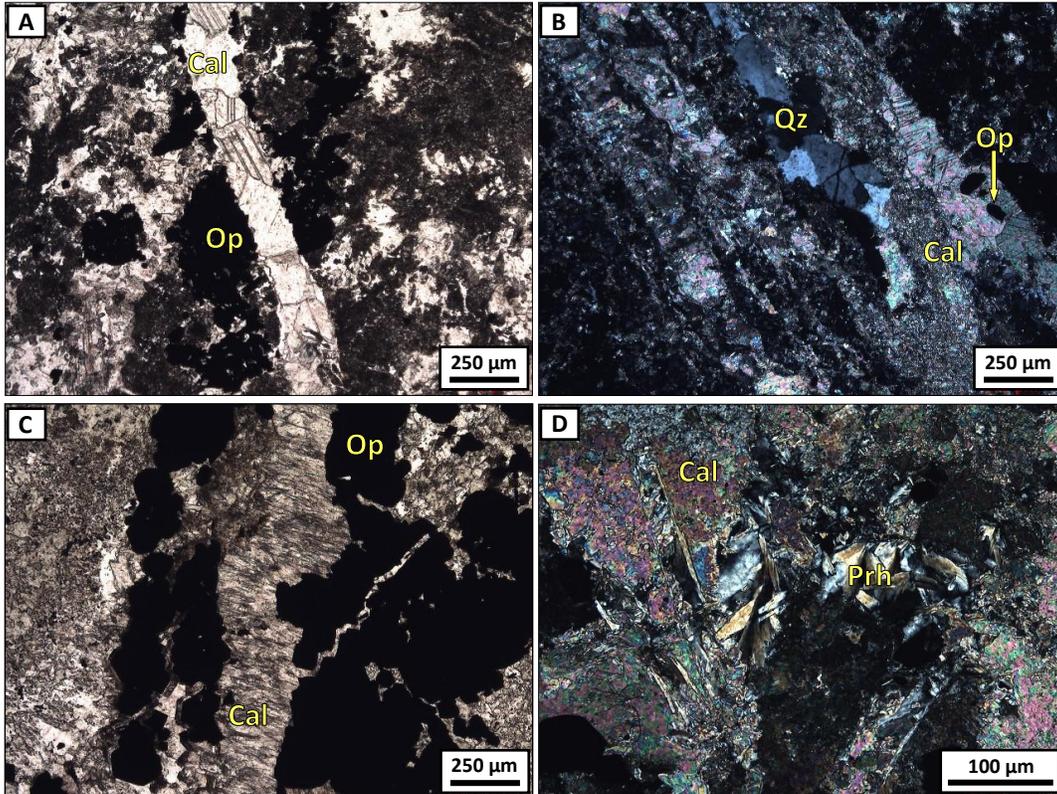


Figura 22. Fotomicrografías de vetillas tardías de calcita-cuarzo. A. Minerales opacos (Op) cortados por estructuras de calcita (Cal). B. Vetillas de calcita, opacos (Op) y cuarzo (Qz), que presentan variedad de texturas entre las que resaltan: en empalizada, mosaico y masiva. C. Vetillas de calcita (Cal) en empalizada. D. Relleno de prehnita (Prh) en vetilla de calcita.

5.2.4 Brechas

Las brechas estudiadas son de dos tipos: hidráulicas y cataclásticas (*Figura 23E-F*). Las brechas hidráulicas son matriz-soportadas, están constituidas por agregados de calcita que embeben fragmentos de sulfuros masivos; la calcita se asocia además con pequeñas cantidades de sericita y cuarzo (*Figura 23A*). Asimismo, pueden mostrar rellenos de sericita, minerales de arcilla, cuarzo, apatito y pirita de grano fino y euedral. La mayor parte de la mineralización es pirita (70%), marcasita (*ca.* 10%), esfalerita zonada (*ca.* 10%) y galena (*Figura 23B-D*), con menores proporciones de calcopirita (<1%). Cabe mencionar, que la marcasita conforma agregados masivos de cristales finos que rodean y cortan a los otros sulfuros (*Figura 23C*), y la galena se dispone en rellenos intercrystalinos (*Figura 23D*).

Las cataclasitas son muy escasas y se restringen a zonas con espesores inferiores a 5 cm. Puntualmente, fue observada una zona de cizalla en una roca ígnea con alteración de adularia-

cuarzo±sericita pervasiva (Figura 23E), en la que aparecen clastos de distintos tamaños embebidos en una matriz molida de cuarzo y sericita. En este sector, se aprecian también vetillas sinuosas y continuas de opacos (Figura 23F), que siguen las zonas más permeables y porosas.

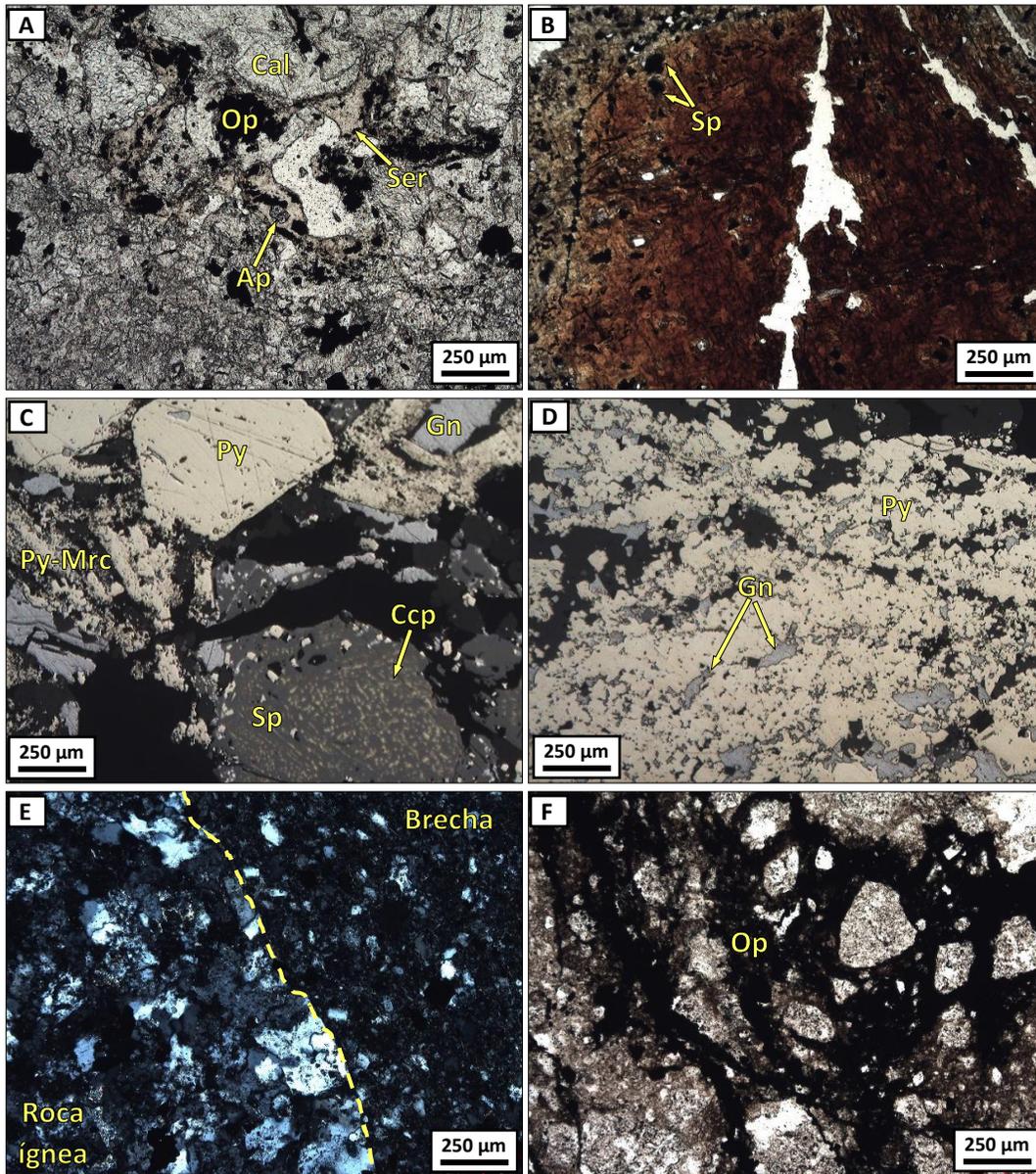


Figura 23. Fotomicrografías de brechas hidráulicas y cataclasitas. A. Matriz de la brecha, compuesta por calcita (Cal), sericita (Ser), apatito (Ap) y opacos (Op) muy finos local fina. B. Clasto de sulfuro masivo compuesto por esfalerita (Sp) zonada con núcleos ricos en Fe, y abundantes inclusiones de minerales opacos. C. Esfalerita enferma con múltiples exsoluciones de calcopirita (Ccp), asociada con pirita (Py) y galena (Gn), y rodeada por pirita-marcasita (Py-Mrc). D. Cristales intersticiales de galena desarrollados entre agregados de pirita. E. Contacto entre la roca y la brecha, donde se aprecian el cambio abrupto en el tamaño de los cristales y la molienda. F. Inyección de minerales opacos en la brecha, siguiendo las zonas más permeables.

5.2.5 Rocas ígneas

Las rocas ígneas estudiadas son de dos tipos: unas de composición tonalítica y textura holocristalina finogranular, y otras andesíticas-dacíticas de textura microporfirítica. Ambas exhiben avanzada

alteración hidrotermal que, en la mayoría de los casos, es masiva y elimina completamente las características primarias. Pese a esto, en algunas muestras se aprecian cristales tabulares de plagioclasa (70% normalizado; *Figura 24A-B*) con maclado de albita o Carlsbad, asociadas con cristales irregulares de cuarzo (30% normalizado) y, en menor proporción, apatito tabular, magnetita y circón. Por su mineralogía, se clasifican como tonalitas. Cabe destacar, que en algunas zonas de sulfuros masivos y en rocas microporfíricas con alteración pervasiva aparecen enclaves de este tipo de roca (*Figura 24C*). Por su parte, las rocas de textura microporfírica muestran alteración generalizada y ocasionalmente conservan pseudomorfos de fenocristales rómbicos (posible cuarzo β ; *Figura 24D*) y tabulares (posible plagioclasa) rodeados por una matriz criptocrystalina, indicando una probable composición variable entre andesítica y dacítica.

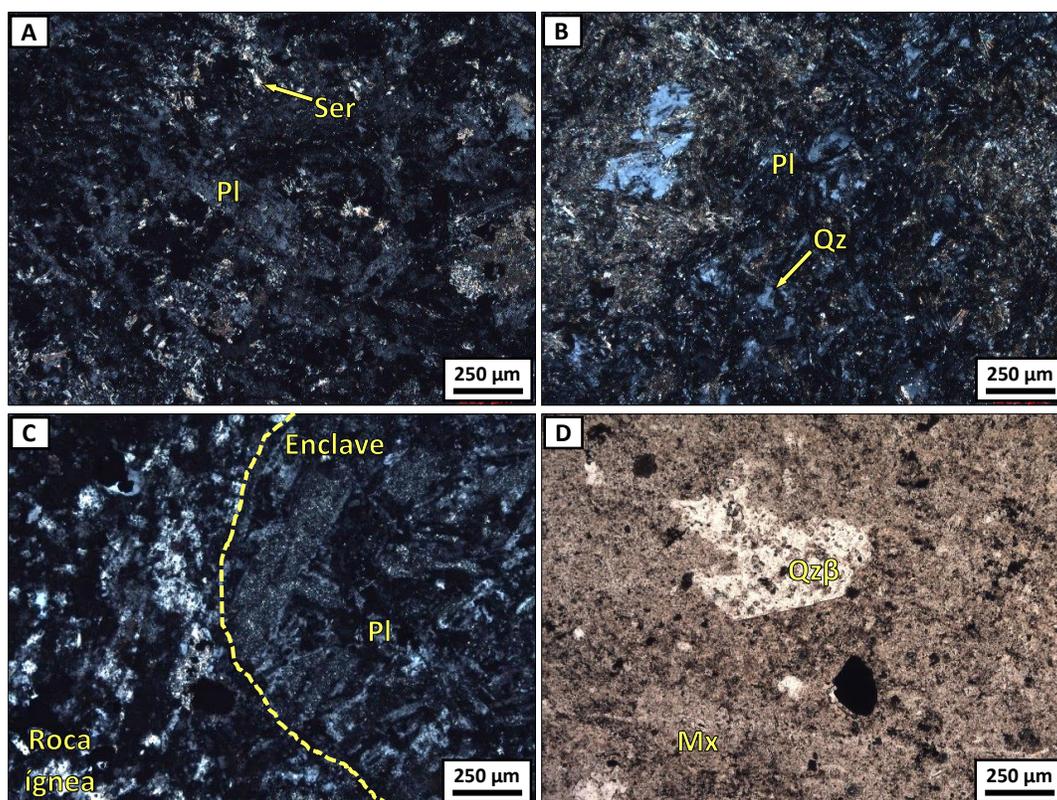


Figura 24. Fotomicrografías de rocas ígneas de composición tonalítica y dacítica-andesítica (?). A y B. Textura holocristalina de la roca, conformada por cristales subhedrales de plagioclasa (Pl) ligeramente sericitizada (Ser), y cuarzo (Qz) intersticial. C. Enclave de roca tonalítica en andesita-dacita (?) con alteración pervasiva. D. Pseudomorfos de fenocristales de cuarzo beta ($Qz\beta$) en cuarzo alfa, rodeados por matriz (Mx) alterada.

Fueron identificadas distintas alteraciones hidrotermales en las rocas ígneas, con distribuciones e intensidades particulares. De este modo, se establecieron los siguientes tipos: alteración potásica (biotita±moscovita; *Figura 25A-B*), silicificación, alteración calcisilicatada (tremolita-calcita-cuarzo y actinolita-escapolita-cuarzo-calcita; *Figura 25A-D*), sericitización (*Figura 26A-D*), alteración propilítica (calcita-clorita-epidota; *Figura 26B*) y alteración de adularia-cuarzo±sericita (cuarzo-sericita-adularia-clorita-fluorita-calcita; *Figura 27A-D*).

La *alteración potásica* es moderada a fuerte y se observó sólo en una muestra. Se compone de biotita rojiza en agregados (*Figura 25A*), vetillas discontinuas diseminada y parches en asociación puntual con moscovita, que pueden presentar reemplazamientos tardíos de clorita y superposición

de alteración calcisilicatada. Se observan también dos alteraciones calcisilicatadas que se superponen a la potásica y se constituyen de tremolita-calcita-cuarzo-opacos (*Figura 25A y C*) y actinolita-escapolita-cuarzo-calcita-opacos (*Figura 25B y D*). La primera asociación se dispone en parches compuestos por cristales anhedrales, fibrosos en el caso de la tremolita, que cortan a la alteración potásica. La segunda, por su parte, aparece en parches y vetillas donde la actinolita muestra un color verde intenso, la escapolita es incolora y tiene exfoliación en una dirección, y los opacos son esqueléticos. Ambas asociaciones son de intensidad moderada, siendo la de tremolita-calcita-cuarzo-opacos la primera en formarse.

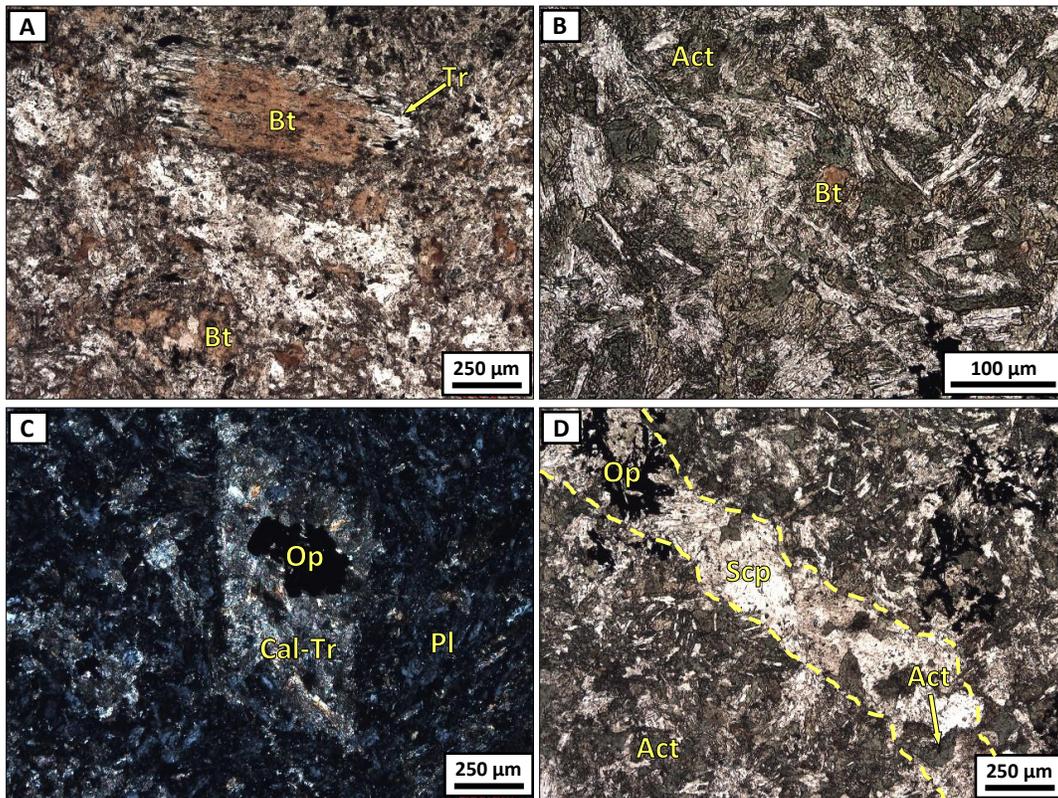


Figura 25. Fotomicrografías de alteraciones potásica y calcisilicatada en rocas ígneas. A. Alteración potásica de biotita (Bt), algunos de los cristales rodeados por tremolita (Tr). B. Biotita hidrotermal rodeada por masas de actinolita (Act). C. Pseudomorfos rómbicos reemplazados en calcita (Cal), tremolita y opacos (Op). D. Parches de actinolita cortados por vetillas rectilíneas de escapolita (Scp), opacos y actinolita.

La sericitización y la alteración propilitica reemplazan preferencialmente a los cristales de plagioclasa o ferromagnesianos (*Figura 26A*) en parches, en vetillas discontinuas (*Figura 26B*) y en rellenos, y parecen ser posteriores al evento principal de alteración de adularia-cuarzo±sericita. Ocasionalmente, se encuentran zonas de sericitización pervasiva en el contacto entre las rocas ígneas y los cuerpos de sulfuros masivos (*Figura 26D*), y como halos rodeando vetillas de clorita-calcita (*Figura 26C*) asociadas frecuentemente con finos cristales cúbicos de pirita. La alteración propilitica se caracteriza por su asociación de epidota-calcita-clorita (*Figura 26B*) en cristales anhedrales finos, donde la clorita resalta por sus tonos de interferencia anómalos.

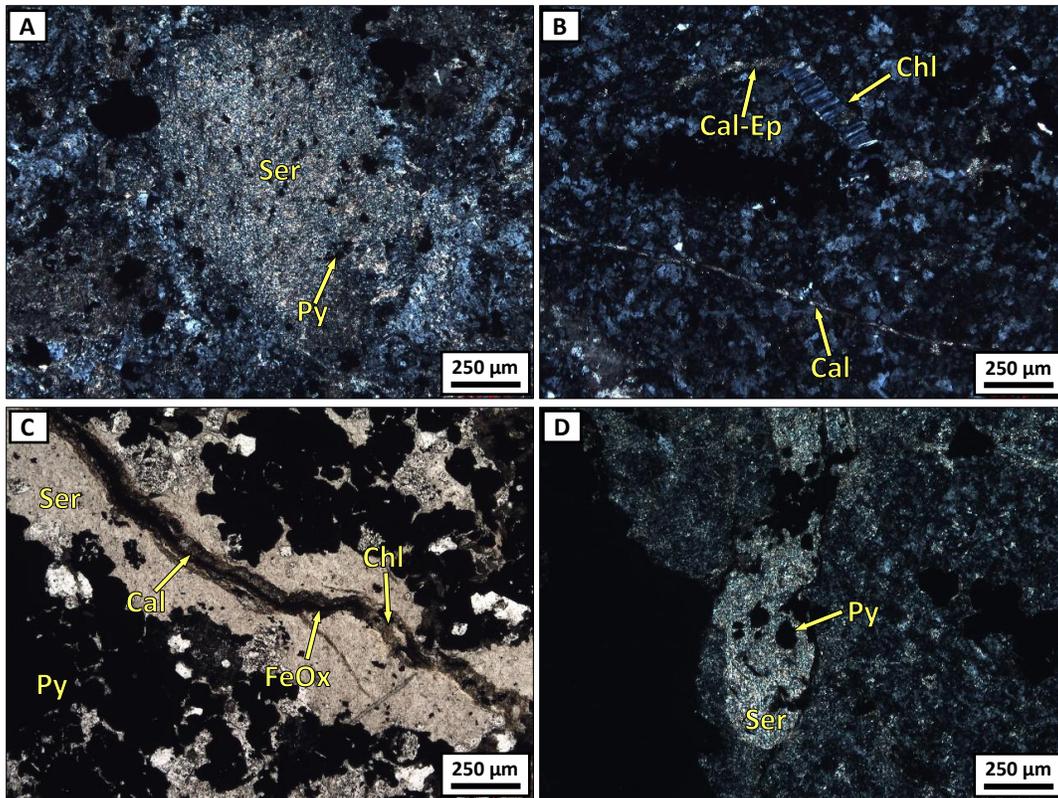


Figura 26. Fotomicrografías de alteraciones sericítica y propilítica en las rocas ígneas. A. Pseudomorfos tabulares completamente reemplazados en sericita (Ser) y pirita (Py) muy fina. B. Vetillas discontinuas de calcita (Cal)-clorita (Chl)-epidota (Ep) y continuas muy delgadas de calcita. C. Vetillas tardías de calcita y clorita manchadas por óxidos de Fe (FeOx) y con halos de sericita (Ser). D. Zona de contacto entre roca ígnea y sulfuro masivo, con desarrollo de sericita pervasiva y en parches, localmente asociada con pirita (Py).

La alteración de *adularia-cuarzo±sericita* es probablemente la más común entre las rocas ígneas y su distribución es normalmente pervasiva de intensidad muy fuerte (Figura 27A), borrando parcial y completamente las características texturales y composicionales primarias de los protolitos. La asociación más usual es *adularia-cuarzo-sericita-calcita-opacos* (Figura 27B-F), con cantidades variables de fluorita, clorita y turmalina. Por lo general, la adularia forma agregados microcristalinos con cuarzo y, en sectores, cortes pseudoromboédricos. La calcita, sericita, turmalina y clorita se disponen en parches esporádicos. Asimismo, estos minerales pueden componer rellenos circulares, reemplazamientos pseudomórficos, agregados y vetillas rectilíneas de espesores inferiores a 200 µm. Las vetillas exhiben composiciones variables: cuarzo (Figura 27G), calcita, calcita-fluorita-opacos (Figura 27H), sericita-calcita-cuarzo, opacos, entre otras.

Recurrentemente, la alteración de *adularia-cuarzo±sericita* está acompañada por la mineralización de sulfuros, que puede o no desarrollarse de manera masiva. En los casos en que la mena no es masiva, los minerales metálicos forman agregados redondeados o irregulares, donde predominan esfalerita (45%), arsenopirita (40%) y pirita (5%) con abundantes inclusiones de calcopirita, pirrotina y galena, e intercrecimientos con adularia pseudoromboédrica. En estos agregados, se identifica una zonación con núcleos ricos en arsenopirita-pirita-pirrotina±esfalerita y bordes de esfalerita (Figura 27E-F). Superpuestos a estas fases se desarrollan óxidos de Fe a modo de parches, vetillas aisladas y *stockworks*, los cuales son terrosos y se forman por la oxidación incipiente a moderada de la mena.

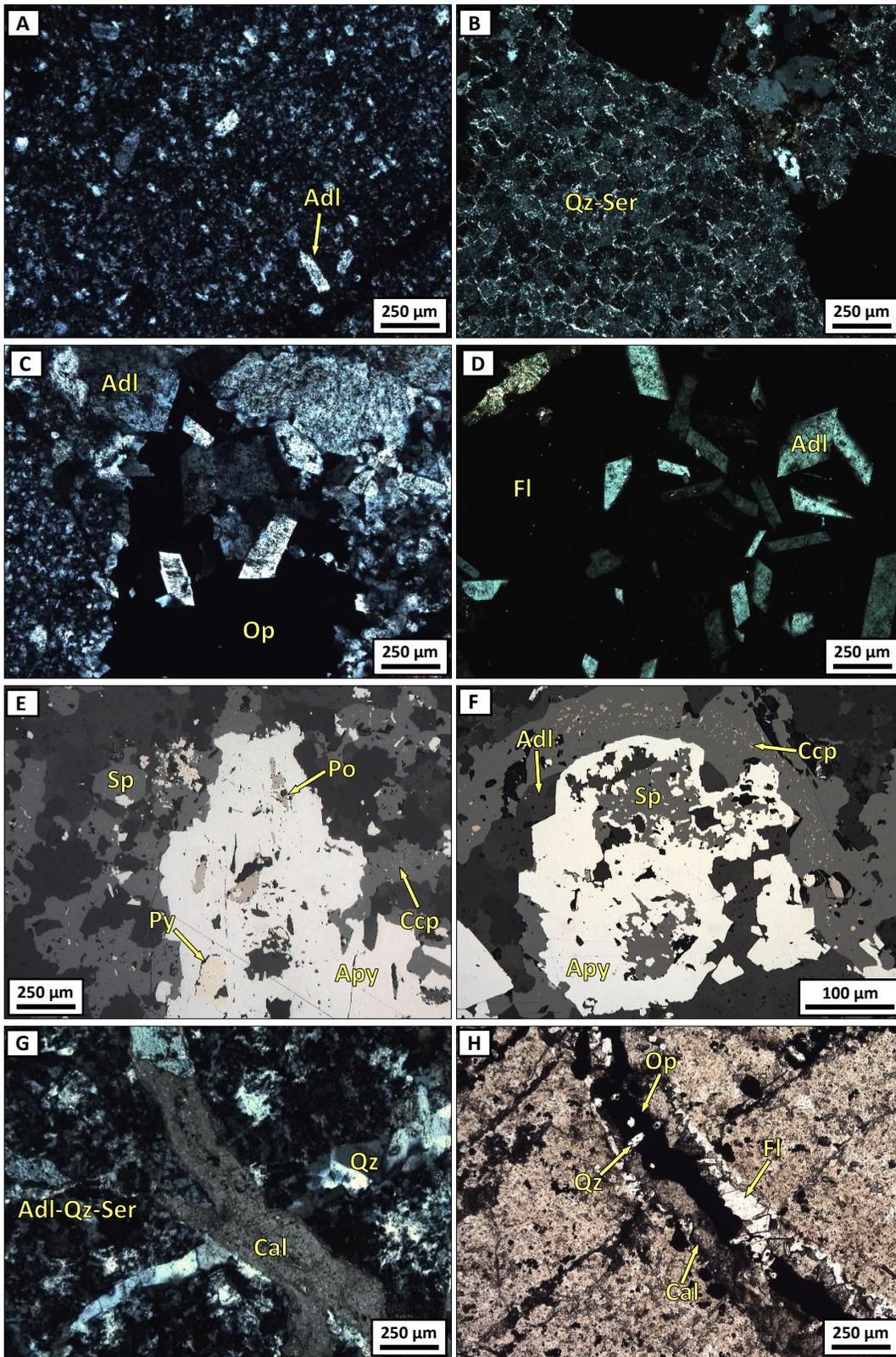


Figura 27. Fotomicrografías de alteración adularia-cuarzo±sericita en rocas ígneas. A. pseudomorfos de fenocristales de plagioclasas remplazados por adularia (Adl). B. Alteración cuarzo-sericítica (Qz-Ser) pervasiva. C. Cristales euhedrales de adularia asociados con minerales opacos (Op). D. Fluorita (Fl) masiva

con inclusiones rómbicas de adularia. E. Arsenopirita (Apy) masiva, esfalerita (Sp) y pirita (Py), con inclusiones de pirrotina (Po) y calcopirita (Ccp). F. Intercrecimientos de arsenopirita, esfalerita y adularia, rodeados por esfalerita. G. Vetillas de cuarzo cortadas por otras de calcita (Cal), ambas encajadas en roca con alteración de adularia-cuarzo±sericita pervasiva. H. Vetillas de cuarzo, calcita, opacos y fluorita.

Las mineralizaciones masivas en este tipo de rocas se disponen en bandas o pervasivamente, borrando parcialmente sus características y dejando relictos o clastos inalterados embebidos. Estos cuerpos se componen de esfalerita enferma (ca. 30%) y pirita (ca. 50%) con contenidos menores (<10%) de arsenopirita, pirrotina, galena, marcasita tetraedrita-tenantita-freibergita; y muestran una asociación muy estrecha con fluorita, cuarzo, clorita y calcita (Figura 28, 29).

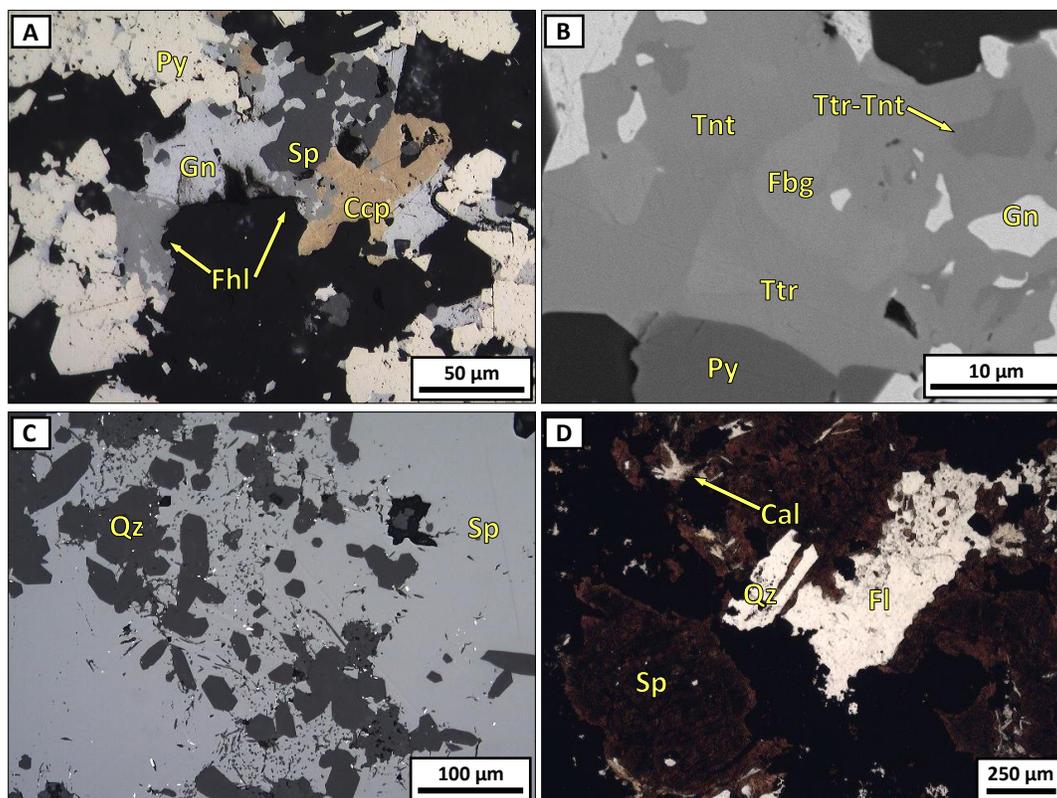


Figura 28. Fotomicrografías de la asociación de sulfuros y sus minerales de ganga. A. Asociación de pirita, calcopirita y galena con reemplazamiento parcial de cobres grises (Fhl). B. Imagen BSE de intercrecimientos entre sulfosales de Cu-Ag-Fe-Zn, de la serie tetraedrita (Ttr)-tenantita (Tnt)-freibergita (Fbg). C. Inclusiones de cuarzo (Qz) en esfalerita. D. Esfalerita marrón con fluorita (Fl), cuarzo y calcita (Cal) acicular.

En los cuerpos de sulfuros masivos fueron identificadas un gran número de texturas desarrolladas entre distintas generaciones de pirita, esfalerita, arsenopirita, pirrotina, galena, cobres grises y sulfosales de Pb. Entre las texturas más representativas están: 1) múltiples intercrecimientos lamelares e irregulares entre arsenopirita-esfalerita-galena (Figura 29C), esfalerita-arsenopirita-pirita (Figura 29B) y arsenopirita-pirita-galena; 2) desarrollo intersticial de calcopirita y galena (Figura 29D); 3) arreglos botrioidales entre galena y pirita (Figura 29A); 4) reemplazamientos parciales de: a) arsenopirita por marcasita-pirita, por galena y por pirrotina (Figura 29F), b) de pirita y pirrotina por marcasita-pirita con textura ojo de pájaro (Figura 29E), y c) de galena, calcopirita y esfalerita por cobres grises (Figura 28A); 5) brechamiento local en pirita masiva (Figura 29H); y 6) vetilleo tardío con respecto al evento principal, de calcopirita-pirita y arsenopirita (Figura 29G).

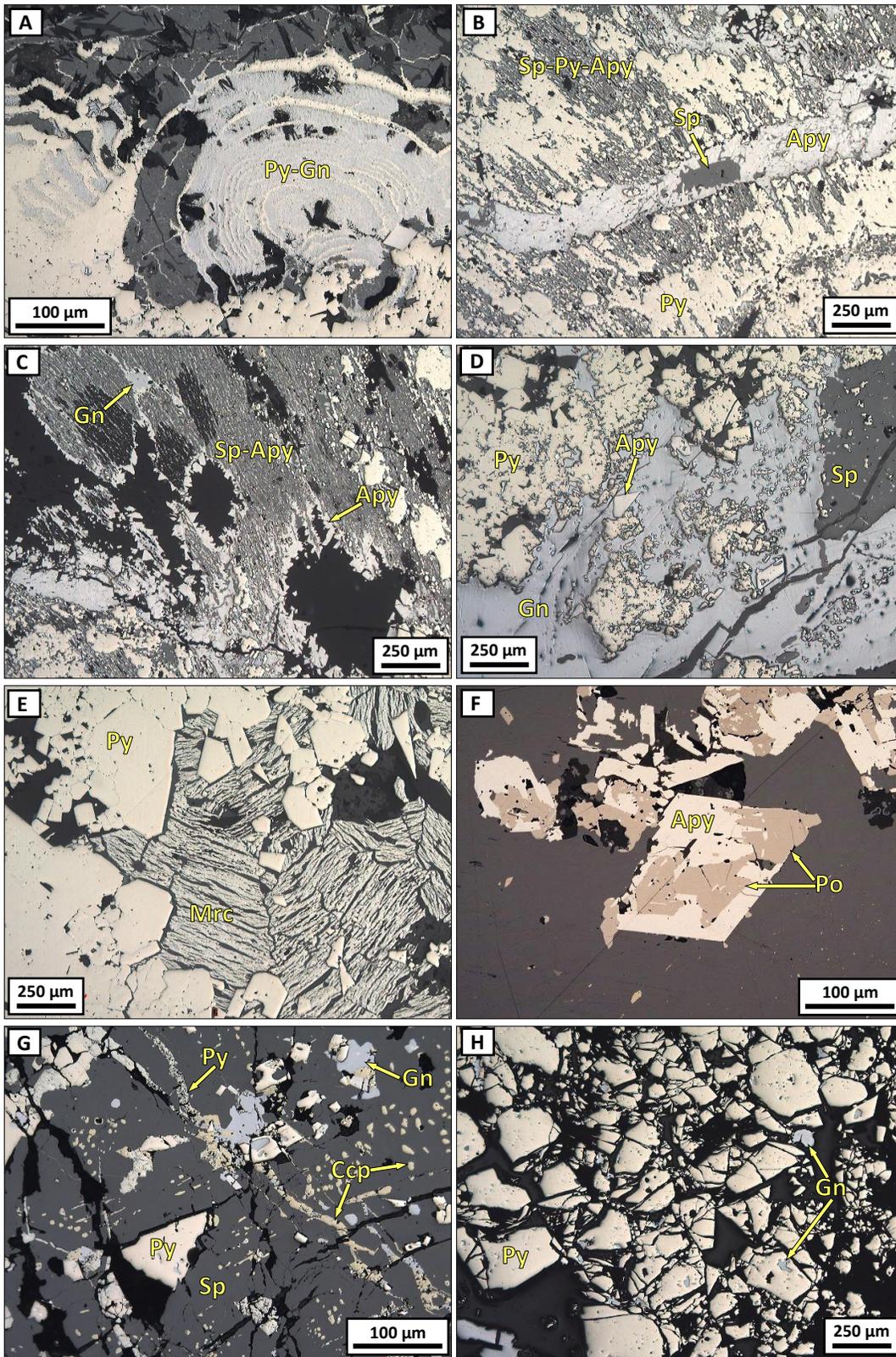


Figura 29. Fotomicrografías de texturas en los sulfuros masivos desarrollados en las rocas ígneas. A. Agregados botrioidales de pirita (Py) y galena (Gn). B. Vetilleo de arsenopirita (Apy) con esfalerita (Sp), atravesando intercrecimientos de esfalerita, pirita y arsenopirita. C. Intercrecimientos de arsenopirita, galena

y esfalerita. D. Galena intersticial entre cristales de pirita. E. Agregados de marcasita (Mrc) de alteración a partir de minerales preexistentes. F. Reemplazamiento parcial de arsenopirita por pirrotina (Po). G. Cristales masivos de esfalerita (Sp) cortados por vetillas de pirita fina y calcopirita, con textura enferma denotada por abundantes inclusiones de galena y calcopirita. H. Pirita con textura brechada e inclusiones de galena.

5.2.6 Sulfuros masivos

En este apartado se describen los sulfuros masivos cuya filiación con el exoskarn, los mármoles y/o las rocas ígneas no es clara por el grado de reemplazamiento generalizado que desarrollan. En términos generales, la mineralogía de estos cuerpos es más o menos homogénea, constituyéndose principalmente de esfalerita y pirita masivas (cerca del 70% de la mineralización; *Figura 30A-C, 31*), aunque en algunas muestras son abundantes la pirrotina (50-60%), galena (15-20%) y arsenopirita (ca. 10%) semi-masivas y en agregados. Se aprecian cantidades menores (<2%) de calcopirita y sulfosales de Pb-Bi-Se, normalmente en inclusiones redondeadas o anhedrales dentro de esfalerita. Los cobres grises y la marcasita ojo de pájaro son fases tardías que reemplazan calcopirita-galena y pirrotina-pirita, respectivamente.

Por su parte, la ganga que acompaña a esta mineralización masiva es: cuarzo y calcita, con fluorita, clorita, adularia, sericita y turmalina en algunos casos. De ellos, el cuarzo compone numerosas inclusiones hexagonales y tabulares en los sulfuros (*Figura 28C-D*), la clorita intercrecimientos con esfalerita y pirita (*Figura 30C*), la turmalina agregados radiales (*Figura 30D*), la sericita masas anhedrales y la fluorita (*Figura 28D*) y calcita cristales masivos.

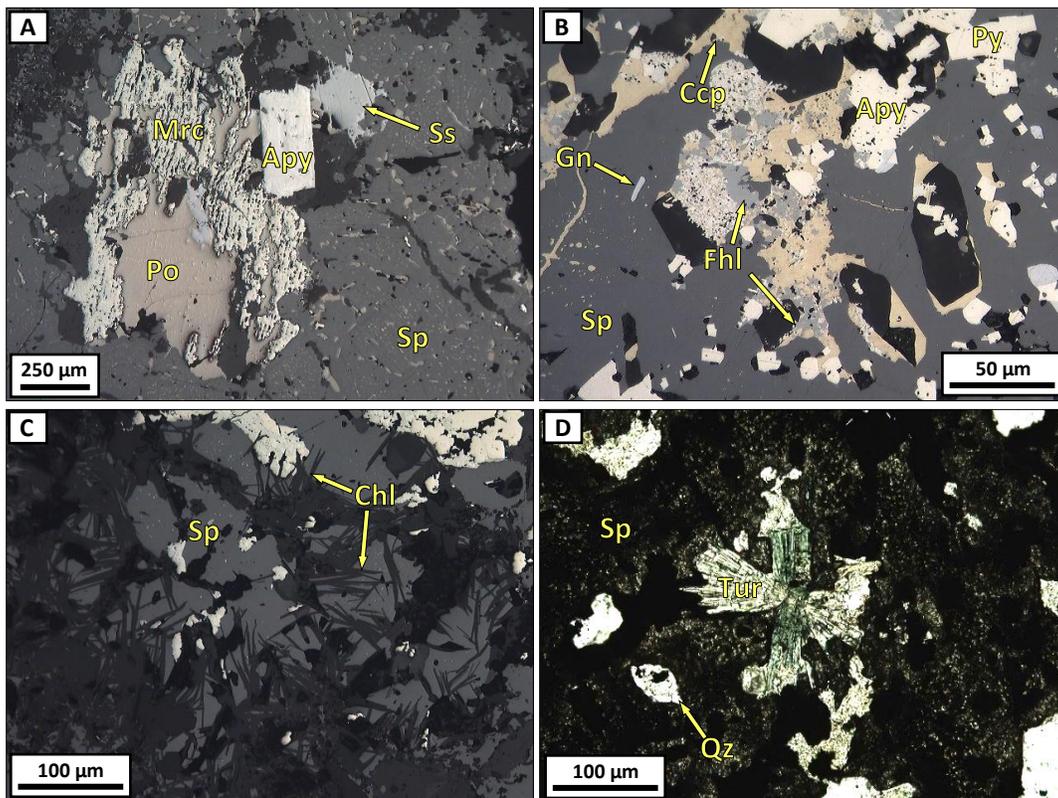


Figura 30. Fotomicrografías de la asociación principal en los cuerpos de sulfuros masivos. A. Sulfosal de Pb (Ss) con esfalerita (Sp), arsenopirita (Apy) y pirrotina, esta última reemplazada por marcasita (Mrc). B. Esfalerita, calcopirita (Ccp), arsenopirita (Apy), galena (Gn), cobres grises (Fhl) y pirita. C. Esfalerita interpenetrada con clorita (Chl). D. Cuarzo (Qz) y agregados radiales de turmalina (Tur) con esfalerita.

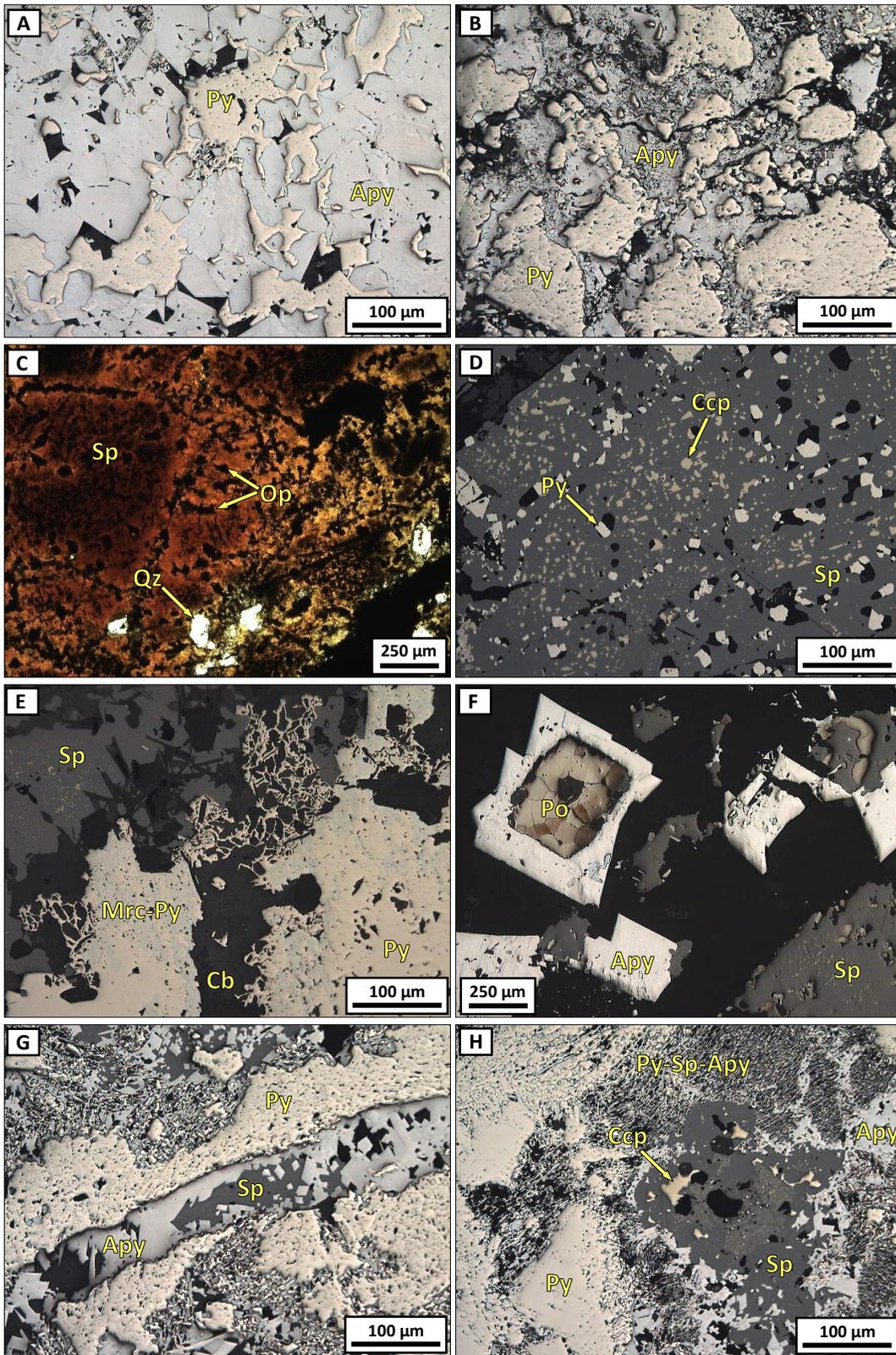


Figura 31. Fotomicrografías de texturas en sulfuros masivos. A. Pirita (Py) intersticial entre arsenopirita (Apy). B. Arsenopirita rodeando cristales de pirita. C. Cristal masivo de esfalerita (Sp) con zonación composicional e inclusiones de opacos (Op) y cuarzo (Qz). D. Esfalerita enferma con múltiples inclusiones de

pirita y calcopirita. E. Cristales de pirita reemplazados parcialmente por masas de marcasita-pirita (Mrc), y cortada por vetilla de carbonato (Cb) con pirita dendrítica. F. Arsenopirita con núcleos de pirrotina (Po) en asociación con esfalerita. G. Vetilla de arsenopirita y esfalerita cortando agregados de pirita. H. Intercrecimientos complejos entre esfalerita, arsenopirita, pirita y calcopirita.

Los sulfuros masivos exhiben una gran variedad texturas, siendo las principales: 1) rellenos intersticiales de arsenopirita entre cristales de pirita y viceversa (*Figura 31A-B*), y de marcasita en pirita, esfalerita y pirrotina; 2) esfalerita zonada y con desarrollo de textura enferma por abundantes inclusiones/exsoluciones de calcopirita, pirrotina y pirita (*Figura 31C-D*); 3) reemplazamiento de pirita y pirrotina por marcasita con textura ojo de pájaro (*Figura 31E*), de calcopirita y galena por cobres grises (*Figura 30B*), y de arsenopirita por agregados de pirrotina (*Figura 31F*); 4) vetilleo de arsenopirita con esfalerita (*Figura 31G*) y rellenos de galena en arsenopirita; y 5) intercrecimientos entre esfalerita-arsenopirita-pirita-calcopirita y, esfalerita-pirita-arsenopirita (*Figura 31H*), y exsoluciones de sulfosales de Pb-Bi-Se en pirrotina.

5.2.7 Venas de calcita

Son estructuras vetiformes encajadas en los mármoles, con espesor de 3 cm, que representan un evento tardío que acarrea escasa mineralización. Estas venas se componen principalmente de calcita con cantidades subordinadas y variables de cuarzo, barita, fluorita, opacos, minerales de arcillas y calcedonia (*Figura 32*).

La calcita aparece normalmente en cristales masivos y en empalizada de tamaño milimétrico (2 mm), que pueden desarrollar zonaciones definidas por la presencia de minerales opacos muy finos siguiendo los bordes de crecimiento (*Figura 32A*), o por asociaciones de inclusiones fluidas (*Figura 32B*). Por su parte, los minerales como calcedonia y barita se encuentran a manera de rellenos y agregados diseminados (*Figura 32D-E*), y localmente se aprecian fragmentos líticos de rocas ígneas con alteración de adularia-cuarzo±sericita, embebidos en las masas de calcita (*Figura 32F*).

Los minerales de mena son escasos en las venas de calcita y fueron observados solo en una de las muestras. Allí, la mineralización está constituida por abundante pirita y arsenopirita con menores proporciones de calcopirita, esfalerita y cobres grises (*Figura 32G-H*). La pirita (1), arsenopirita (2), esfalerita (3) y calcopirita (4) conforman un evento temprano, encontrándose: 1) a manera de agregados masivos de cristales gruesos, 2) en agregados de cristales finos y euhedrales, 3) en inclusiones con textura enferma, y 4) diseminados o en inclusiones en esfalerita. Posteriormente, se forman agregados de pirita de grano mucho más fino, calcopirita y cobres grises (hakitita-tenantita) de manera intersticial y en fracturas.

5.3 Secuencia paragenética

El cuerpo mineralizado de Santa María presenta una mineralogía muy abundante y variada (*Figura 33*), relacionada con diferentes episodios y procesos asociados y, a su vez, con las litologías que lo componen. Teniendo en cuenta esto, se pueden definir al menos seis eventos de formación mineral: 1) sedimentación y diagénesis responsable de la generación de rocas carbonatadas de la Formación Cuesta del Cura; 2) intrusión de cuerpos ígneos de composición tonalítica y dacítica-andesítica, 3) metamorfismo prógrado y metasomatismo en las calizas, y alteración hidrotermal de alta temperatura en las rocas ígneas; 4) retrogradación de las fases prógradas en las rocas calcisilicatadas y alteraciones hidrotermales de menor temperatura en los intrusivos (subdividida en cinco etapas); 5) vetilleo de calcita tardío; 6) alteración supérgena de todas las litologías.

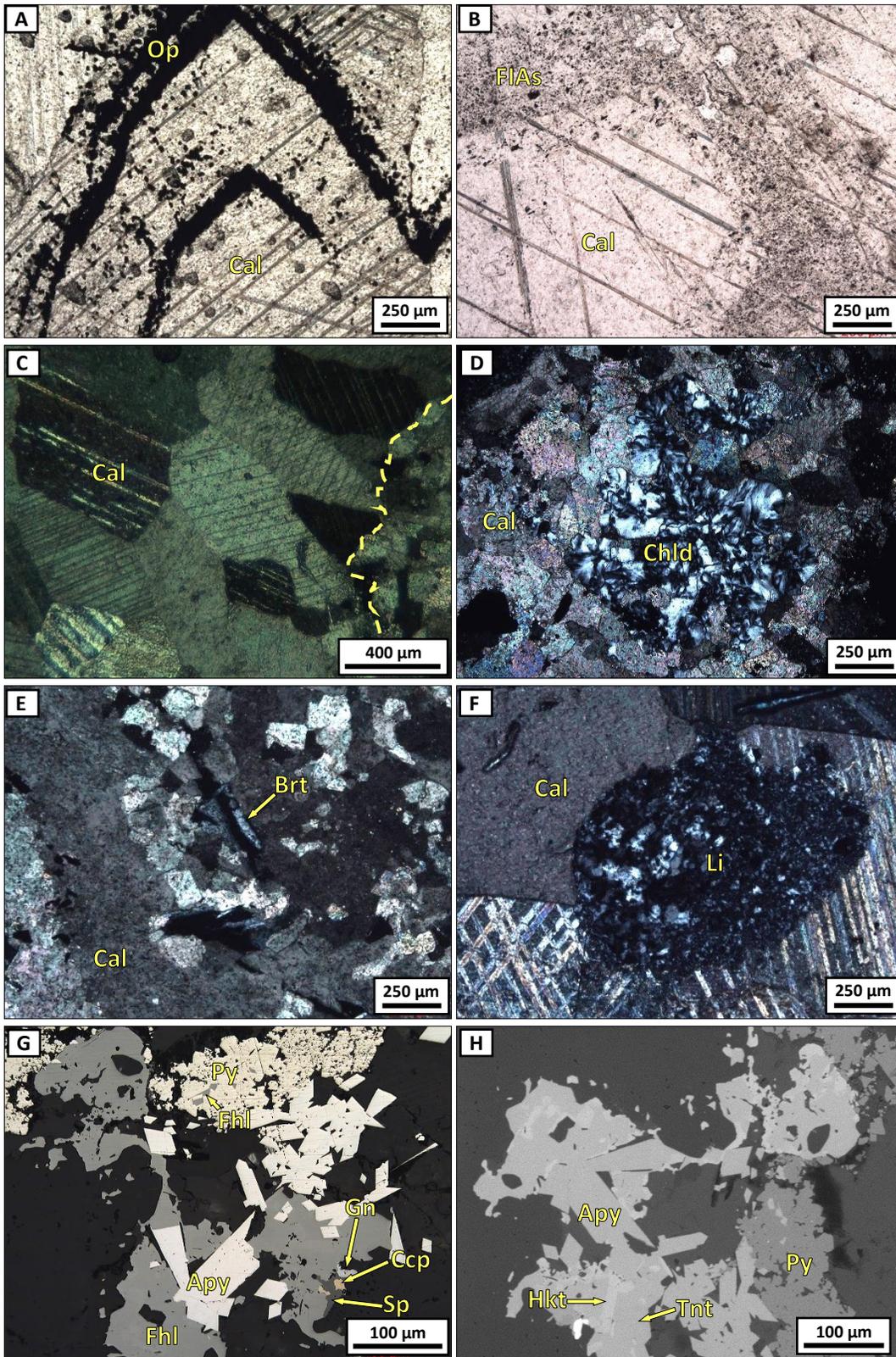


Figura 32. Fotomicrografías de la mineralogía que compone las venas tardías de calcita. A y B. Cristales masivos de calcita (Cal) de la vena, con zonación denotada por los intercrecimientos con minerales opacos (Op) y por inclusiones fluidas (FIAs). C. Textura en empalizada en cristales de calcita. D. Rellenos locales de

calcedonia (Chld). E. Agregados tabulares de barita (Brt). F. Líticos (Li) de rocas ígneas con alteración de adularia-cuarzo-sericita. G. Cobres grises (Fhl), esfalerita (Sp), arsenopirita (Apy), calcopirita, pirita y galena (Gn). H. Imagen BSE de intercrecimientos entre hakita (Hkt) y tenantita (Tnt).

Mineral	Sedimentación y diagénesis	Intrusiones	Fase prógrada- Alt. hidr. de alta T	Fase retrógrada- Alteración hidrotermal de intermedia a baja T					Venilleo tardío	Alteración supérgena	
				Et. 1	Et. 2	Etapa 3	Etapa 4				Et. 5
							P1	P2			
Calcita											
Cuarzo α											
Cuarzo β											
Turmalina											
Miner. de arcilla											
Circón											
Plagioclasa											
Apatito											
Titanita											
Magnetita											
Pirita											
Biotita											
Moscovita											
Grossularia											
Andradita											
Wollastonita											
Vesuvianita											
Clinopiroxeno											
Sericita											
Clorita											
Tremolita											
Actinolita											
Escapolita											
Epidota											
Serpentina											
Sílice-cuarzo											
Fluorita											
Adularia											
Esfalerita											
Pirrotina											
Galena											
Calcopirita											
Arsenopirita											
Pirargirita											
Magnetita											
Se-Lilianita											
Se-Heyrovskita											
Se-Galena											
Ag-Tetraedrita											
Fe-Tenantita											
Zn-Hakita											
Marcasita											
Calcedonia											
Barita											
Prehnita											
Óxidos de hierro											

Figura 33. Secuencia paragenética general del cuerpo mineralizado de Santa María.

Los eventos primarios (sedimentación, diagénesis e intrusión de cuerpos magmáticos; Figura 33) están representados por wackestones de peloides (Figura 15), tonalitas (Figura 24A) y rocas de composición dacítica-andesítica (Figura 24D), los cuales constituyen el punto de partida de los procesos subsiguientes que dieron paso a las mineralizaciones en esta zona. Cabe destacar que la presencia de enclaves de tonalitas en las rocas porfiríticas dacíticas-andesíticas, permite establecer que las segundas son tardías. Durante la intrusión de los cuerpos magmáticos, se generó metamorfismo de contacto y metasomatismo en las calizas por la movilización de fluidos prístinos, produciendo asociaciones calcisilicatadas de alta temperatura (granate-wollastonita-vesuvianita±clinopiroxeno; Figura 18) en el encajonante calcáreo (Figura 33). Junto con ello, es muy posible que se diera también la alteración potásica de biotita marrón en las tonalitas (Figura 25A), dado que ambas paragénesis se forman a alta temperatura y están superpuestas por alteraciones de tremolita-actinolita-cuarzo-calcita (Figura 25A).

Posteriormente, se genera la fase retrógrada que, en su mayoría, está representada por minerales hidratados (tremolita, actinolita, clorita, moscovita y epidota), y está relacionada espacial y temporalmente con la mineralización principal de sulfuros y sulfosales (*Figura 33*). En el cuerpo de Santa María, la fase retrógrada se constituye de distintas etapas en las que prevalece la aparición de calcita y cuarzo. Tales etapas se explican a continuación en orden cronológico:

Etapas 1: Cristalización tardía de granates poiquiloblásticos con tremolita y calcita en los exoskarns (*Figura 19G*).

Etapas 2: Reemplazamientos masivos y pervasivos de los exoskarns, distribuidos preferencialmente en bandas específicas. Estos reemplazamientos se componen de sericita, clorita, calcita, cuarzo y tremolita (*Figura 19C-D*), con cantidades menores de biotita verde, epidota, serpentina y moscovita (*Figura 16C*). En esta etapa sólo se forman pequeños cristales poligonales de piritita diseminados. En las rocas ígneas, este evento está constituido por parches y vetillas de calcita, tremolita, cuarzo y opacos (*Figura 25C*), que cortan o rodean a la biotita secundaria (*Figura 25D*) y se disponen en coronas.

Etapas 3: Parches superpuestos a la asociación anterior, tanto en los exoskarns como en las rocas ígneas, conformados principalmente por actinolita y menores cantidades de calcita, esfalerita, cuarzo, piritita y escapolita (*Figura 25D, 19B*).

Etapas 4: Principal evento de mineralización, observable tanto en los exoskarns como en las rocas ígneas, con texturas masivas, bandas, parches, agregados, reemplazamientos y exsoluciones (*Figura 21, 28*). La mineralogía de mena de esta etapa es la más variada y se compone de: esfalerita, piritita, galena, calcopiritita, arsenopiritita, pirrotina, magnetita, cobres grises y sulfosales de Pb-Bi-Se. Por su parte, la ganga está constituida por adularia pseudoromboédrica, clorita, fluorita, cuarzo, calcita, epidota, tremolita, moscovita y turmalina (*Figura 27A-D, 28D, 30C-D*). Cabe resaltar la existencia de dos pulsos mineralizantes (P1 y P2 en *Figura 33*). El primero (P1) se constituye de piritita, esfalerita, galena, calcopiritita, arsenopiritita, pirrotina, magnetita, cobres grises y sulfosales de Pb-Bi-Se con textura masiva (*Figura 21A-C, 31C*). El segundo (P2) representado por piritita, esfalerita, galena, calcopiritita, pirrotina y cobre grises, siendo la arsenopiritita-galena-cobres grises más abundantes que en el P1, y destaca por mostrar texturas intersticiales, vetilleo y de reemplazamiento (*Figura 29D, 30B, 31G*).

Etapas 5: Alteración propilítica y sericitización (*Figura 26*), la primera se presenta como rellenos en algunas rocas ígneas con alteración de adularia-cuarzo-sericita y posiblemente se relaciona con el reemplazamiento de marcasita sobre los otros sulfuros (pirritita y pirrotina). La sericitización, por su parte, ocurre normalmente como parches sobre las rocas ígneas.

De manera tardía, se aprecian venas de espesor variable cortando a los eventos anteriormente mencionados (*Figura 33*). Éstas se componen en su mayoría de calcita y algo de cuarzo, así como arsenopiritita, piritita, esfalerita, calcopiritita, galena, cobres grises, y escasas cantidades de prehnita, barita y calcedonia (*Figura 32*). Por último, se produce el reemplazamiento supérgeno de algunos sulfuros, generándose óxidos de Fe dispuestos en parches, vetillas y *stockworks*. Al mismo tiempo, los feldspatos hidrotermales se alteran a minerales de arcilla que les otorgan aspecto terroso.

5.4 Química mineral

Los estudios de química mineral se llevaron a cabo en cristales de arsenopiritita, cobres grises, sulfosales de Pb-Bi-Se, granate y magnetita, con el fin de caracterizarlos y establecer la temperatura de cristalización. Los datos obtenidos se presentan en el *Anexo 12.3*.

5.4.1 Granate

En el triángulo de clasificación de los granates [grosularia ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$), andradita ($\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$), pirlaspita ($(\text{Mn}, \text{Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)], los de los exoskarns tienen una composición entre grosularia (60-80%) y andradita (20-40%), con menos del 1% de pirlaspita (Figura 34). Einaudi y Burt (1982) presentan un diagrama con el campo de variación composicional de los granates en distintas clases de depósitos tipo skarn (W, Cu, Sn, Zn, Pb, Fe), de forma que los granates de los exoskarns en el cuerpo de Santa María se disponen en el campo de skarns de Zn-Pb (Figura 34).

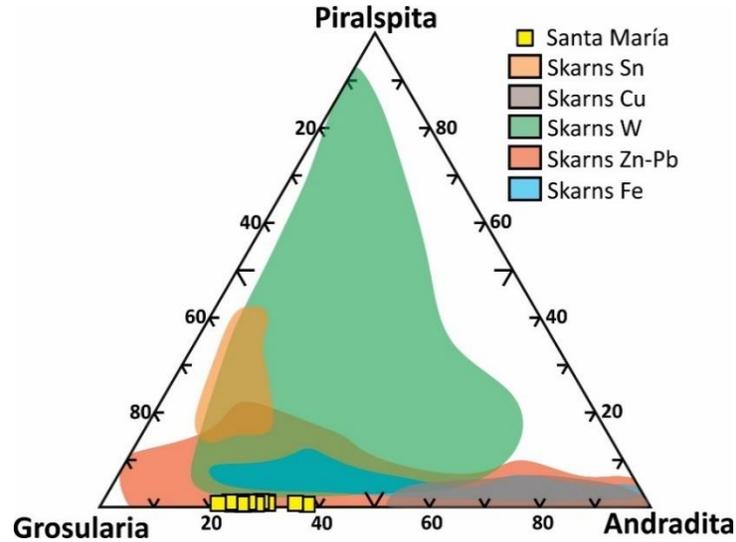


Figura 34. Diagrama composicional de granates con los campos definidos para skarns de cada tipo. Modificado de Einaudi y Burt (1982).

Por otra parte, el granate de los exoskarns está químicamente zonado, de forma que los núcleos tienen una composición promedio de $\text{Ca}_{3,08}\text{Al}_{1,01}\text{Fe}_{0,92}\text{Si}_{3,21}\text{O}_{12}$ y los bordes de $\text{Ca}_{3,18}\text{Al}_{1,39}\text{Fe}_{0,57}\text{Si}_{3,04}\text{O}_{12}$. De tal manera, los núcleos están empobrecidos en FeO (8,5 a 10,5 % en peso) y enriquecidos en Al_2O_3 (12,8 a 14,6 % en peso), respecto a los bordes que muestran un comportamiento inverso (FeO: 9 a 13,5 % en peso y Al_2O_3 : 10,5 a 14,1 % en peso; Figura 35).

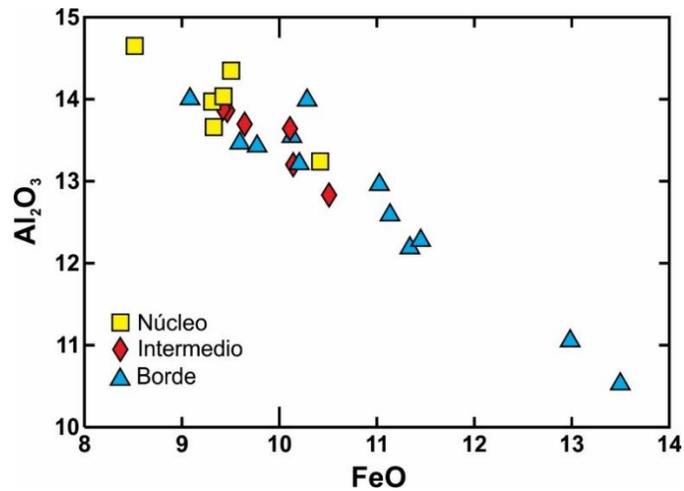


Figura 35. Diagrama de FeO vs Al_2O_3 (% en peso) para los granates en un exoskarn del cuerpo de Santa María.

5.4.2 Arsenopirita

En general, la arsenopirita asociada con los sulfuros masivos presenta variaciones ligeras en sus contenidos de S, As y Fe, en función de su asociación con pirita y/o pirrotina. La arsenopirita asociada con pirita tiene valores de Fe de 32,5 a 35,2 % en peso, As de 42,3 a 48,9 % en peso y S de 16,9 a 21,7 % en peso, que definen una fórmula general $Fe_{0,99}As_{0,97}S_{1,04}$. En cambio, la arsenopirita en paragénesis con pirrotina exhibe cantidades de Fe de 32,7 a 34 % en peso, As de 42,7 a 46 % en peso y S de 19,3 a 20,7 % en peso, con una fórmula promedio $Fe_{0,98}As_{0,98}S_{1,04}$. Por último, los cristales relacionados con pirrotina y pirita en los sulfuros masivos muestran rangos de Fe de 33,1 a 35,7 % en peso, As de 42,5 a 46,8 % en peso y S de 18,7 a 22,2 % en peso, y una fórmula general $Fe_{1,00}As_{0,97}S_{1,03}$. Por su parte, todos los cristales de arsenopirita muestran bajas concentraciones de Bi (<1700 ppm), Ni (<1500 ppm), Sb (<6400 ppm) y Co (<900 ppm).

Como se aprecia en la *Figura 36*, la arsenopirita exhibe una composición variable dentro de los rangos indicados por Kretschmar y Scott (1976) para la arsenopirita natural, con valores de entre 30 y 33,5 % atómico de As y 32,5-34 % atómico de Fe. Además, se observa un enriquecimiento en el % atómico de Fe en la arsenopirita asociada con pirita y pirrotina (ca. 33,7% atómico de Fe) de los sulfuros masivos, en comparación con aquella en paragénesis con pirrotina (ca. 32,8% atómico de Fe) o pirita (ca. 33% atómico de Fe) presente en el mismo tipo de roca.

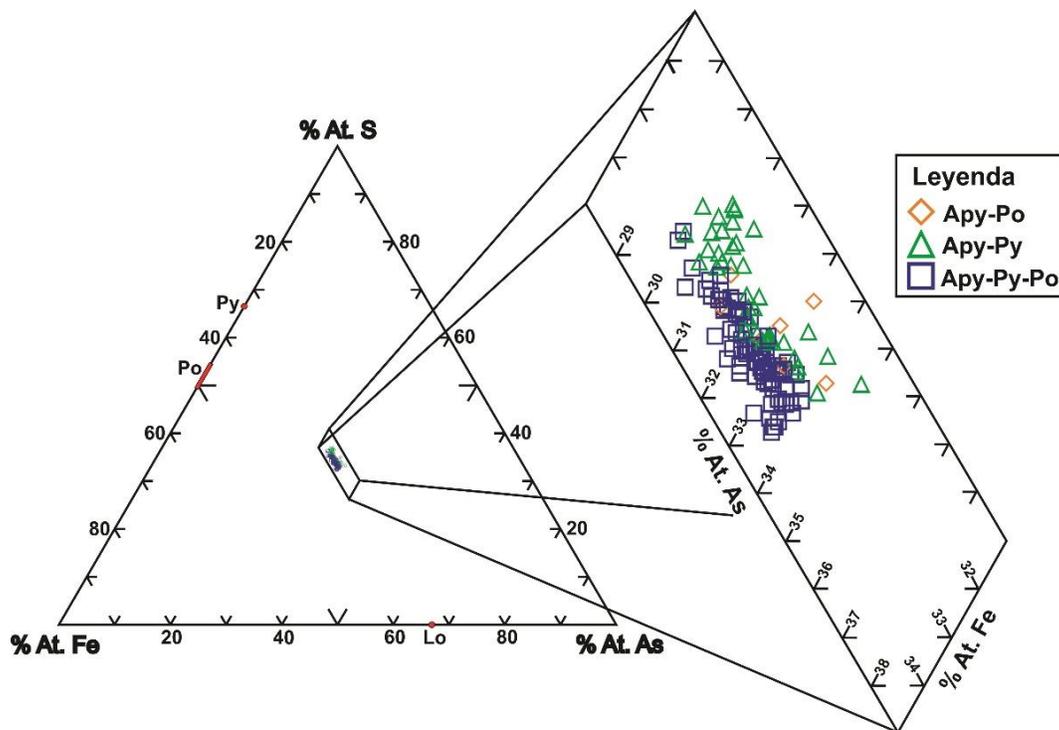


Figura 36. Diagrama triangular Fe-S-As para los cristales de arsenopirita que componen los sulfuros masivos del cuerpo mineralizado de Santa María. El campo poligonal representa la composición típica de la arsenopirita natural. Modificado de Kretschmar y Scott (1976).

Ocasionalmente, algunos cristales de arsenopirita de los exoskarns y sulfuros masivos muestran una zonación irregular y aparentemente rítmica, que es visible tanto petrográficamente (por bandeamientos y por la presencia de inclusiones sólidas alineadas) como composicionalmente (electrones retrodispersados). Con ayuda de transectas borde-núcleo-borde se estableció el carácter de estas estructuras en cristales euhedrales de las asociaciones arsenopirita-pirita y

arsenopirita-pirita-pirrotina. Como se aprecia en la *Figura 37*, la composición en mayores (Fe-As-S) de estos cristales de arsenopirita zonados es muy similar, con variaciones menores (<3 % en peso) y locales en los contenidos de arsénico y azufre; en contraste, los elementos trazas (Bi-Ni-Sb-Co) exhiben patrones irregulares y zigzagueantes a lo largo de los cristales, que podrían estar relacionados con las zonaciones observadas.

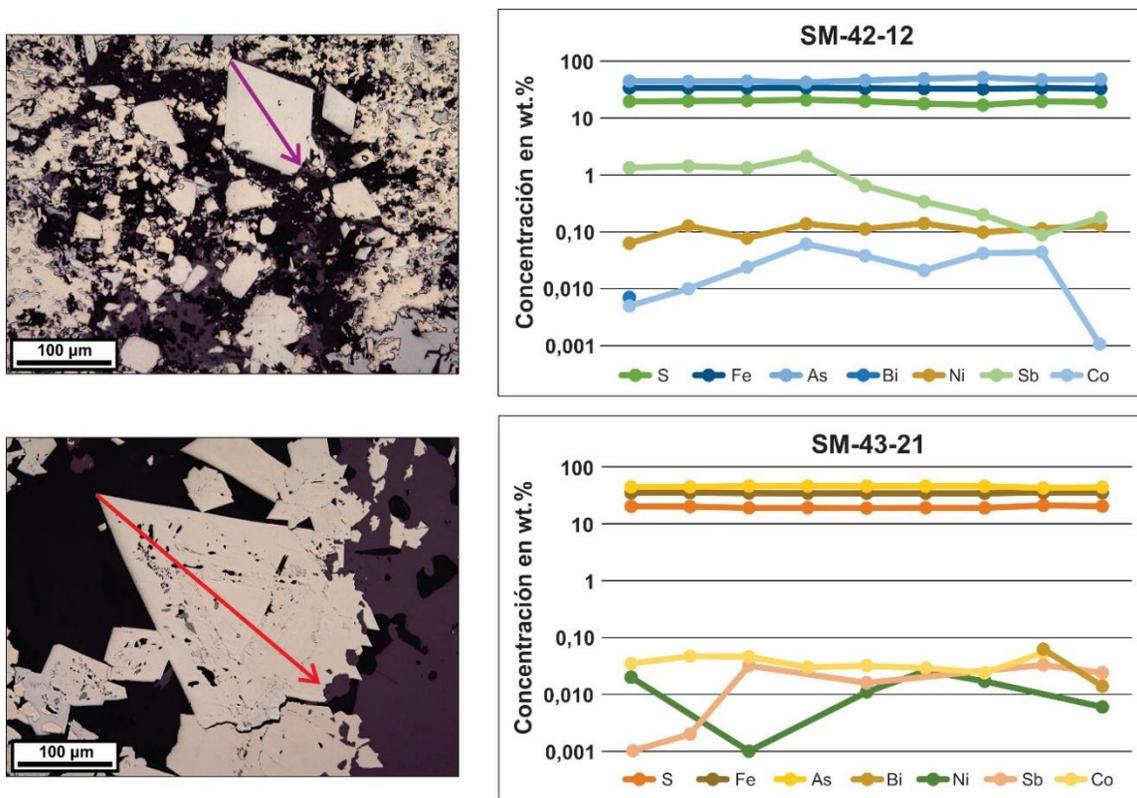


Figura 37. Transectas borde-núcleo-borde de dos cristales de arsenopirita con zonación reconocida petrográficamente y en imágenes de electrones retrodispersados. SM-43-12 (arsenopirita-pirita) y SM-43-21 (arsenopirita-pirita-pirrotina).

Diversos autores (Clark, 1960; Kretschmar y Scott, 1976; Sharp *et al.*, 1985), estudiaron el sistema Fe-As-S en la arsenopirita y sus variaciones con respecto a la temperatura, encontrando que representa un buen geotermómetro con baja susceptibilidad a los cambios de presión, incluso hasta condiciones de facies anfibolita baja. Para la correcta utilización del geotermómetro, se deben seguir ciertas precauciones (Kretschmar y Scott, 1976):

1. Establecer correctamente la asociación entre la arsenopirita y los sulfuros de Fe (pirita y/o pirrotina) para estimar las condiciones de $f(S_2)$.
2. Los elementos traza (Sb, Ni, Co, Bi) deben sumar menos del 1 % en peso.
3. Durante las mediciones se deben emplear cristales de arsenopirita para la calibración del As y no estándares puros, por el tipo de enlace que este elemento produce en el mineral.

Se tomaron los valores promedio y mediana de As (en % atómico) en la arsenopirita de cada muestra, para garantizar la representatividad de los datos, teniendo en cuenta su asociación con los sulfuros de Fe (pirita, pirrotina o pirita-pirrotina) y su textura (diseminada, masiva, vetillas). De esta manera, se obtuvieron temperaturas de cristalización entre *ca.* 370 y 490 °C para los especímenes

pertenecientes a los sulfuros masivos (etapa de mineralización principal), y de ca. 370 °C para las venas tardías de calcita con mineralización asociada (Figura 38).

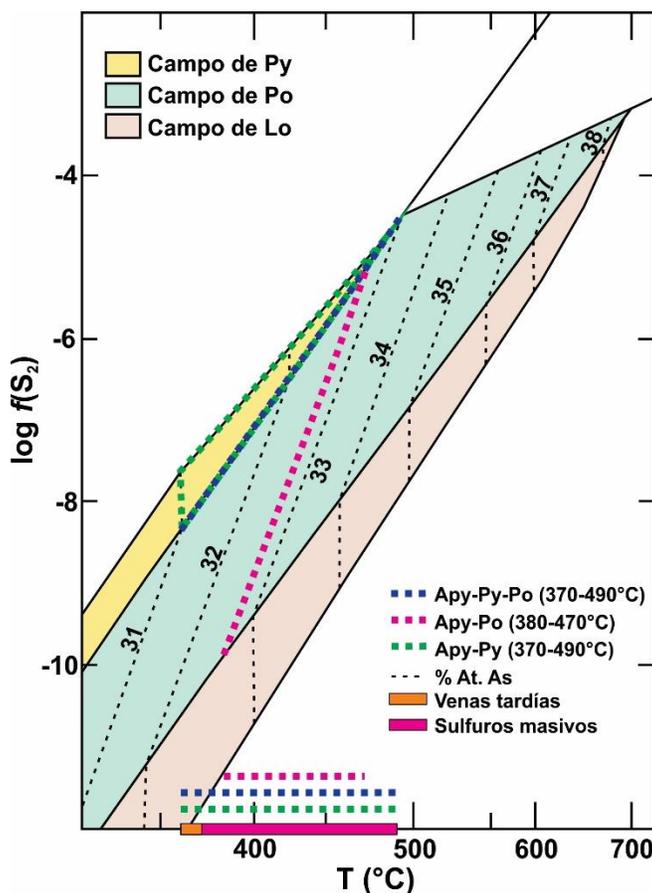


Figura 38. Geotermómetro de la arsenopirita indicando temperaturas de entre 370-490 °C para los sulfuros masivos y ca. 370 °C para las venas de calcita mineralizadas. Modificado de Sharp et al. (1985).

5.4.3 Cobres grises

Las sulfosales denominadas “cobres grises” tienen como fórmula general $(Ag,Cu)_{10}(Fe,Zn)_2(Sb,As)_4S_{13}$ (Sack et al., 2005) y en los sulfuros masivos y venas tardías del cuerpo de Santa María se disponen en un rango composicional muy amplio del espacio definido por Sack et al. (2005; Figura 39 y 40). De este modo, las muestras pertenecientes a las venas tardías siguen una tendencia aproximadamente lineal, cuyos extremos son ricos en Zn (2,9 a 5,3 % en peso)-Sb (5,2 a 27,9 % en peso; tendencia a hakita) y Fe (2,0 a 5,6 % en peso)-As (0,6 a 16,7% en peso; tendencia a tenantita), con enriquecimientos continuos en Cu (32,2 a 39,5 % en peso) con respecto a Ag (0,6 a 5,2 % en peso).

Por su parte, los cobres grises de los sulfuros masivos exhiben una dominancia de Sb (21,4 a 27,3 % en peso) sobre As (0,2 a 2,7 % en peso) y de Fe (4,5 a 7,6 % en peso) sobre Zn (0,5 a 3,3 % en peso) en la mayoría de los casos, junto con proporciones variables de Cu (14,0 a 25,7 % en peso) y Ag (16,7 a 31,4 % en peso), denotando una solución sólida entre tetraedrita y freibergita. Sin embargo, un grupo de cobres grises están enriquecidas en Zn (6,4 a 6,8 % en peso) respecto a Fe (0,6 a 1,9 % en peso), ubicándolas en la serie hakita- $Ag_{10}Zn_2Sb_4S_{13}$. A modo de trazas, todas estas sulfosales pueden exhibir cantidades variables de Bi (<1270 ppm) y Se (<2070 ppm).

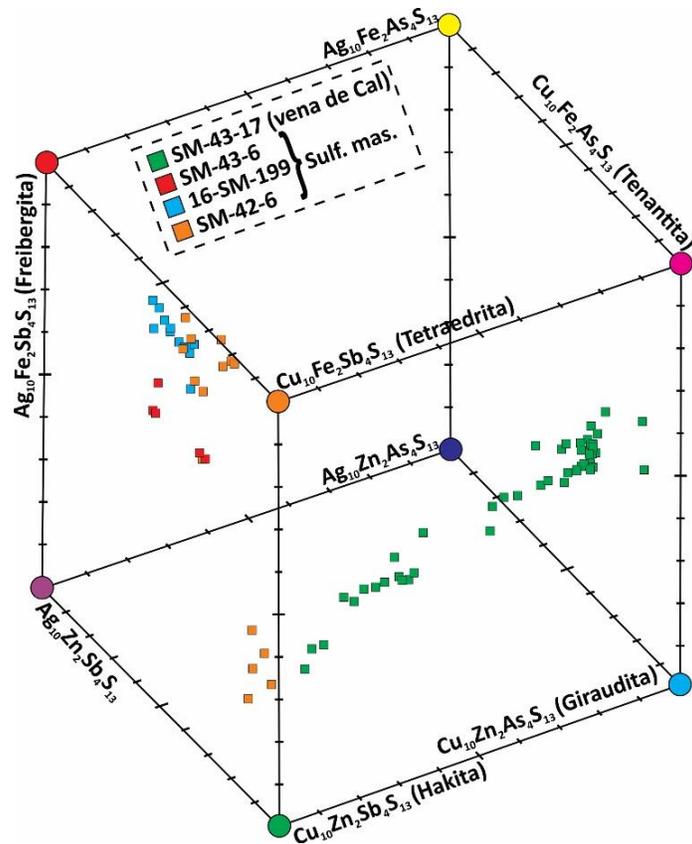


Figura 39. Sulfosales de Santa María graficadas en el espacio definido por los miembros extremos del sistema Ag-Cu-Zn-Fe-As-Sb. Modificado de Sack et al. (2005).

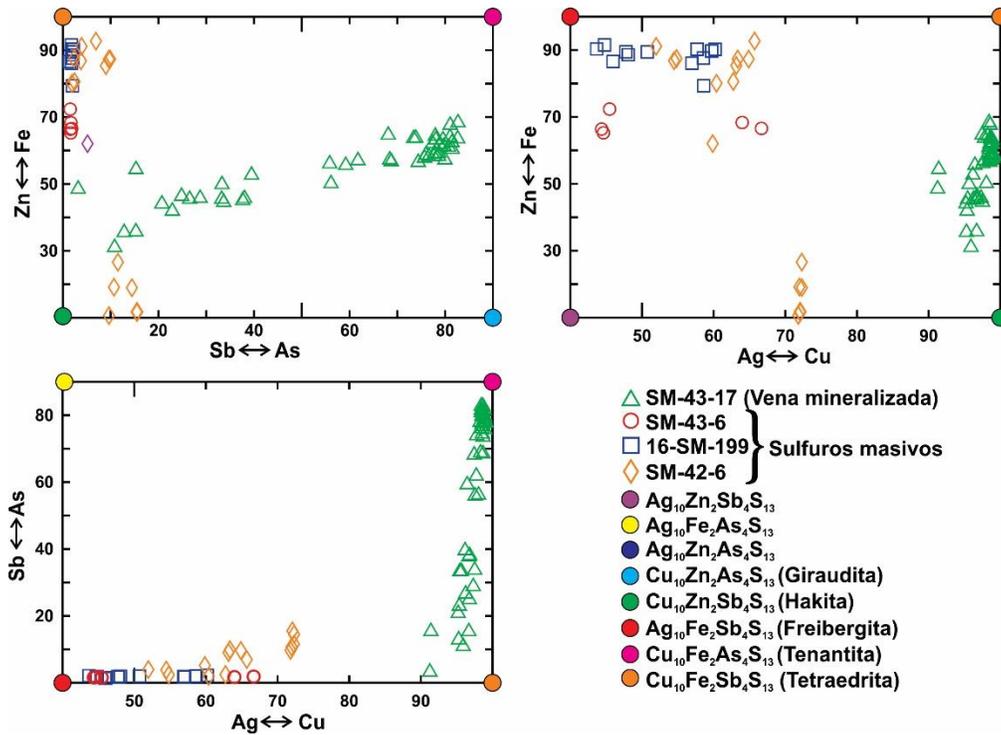
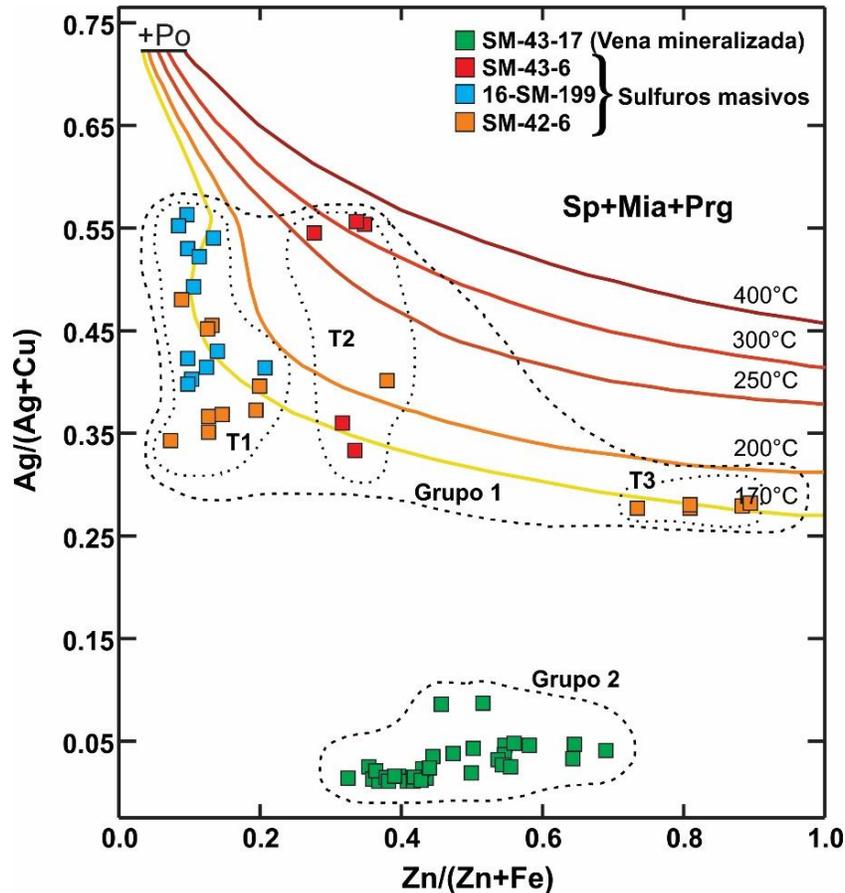


Figura 40. Proyección de los cobres grises de Santa María en diagramas X vs Y (% en peso).

En el diagrama $Zn/(Zn+Fe)$ vs $Ag/(Ag+Cu)$; *Figura 41*, se aprecian principalmente dos grupos de datos: el grupo 1 exhibe una relación $Ag/(Ag+Cu)$ muy baja ($<0,1$) y el grupo 2 valores de $Ag/(Ag+Cu) > 0,25$, que corresponden a los cobres grises de las venas tardías y de los sulfuros masivos, respectivamente. Asimismo, dentro del grupo 2 se reconocen tres tendencias: la tendencia 1 con $Zn/(Zn+Fe) < 0,2$ y $0,35 < Ag/(Ag+Cu) < 0,55$, la tendencia 2 con $Zn/(Zn+Fe) \approx 0,4$ y $Ag/(Ag+Cu) \approx 0,55$ o $\approx 0,35$, y la tendencia 3 con $Ag/(Ag+Cu) \approx 0,3$ y $0,7 < Zn/(Zn+Fe) < 0,9$.

Siguiendo la metodología aplicada por Sack (2005), quien presenta una base de datos para el sistema $Ag_2S-Cu_2S-ZnS-FeS-Sb_2S_3-As_2S_3$ y propone un geotermómetro para este grupo de minerales, en la *Figura 41* se muestra como los cobres grises de las venas tardías (grupo 1) y de los sulfuros masivos (grupo 2) se formaron a una temperatura menor o igual a 170° y entre *ca.* 170 y *ca.* $300^\circ C$, respectivamente. Dentro del grupo 2, los cobres grises de las tendencias 1, 3 y parte de la 2 cristalizaron a *ca.* $170^\circ C$ y corresponden a aquellos que normalmente se disponen como reemplazamientos de galena, calcopirita y esfalerita (*Figura 28A*). Por su parte, los cobres grises ricos en $Ag/(Ag+Cu)$ de la tendencia 2, representadas por cristales euhedrales en asociación con los sulfuros hipógenos (*Figura 17*), presentan una temperatura de cristalización cercana a los $300^\circ C$.

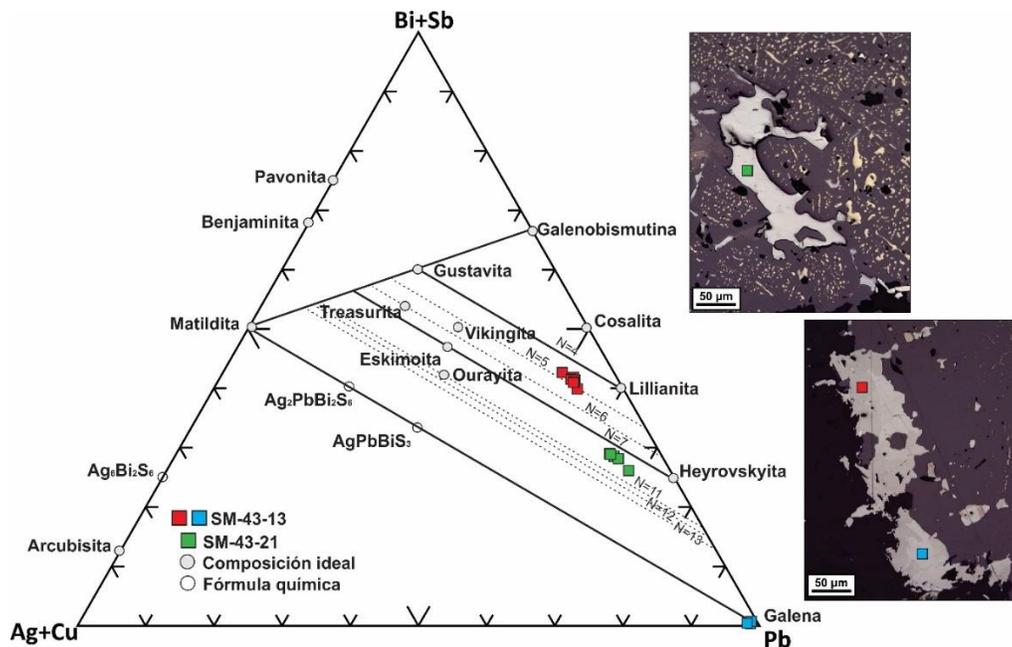


*Figura 41. Geotermómetro definido en el diagrama $Zn/(Zn+Fe)$ vs $Ag/(Ag+Cu)$, que indica temperaturas inferiores a $170^\circ C$ para los cobres grises de las venas tardías y de entre $170^\circ C$ y *ca.* $300^\circ C$ para los cobres grises de los sulfuros masivos. Modificado de Sack (2005). T: tendencia.*

5.4.4 Sulfosales de Pb-Bi-Se

Las sulfosales de Pb-Bi-Se asociadas con esfalerita, pirita, galena, arsenopirita y pirrotina en los sulfuros masivos están compuestas principalmente por Pb (42,0-52,6 % en peso), S (10,0-16,2 % en peso), Bi (16,4-21,8 % en peso), Se (4,0-6,2 % en peso) y Ag (1,2-3,0 % en peso), y definen una tendencia lineal en el triángulo composicional de Buzatu *et al.* (2015; *Figura 42*), con menos del 5% de Ag+Cu (en % atómico).

En uno de los sulfuros masivos desarrollado en las rocas ígneas, conformado por pirita, esfalerita, calcopirita y pirrotina fueron identificados reemplazamientos de Se-galena por fases intermedias de la serie lilianita-gustavita, estas segundas con cinco planos “galena-like” (N). Ambos minerales tienen las fórmulas generales: $Pb_{2.57}Ag_{0.18}Cu_{0.14}Fe_{0.08}Zn_{0.03}Sb_{1.02}Bi_{0.98}S_{5.4}Se_{0.6}$ (lilianita-gustavita) y $Pb_{0.94}Zn_{0.03}Ag_{0.03}Se_{0.2}S_{0.8}$ (Se-galena). Por su parte, en un sulfuro masivo del exoskarn constituido por pirita, esfalerita, calcopirita y arsenopirita se halló una sulfosal con la composición aproximada de una heyrovskyita (serie heyrovskyita-eskimoita), con cerca de nueve planos “galena-like” y fórmula promedio $Pb_{5.03}Ag_{0.61}Zn_{0.32}Fe_{0.04}Bi_2S_{7.99}Se_{1.01}$.



*Figura 42. Clasificación de sulfosales de Bi-Pb-Se del cuerpo de Santa María en el diagrama triangular (Ag+Cu)-(Bi+Sb)-Pb. Modificado de Buzati *et al.* (2015).*

5.4.5 Magnetita

La magnetita es posiblemente el mineral más escaso y errático del yacimiento, apareciendo únicamente dos cristales en un sulfuro masivo formado por pirita, esfalerita, calcopirita, arsenopirita y Se-heyrovskyita. De acuerdo con sus proporciones de $(Fe^{2+},Mg,Mn)O$ (30,4 % en peso), $(Fe^{3+},Al)_2O_3$ (67,9 % en peso) y TiO_2 (<0,02 % en peso), fue posible clasificarla como un miembro intermedio de la serie magnetita-wüstita (*Figura 43A*).

Por otra parte, se encontraron contenidos traza variables de Mg (<78 ppm), Al (963-116 ppm), Ti (42-125 ppm), Cr (<102 ppm), Mn (782-743 ppm), Co (644-707 ppm), Ni (<259 ppm) y Zn (305-875 ppm; *Figura 43B*), que muestran ligeras similitudes con los valores reportados para magnetita de los

depósitos: Ag-Pb-Zn vetiforme (Cœur d'Alene, Idaho, EUA; Nadoll *et al.*, 2014) y de skarn Zn-Pb (Copper Flat, Nuevo México, EUA; Nadoll, 2011).

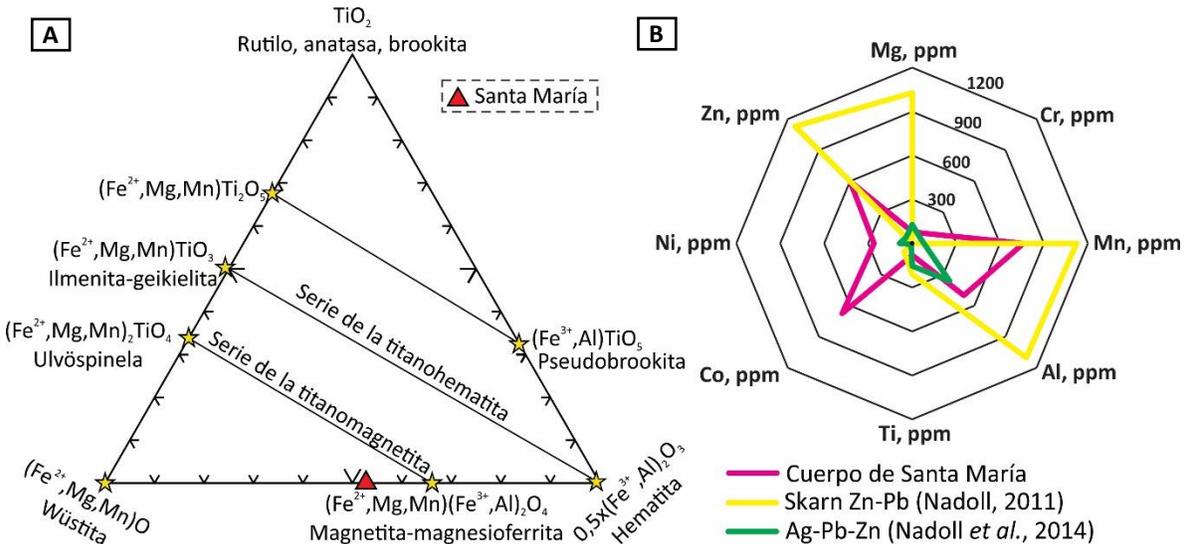


Figura 43. Diagrama composicional de óxidos de Fe-Ti y gráfico comparativo para magnetita de Santa María y de distintos tipos de depósitos. A. Diagrama composicional de óxidos de (Fe^{2+}, Mg, Mn) , $(Fe^{3+}, Al)_2$ y Ti. Modificado de Ivanyuk *et al.* (2017). B. Modelo radial mostrando ligeras similitudes entre las trazas de magnetita del cuerpo de Santa María y aquella de otros depósitos de Zn-Pb-Ag.

6 PETROGRAFÍA Y MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS

6.1 Petrografía de inclusiones fluidas

Para la caracterización petrográfica de las inclusiones fluidas fueron empleados únicamente cristales bien desarrollados, sin evidencias de recristalización ni deformación frágil o dúctil. Los minerales usados fueron: granate, esfalerita, cuarzo, calcita y fluorita asociados con la fase prógrada del sistema (exoskarns con granate), el estadio mineralizante principal (etapa 4; sulfuros masivos constituidos por esfalerita-calcita-fluorita-cuarzo) y las venas y vetillas tardías con o sin mineralización metálica asociada (calcita).

La descripción de las asociaciones de inclusiones fluidas se realizó por etapas: prógrada, retrógrada y venilleo tardío con o sin mineralización, dado que las variaciones en las características entre las asociaciones de inclusiones fluidas de una misma etapa son constantes en la mayoría de los casos, independientemente del mineral huésped. Asimismo, la caracterización de las inclusiones fluidas como primarias, secundarias o pseudo-secundarias, el tipo de atrapamiento y las modificaciones post-atrapamiento se describieron con base en los criterios propuestos por Roedder (1984) y Van den Kerkhof y Hein (2001).

Cabe aclarar que en la esfalerita zonada de la etapa 4 (sulfuros masivos), se describieron las inclusiones fluidas presentes en cada una de las bandas en diferentes asociaciones. Por su parte, los cristales de cuarzo, calcita y granate no exhiben zonaciones observables al microscopio, y sus inclusiones fluidas se agruparon en asociaciones particulares siguiendo sus propiedades. En la *Figura 44* se muestra un resumen de las inclusiones estudiadas, sus principales características y el probable mecanismo de atrapamiento dominante.

		Muestra	Características	Esquema	Tipo de atrapamiento			
Fase prógrada	SM-43-20	Exoskarn	Granate	A1 (P, L+V) F: rómbica, irregular. GR: 0,85-0,9 MP: Reequilibrio		Homogéneo Contracción		
			A2 (P, L+V) F: cuadrada. GR: 0,95		¿Homogéneo? Contracción			
			A3 (S, L+V) F: cuadrada. GR: 0,9-0,95		¿Homogéneo? Contracción			
Fase retrógrada en exoskarn y alteración hidrotermal de rocas ígneas	SM-42-1	Sulfuro masivo	Esfalerita	A1 (P, L+V±S ₁) F: redonda, ovalada, cuneiforme, poligonal, irregular. GR: 0,8-0,85 MP: Reequilibrio, necking.		Heterogéneo Contracción S suspendidos		
				A2 (P, L+V+S ₂ ±S ₃) F: rómbica, ovalada, triangular, irregular. GR: 0,85-0,9 MP: Reequilibrio, necking.		Heterogéneo Saturación S suspendidos		
				A1 (PS, L+V) F: ovalada. GR: 0,8-0,85		Homogéneo Contracción		
			A3 (S, L+V) F: ovalada, redondeada. GR: 0,9		Homogéneo Contracción			
			Cuarzo	A1 (P, L+V) F: ovalada, redondeada. GR: ~0,8		Homogéneo Contracción		
				A2 (P, L+V+S ₂ +±S ₃ ?) F: irregular. GR: 0,9-0,95		Heterogéneo Saturación S suspendidos		
			Calcita	A1 (P, L+V) F: redonda, ovalada, rectangular. GR: 0,75-0,8 MP: reequilibrio.		Homogéneo Contracción		
				A4 (S, L+V) F: irregular, redondeada, ovalada. GR: 0,9-0,95		Homogéneo Contracción		
				A5 (S, L+V / S, V / S, L+V+S) F: ovalada, redonda, cuadrada. GR: 0,9-0,95		Heterogéneo Saturación Ebullición		
			SM-42-5	Sulfuro masivo	Cuarzo	A1 (P, L+V±S ₃ ?) F: redonda, cuadrada, cuneiforme, irregular. GR: 0,8-0,85		Heterogéneo Contracción S suspendidos
			SM-42-6	Sulfuro masivo	Esfalerita	A1 (P, L+V) F: irregular, ovalada, redondeada, triangular. GR: 0,75-0,8		Homogéneo Contracción
					Cuarzo	A1 (P, L+V±S ₁) F: redondeada, irregular, rómbica, cuadrada. GR: 0,7-0,75 MP: reequilibrio, necking.		Heterogéneo Contracción S suspendidos
					A1 (PS, L+V) F: irregular. GR: 0,7-0,75		Homogéneo Contracción	
			SM-42-9	Sulfuro masivo	Esfalerita	A1 (P, L+V) F: cuneiforme, cuadrada, redonda. GR: 0,8-0,85		Homogéneo Contracción
					Cuarzo	A1 (P, L+V) F: cuneiforme, cuadrada, redonda, ovalada. GR: 0,8-0,85		Homogéneo Contracción

Figura 44. Asociaciones de inclusiones fluidas (IF) primarias, secundarias y pseudosecundarias, identificadas en las etapas prógrada, retrógrada (etapa 4) y tardía del cuerpo de Santa María. P: IF primarias, S: IF secundarias, PS: IF pseudosecundarias, L: líquido, V: vapor, S₁: halita, S₂: minerales opacos, S₃: mineral traslúcido tabular, S₄: mineral traslúcido circular, red.: redondeado, tab.: tabular, F: forma, GR: grado de relleno, MP: modificaciones post-atrapamiento, Eb: ebullición, S: sólidos.

Muestra		Características	Esquema	Tipo de atrapamiento	
Fase retrógrada en exokarn y alteración hidrotermal de rocas ígneas	SM-43-4	Vetilla de Cal-FI-Qz-Sp en aplita con alteración pervasiva de adularia	Esfalerita	A1 (P, L+V) F: redondeada, poligonal. GR: 0,8-0,85	Homogéneo Contracción
			Cuarzo	A1 (P, L+V+S ₁ ±S ₂ / P, L+V / P, V) F: cuadrada, irregular, ovalada, redondeada. GR: variable MP: <i>necking</i> .	Heterogéneo Saturación Ebullición S suspendidos
			Calcita	A2 (P, L+V±S ₂) F: cuadrada, rectangular. GR: 0,85-0,9 S traslucido tab.	Heterogéneo Contracción S suspendidos
			Fluorita	A1 (P, L+V+S ₁) F: cuadrada, irregular, puzzle. GR: 0,8-0,85 MP: reequilibrio, <i>necking</i> .	Homogéneo Saturación
				A3 (S, L+V / S, V+L / S, L+V+S ₁) F: ovalada, redonda, cuadrada. GR: variable MP: <i>necking</i> .	Heterogéneo Contracción S suspendidos ¿Ebullición?
			SM-43-7	Aplita mineralizada	Esfalerita
	A2 (P, L+V) F: ovalada, redonda. GR: 0,9-0,95	Homogéneo Contracción			
	A3 (S, L+V) F: redonda, ovalada, irregular. GR: 0,95 MP: <i>necking</i> .	Homogéneo Contracción			
	SM-43-8	Aplita con alteración Qz-Ser y sulfuro masivo	Cuarzo	A1 (P, L+V±S ₂) F: ovalada, rómbica, triangular, redonda. GR: 0,8-0,85 S traslucido tab.	Heterogéneo Contracción S suspendidos
			Fluorita	A2 (S, L+V / S, L+V+S ₁ ±S ₂ / S, V) F: redonda, irregular, ovalada, cuadrada. GR: variable MP: <i>necking</i> , coalescencia, decrepitación.	Heterogéneo Contracción S suspendidos Ebullición
	SM-43-12	Aplita con alteración pervasiva de Adl y rellenos de FI-Adl	Fluorita	A1 (P, L+V) F: cuadrada, ovalada. GR: 0,7-0,75 MP: ¿reequilibrio?	Homogéneo Contracción
				A2 (S, L+V±S ₂) F: redonda, cuadrada, ovalada, irregular. GR: 0,75-0,8 MP: <i>necking</i> .	Heterogéneo Contracción S suspendidos
				A3 (S, L+V+S ₁ ±S ₂) F: ovalada, alargada. GR: 0,9-0,95 S opaco red. Halita	Heterogéneo Saturación S suspendidos
				A4 (S, L+V) F: cuneiforme, irregular, cuadrada. GR: 0,9-0,95	Homogéneo Contracción
			Adularia	A5 (P, L+V) F: ovalada. GR: ~0,9	¿Homogéneo? Contracción
	SM-43-20	Rellenos de Cal en exokarn	Calcita	A1 (P, L+V±S ₂) F: redondeada, rómbica. GR: 0,8-0,85	Homogéneo Contracción
			A2 (P, L+V) F: redondeada, rómbica. GR: ~0,95	Homogéneo Contracción	

Continuación de Figura 44

Fase retrógrada en exoskarn y alteración hidrotermal de rocas ígneas		Muestra	Características	Esquema	Tipo de atrapamiento	
SM-43-21	Relleno de Cal-Fl-Qz-sulfuros en exoskarn	Esfalerita	A1 (P, L+V) F: poligonal, triangular, irregular, trapezoidal. GR: 0,8-0,85 MP: reequilibrio.		Homogéneo 	
		Cuarzo	A1 (P, L+V) F: irregular. GR: ~0,85		¿Homogéneo? 	
		Calcita	A1 (P, L+V / P, V+L) F: redondeada, ovalada, irregular, rómbica. GR: variable.		Heterogéneo 	
			A2 (PS, L+V) F: rómbica, redonda, cuadrada. GR: 0,9-0,95		Homogéneo 	
		Fluorita	A1 (P, L+V±S _i) F: redonda, irregular, cuadrada, ovalada. GR: 0,8-0,85 MP: necking.		Heterogéneo 	
	A3 (S, L+V±S _i) F: redonda, cuadrada, irregular. GR: 0,8-0,85			Heterogéneo 		
	SM-58-3	Sulfuro masivo	Calcita	A1 (P, L+V / P, V+L / P, L+V+S) F: redonda, cuadrada, irregular. GR: variable.		Heterogéneo
				A2 (PS, V+L) F: redondeada, ovalada. GR: 0,4-0,5		Homogéneo
			Fluorita	A3 (P, L+V) F: cuadrada. GR: ~0,8		¿Homogéneo?
				A4 (S, L+V) F: redondeada. GR: 0,5-0,55		Homogéneo
				A5 (S, L+V±S _i ±S _j) F: redonda, irregular, ovalada. GR: 0,8-0,85		Heterogéneo
	SM-58-7	Sulfuro masivo	Esfalerita	A1 (P, L+V±S _i) F: poligonal, triangular, ovalada, irregular. GR: 0,8-0,9 MP: reequilibrio.		Heterogéneo
			Calcita	A2 (P, L+V) F: irregular, triangular. GR: ~0,95		Homogéneo
			Fluorita	A2 (P, L+V) F: cuadrada, triangular. GR: ~0,95		Homogéneo
				A3 (S, L+V±S _i) F: ovalada, redondeada, irregular. GR: 0,9-0,95 MP: necking.		Heterogéneo
SM-71-7			Relleno de sulfuros masivos en wackestone recristalizada	Esfalerita	A1 (P, L+V) F: triangular, poligonal, irregular, redondeada, lenticular. GR: 0,8-0,85 MP: reequilibrio.	
	A2 (S, V+L) F: cuadrada, redondeada. GR: 0,45-0,5				Homogéneo 	
	Calcita	A3 (P, L+V+S _i /P, V/P, L+V/P, L+S) F: redondeada, ovalada, lenticular, cuadrada. GR: variable			Heterogéneo 	
		A4 (P, L+V) F: cuadrada, irregular. GR: 0,9-0,95			Homogéneo 	

Muestra		Características	Esquema	Tipo de atrapamiento
Venas y vetillas tardías con o sin mineralización	SM-42-5	Vena de Cal Calcita A2 (P, L+V) F: cuneiforme, cuadrada, irregular. GR: 0,9-0,95		Homogéneo Contracción
	SM-42-6	Vena de Cal Calcita A2 (S, L+V) F: ovalada, redondeada. GR: ~0,95 MP: <i>necking</i> .		Homogéneo Contracción
		Calcita A3 (P, L+V±S ₁) F: irregular, redonda, cuadrada, ovalada. GR: 0,9-0,95		Heterogéneo Contracción S suspendidos
		Calcita A4 (P, L+V) F: cuneiforme. GR: ~0,75		¿Homogéneo? Contracción
	SM-42-9	Vena de Cal Calcita A2 (P, L+V) F: cuneiforme, cuadrada, ovalada, irregular. GR: 0,9-0,95 MP: <i>necking</i> , reequilibrio.		Homogéneo Contracción
		Calcita A2 (PS, L+V / PS, L) F: redondeada, irregular. GR: ~0,9		Homogéneo Contracción
		Calcita A3 (P, L+V) F: poligonal. GR: ~0,7		¿Homogéneo? Contracción
	SM-43-7	Vena de Cal Calcita A4 (P, L+V±S ₂) F: rómbica, redonda, ovalada. GR: 0,7-0,75 MP: reequilibrio.		Heterogéneo Contracción S suspendidos
		Calcita A5 (S, L+V) F: ovalada, redonda. GR: ~0,95		Homogéneo Contracción
	SM-43-9	Vena de Cal en sulfuro masivo Calcita A1 (P, L+V+S ₁ / P, L+V / P, V+L) F: poligonal, redonda, cuadrada, irregular. GR: variable MP: <i>necking</i> , reequilibrio.		Heterogéneo Saturación Ebullición
		Calcita A1 (PS, L+V±S ₂) F: redonda, ovalada. GR: 0,75-0,8 MP: <i>necking</i> , reequilibrio.		Heterogéneo Saturación Ebullición
	SM-43-17	Vena de calcita con sulfuros y fahlores Calcita A1 (P, L+V±S ₂ ±S ₃) F: rectangular, cuadrada, redonda, ovalada. GR: 0,8-0,85 MP: reequilibrio, <i>necking</i> .		Heterogéneo Contracción S suspendidos
Calcita A2 (P, L+V±S ₂) F: cuadrada, irregular. GR: 0,9-0,95				Heterogéneo Contracción S suspendidos
Calcita A3 (PS, L+V) F: redondeada, ovalada. GR: 0,85-0,9				Homogéneo Contracción
Calcita A4 (PS, V) F: redondeada. GR: <0,4				Homogéneo Contracción
SM-43-19	Vena de Cal en exoskarn retrogradado Calcita A1 (P, L+V±S ₂) F: redonda, rómbica, ovalada, cuadrada, irregular. GR: 0,75-0,8 MP: reequilibrio.		Heterogéneo Contracción S suspendidos	
		Calcita A2 (P, L+V±S ₂) F: irregular, rectangular, rómbica. GR: 0,9-0,95		Heterogéneo Contracción S suspendidos
		Calcita A3 (P, L+V±S ₂) F: redondeada, ovalada, rómbica. GR: 0,5-0,9		Heterogéneo Saturación Ebullición
		Calcita A1 (PS, L+V) F: redondeada, rómbica. GR: ~0,8		Homogéneo Contracción
SM-43-20	Vena de Cal en exoskarn Calcita A3 (P, L+V+S ₂ / P, V) F: redondeada, rómbica, irregular. GR: 0,65-0,7 MP: <i>necking</i> .		Heterogéneo Contracción ¿S suspendidos? Ebullición	
		Calcita A4 (P, L+V) F: irregular, cuadrada. GR: 0,9-0,95 MP: <i>necking</i> .		Homogéneo Contracción

6.1.1 Etapa prógrada

Para la caracterización de los fluidos generadores de la etapa prógrada en el cuerpo mineralizado de Santa María se estudiaron inclusiones primarias y secundarias hospedadas en cristales de granate, pertenecientes al exoskarn.

En el granate fueron reconocidas muy pocas inclusiones fluidas primarias, las cuales muestran formas principalmente rómbicas, irregulares y cuadradas, con grados de relleno entre 0,8 y 0,9, carácter bifásico (L+V) y tamaño cercano a 7 μm (Figura 45A y B). Asimismo, fueron observadas inclusiones secundarias bifásicas (L+V) con grado de relleno cercano a 0,9 y tamaño <5 μm , ubicadas a lo largo de una fractura en uno de los cristales (Figura 45C). Teniendo en cuenta las características descritas, las inclusiones primarias y secundarias se produjeron por un atrapamiento homogéneo a partir de un fluido monofásico.

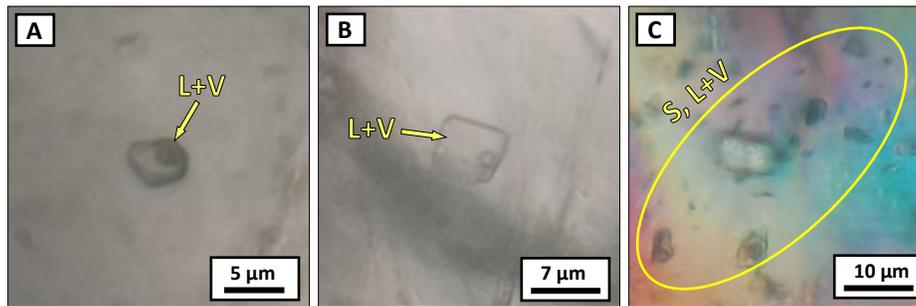


Figura 45. Inclusiones fluidas primarias en granates de la fase prógrada. Nótese reequilibrio de éstas evidenciado por morfologías poligonales.

6.1.2 Evento de mineralización principal (etapa 4)

En esta etapa fueron descritas inclusiones primarias, secundarias y pseudosecundarias hospedadas en cristales de esfalerita, cuarzo, calcita y fluorita, presentes en los sulfuros masivos y las rocas ígneas con alteración pervasiva de adularia-cuarzo-sericita.

6.1.2.1 Inclusiones en esfalerita

En términos generales, las inclusiones fluidas primarias son las más abundantes en la esfalerita de los sulfuros masivos y muestran formas poligonales (triangulares, pentagonales y hexagonales), redondeadas, ovaladas, cuneiformes e irregulares, evidenciando reequilibrio. Su grado de relleno es aproximadamente constante (0,8-0,85), aunque fueron reconocidas familias con grados de relleno cercanos a 0,95, y su tamaño varía entre pocos micrómetros y cerca de 30 μm (Figura 46).

Los componentes dominantes en estas inclusiones primarias son una fase líquida y una vapor. Sin embargo, en determinadas asociaciones aparecen cristales de halita (S_1 ; Figura 46D) y de minerales opacos (S_2 ; Figura 46D-F) que, según sus propiedades, fueron interpretados como cristales hijo y sólidos atrapados, respectivamente. La existencia de sólidos de opacos atrapados refuerza la idea del carácter primario de estas inclusiones por su asociación paragenética con la mineralización metálica. Por último, en algunos casos se encontraron evidencias de estrangulamiento parcial y/o total (Figura 46G-I).

Teniendo en cuenta la naturaleza de las inclusiones primarias estudiadas en esfalerita, se considera un atrapamiento homogéneo en la mayoría de los casos, con ocasionales sólidos suspendidos.

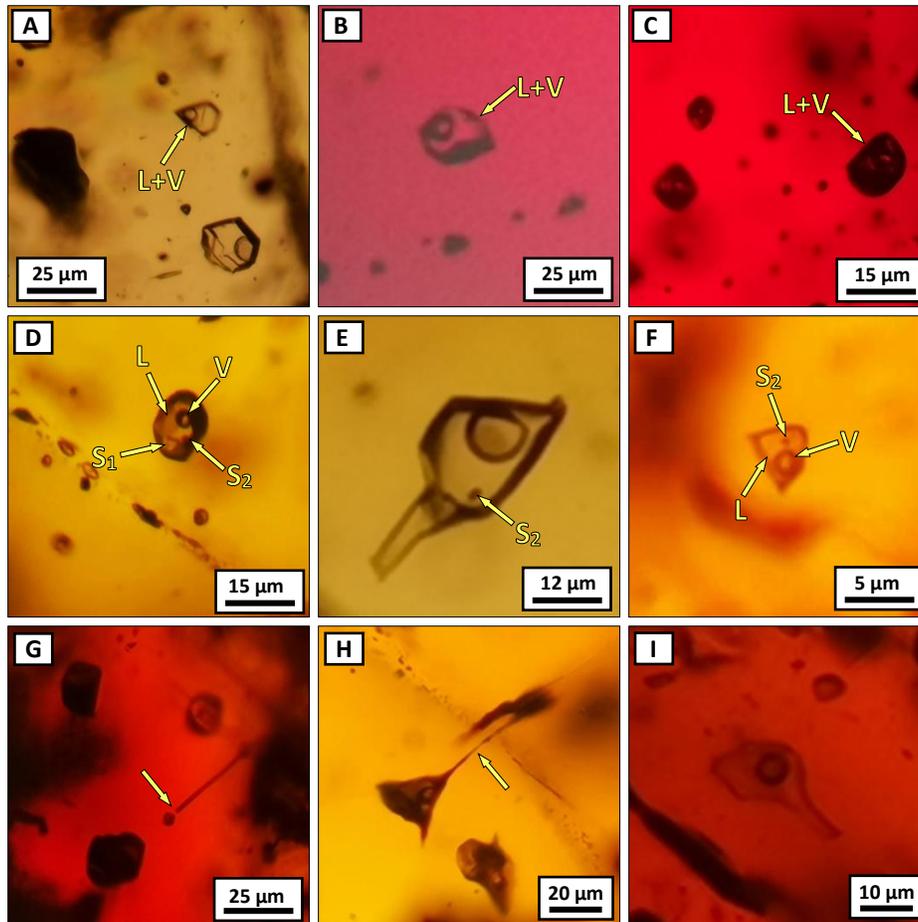


Figura 46. Inclusiones fluidas (IF) primarias en esfalerita. A-C. IF bifásicas con morfologías de cristal negativo. D. IF multisólida con cristal hijo de halita (S_1) y atrapado de un mineral opaco (S_2). E-F. IF trifásicas con cristales atrapados de opacos. G-I. Estrangulamiento parcial y total en inclusiones fluidas bifásicas.

Menos frecuentemente, los cristales de esfalerita pueden contener inclusiones fluidas secundarias (Figura 47A) y pseudosecundarias (Figura 47B), las primeras de carácter bifásico (L+V), con grados de relleno elevados (0,9-0,95) o muy bajos (0,4-0,5), y las segundas con formas ovaladas, bifásicas (L+V) y grado de relleno cercano a 0,85. Estas inclusiones están alineadas dentro de los cristales, formando caminos (*trails*) intragranulares, y muchas veces desarrollan estrangulamiento.

6.1.2.2 Inclusiones en cuarzo

Los cristales de cuarzo pertenecientes a los sulfuros masivos aparecen como inclusiones hexagonales y tabulares en los minerales de mena, y presentan inclusiones sólidas de éstos, indicando coprecipitación. Las inclusiones fluidas reconocidas en cuarzo no son muy abundantes y su tamaño muchas veces es tan fino (<2 μm) que sus características son difíciles de determinar. No obstante, en algunas muestras fueron reconocidas inclusiones fluidas primarias y pseudosecundarias.

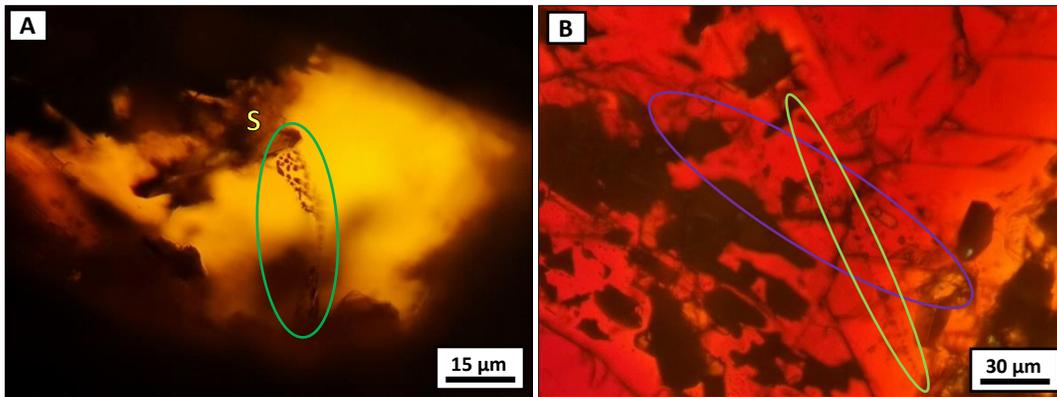


Figura 47. Inclusiones fluidas secundarias intragranulares (A) y pseudosecundarias (B) en esfalerita.

Las inclusiones primarias son las más comunes, caracterizándose por tener tamaño inferior a $10\ \mu\text{m}$ y por mostrar formas muy variadas (redondeada, ovalada, cuadrada, rómbica, entre otras) evidenciando las más poligonales morfologías de cristal negativo (Figura 48). Asimismo, la mayoría de ellas son bifásicas (L+V), con grados de relleno entre 0,75-0,9, aunque en algunas muestras aparecen también inclusiones ricas en vapor ($V\pm L$; Figura 48E) e inclusiones trifásicas ($L+V+S_1$, $L+V+S_2$; Figura 48B-C) y/o multisólidas ($L+V+S_1+S_3$; Figura 48D) con sólidos atrapados de cristales translúcidos y tabulares (S_3). Los sólidos se caracterizaron como atrapados en la mayoría de los casos, por no ser constantes dentro de una misma asociación y por tener gran tamaño con respecto a la inclusión. Sin embargo, algunos cristales de halita son cristales hijo y se relacionan con familias en donde también aparecen inclusiones ricas en vapor (Figura 48E-F).

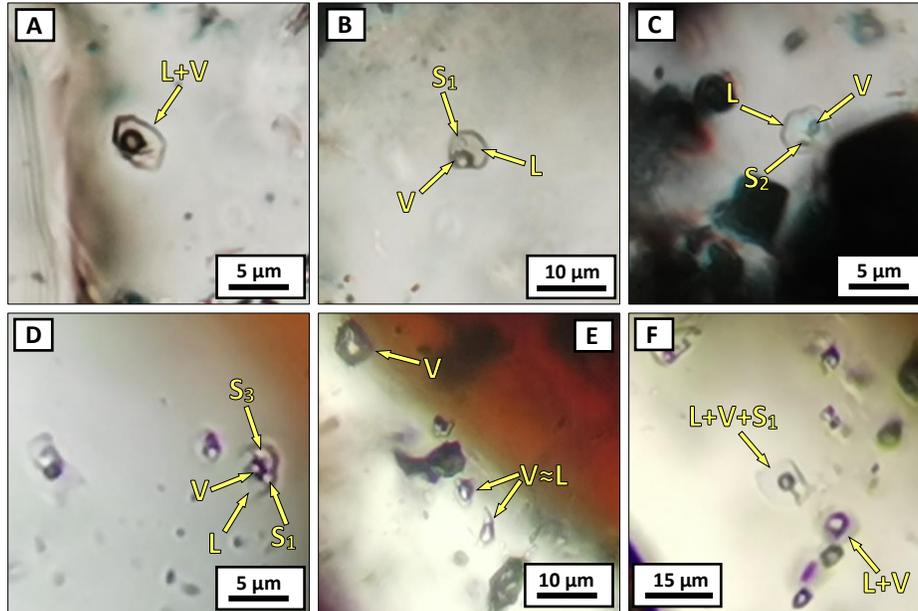


Figura 48. Tipos de inclusiones fluidas (IF) primarias en cuarzo. A. IF bifásica con morfología de cristal negativo. B y C. IF trifásicas con cristales atrapados de halita (S_1) y un mineral opaco (S_2), y grado de relleno variable entre 0,85 y 0,95. D-F. Asociación de inclusiones fluidas ricas en vapor, bifásicas con grados de relleno variable, trifásicas ($L+V+S_1$) y multisólidas ($L+V+S_1+S_2$) evidenciando ebullición en el sistema.

Por su parte, las inclusiones pseudosecundarias son mucho menos recurrentes y muestran características muy similares a las primarias: grado de relleno cercano a 0,75, carácter bifásico (L+V)

y formas irregulares (*Figura 49*). Éstas ocupan una fractura sellada en un cristal de cuarzo de un sulfuro masivo, la cual no alcanza los límites cristalinos.

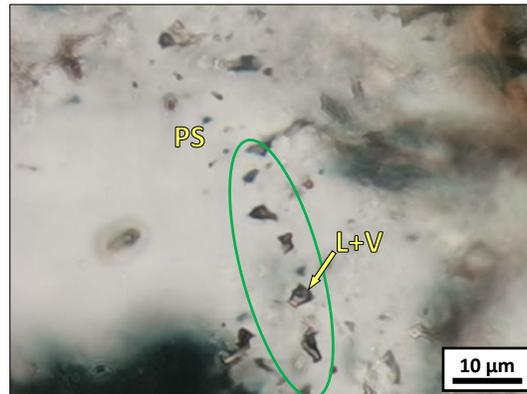


Figura 49. Inclusiones fluidas pseudosecundarias bifásicas (L+V) en cuarzo.

Dadas las propiedades de las inclusiones primarias y pseudosecundarias encontradas en el cuarzo de los sulfuros masivos, se sugiere un atrapamiento homogéneo a partir de un fluido monofásico con ocasionales sólidos en suspensión. Asimismo, se infiere un atrapamiento heterogéneo (solución en ebullición) en una de las muestras, dada la convivencia de inclusiones con grados de relleno variables (L+V, V, V+L) con otras trifásicas con cristales hijos de halita (falsas salmueras).

6.1.2.3 Inclusiones en calcita

La calcita de la etapa 4 hospeda numerosas inclusiones primarias y secundarias con características variables, que responden a diferentes procesos durante la formación. De este modo, fueron reconocidos cuatro tipos de inclusiones fluidas primarias: 1) inclusiones redondeadas, ovaladas y rectangulares, bifásicas (L+V), con grado de relleno de 0,75 a 0,8 y tamaño inferior a 5 μm (*Figura 50A*); 2) inclusiones cuadradas y rectangulares, bifásicas (L+V) y trifásicas (L+V+S₃), con sólidos atrapados, grado de relleno elevado (0,85-0,9) y tamaño inferior a 12 μm (*Figura 50B*); 3) inclusiones redondeadas, ovaladas y rómbicas con grados de relleno muy variables (0,5-0,9), bifásicas (L+V) o trifásicas (L+V+S₁), y de tamaño menor a 15 μm (*Figura 50C-D*); 4) inclusiones bifásicas irregulares y triangulares, con grado de relleno alto (>0,95), y tamaño inferior a 7 μm (*Figura 50E*). Asimismo, se hallaron inclusiones aisladas con claro desarrollo de morfologías de cristal negativo (*Figura 50F*).

Teniendo en cuenta las características de las inclusiones primarias, se pueden inferir distintos mecanismos de atrapamiento: las del tipo 1 y 4 tuvieron un atrapamiento homogéneo a partir de un fluido monofásico; las del tipo 2, un atrapamiento heterogéneo a partir de un fluido con sólidos en suspensión; y las del tipo 3, un atrapamiento heterogéneo desde una solución en ebullición.

Por su parte, las inclusiones secundarias pueden clasificarse como intragranulares y transgranulares. Las intergranulares normalmente muestran tamaños muy reducidos (<2 μm), grado de relleno elevado (ca. 0,95) y carácter bifásico (L+V). En contraste, las transgranulares son de mayor tamaño (<2-20 μm), presentan formas redondeadas y ovaladas, pueden ser monofásicas (V), bifásicas (L+V) y trifásicas (L+V+S), y se disponen en nubes orientadas en una dirección particular, que atraviesan los límites cristalinos (*Figura 51*). Sus grados de relleno y relaciones volumétricas L:V extremadamente variables, los sólidos atrapados y la coexistencia con inclusiones ricas en vapor,

son evidencias de atrapamiento heterogéneo a partir de un fluido en ebullición, con sólidos en suspensión.

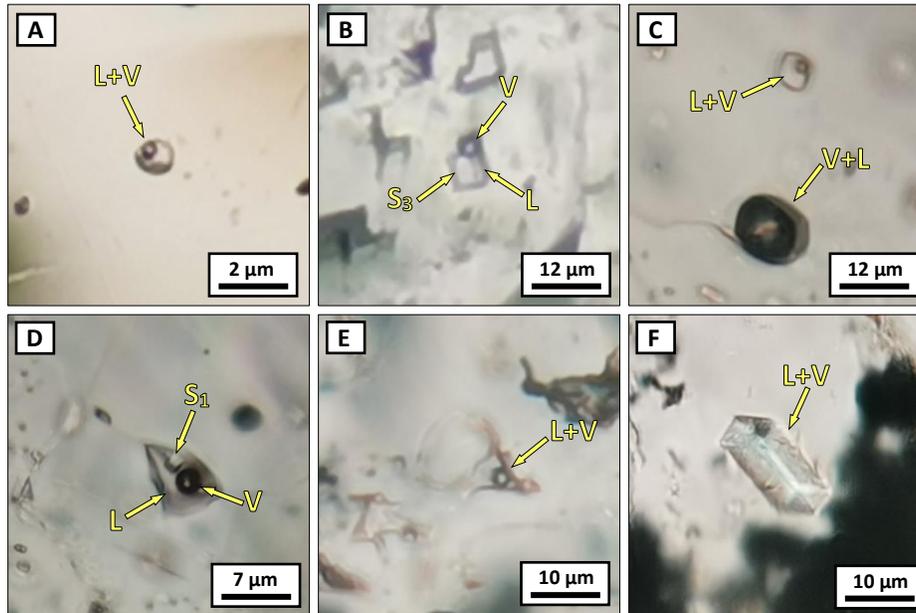


Figura 50. Tipos de inclusiones fluidas (IF) primarias en calcita. A. IF bifásica del tipo 1. B. IF trifásica (L+V+S₃) con un sólido atrapado de gran tamaño. C y D. Asociación de inclusiones fluidas ricas en vapor, bifásicas y trifásicas (L+V+S₁) con cristal hijo de halita (tipo 3). E. IF bifásica del tipo 4. F. IF bifásica con morfología de cristal negativo.

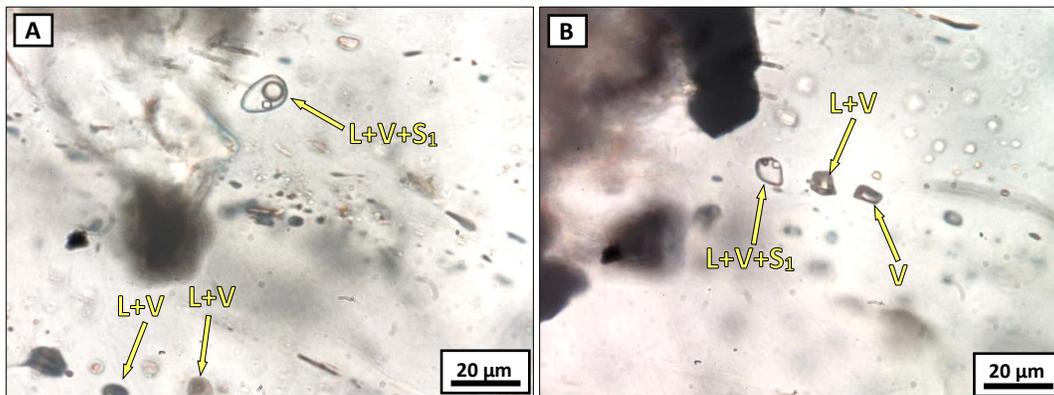


Figura 51. Asociación de inclusiones fluidas secundarias transgranulares en calcita, de carácter monofásico (V), bifásico (L+V) y trifásico (L+V+S), indicativas de ebullición.

6.1.2.4 Inclusiones en fluorita

La fluorita de los sulfuros masivos y rocas ígneas se caracteriza por mostrar una gran abundancia de inclusiones fluidas secundarias con variaciones locales, y, en mucha menor proporción, inclusiones claramente distinguibles como primarias.

Las inclusiones fluidas primarias se caracterizan por mostrar formas cuadradas, redondeadas e irregulares semejantes a fichas de rompecabezas, y por sus propiedades se pueden dividir en tres tipos: 1) inclusiones trifásicas (L+V+S₁) con grado de relleno entre 0,8 y 0,85, tamaño superior a 20 μm y evidencias comunes de estrangulamiento (Figura 52A); 2) inclusiones bifásicas (L+V) y trifásicas

(L+V+S₁), con sólidos atrapados, grado de relleno de 0,75 a 0,85 y tamaño cercano a los 8 μm (Figura 52B); 3) inclusiones bifásicas (L+V) con grado de relleno alto (ca. 0,9) y tamaño variable (5-25 μm; Figura 52C). Estos tipos de inclusiones permiten inferir un atrapamiento: 1) homogéneo por un fluido monofásico saturado en solutos; 2) heterogéneo desde un fluido con sólidos suspendidos; 3) homogéneo en un medio monofásico.

Las inclusiones secundarias en fluorita se disponen a lo largo de caminos intragranulares y muestran, por lo general, formas redondeadas, ovaladas, cuadradas e irregulares. Teniendo en cuenta sus particularidades se pueden dividir en cuatro grupos: 1) inclusiones monofásicas (V), bifásicas (L+V), trifásicas (L+V+S₁) y multisólidas (L+V+S₁+S₃) con evidencias de estrangulamiento, coalescencia y decrepitación local, y tamaño inferior a 20 μm (Figura 52D y E); 2) inclusiones bifásicas (L+V), trifásicas (L+V±S₁±S₂) y multisólidas (L+V+S₁+S₂), con grados de relleno de 0,75 a 0,85 y tamaño cercano a 10 μm (Figura 52F); 3) inclusiones trifásicas (L+V+S₁) y multisólidas (L+V+S₁+S₂) con grado de relleno de 0,9 a 0,95 y tamaño cercano a 15 μm (Figura 52G); 4) inclusiones fluidas bifásicas (L+V) cuyo grado de relleno es elevado (0,9-0,95) y tamaño cercano a los 5 μm (Figura 52H).

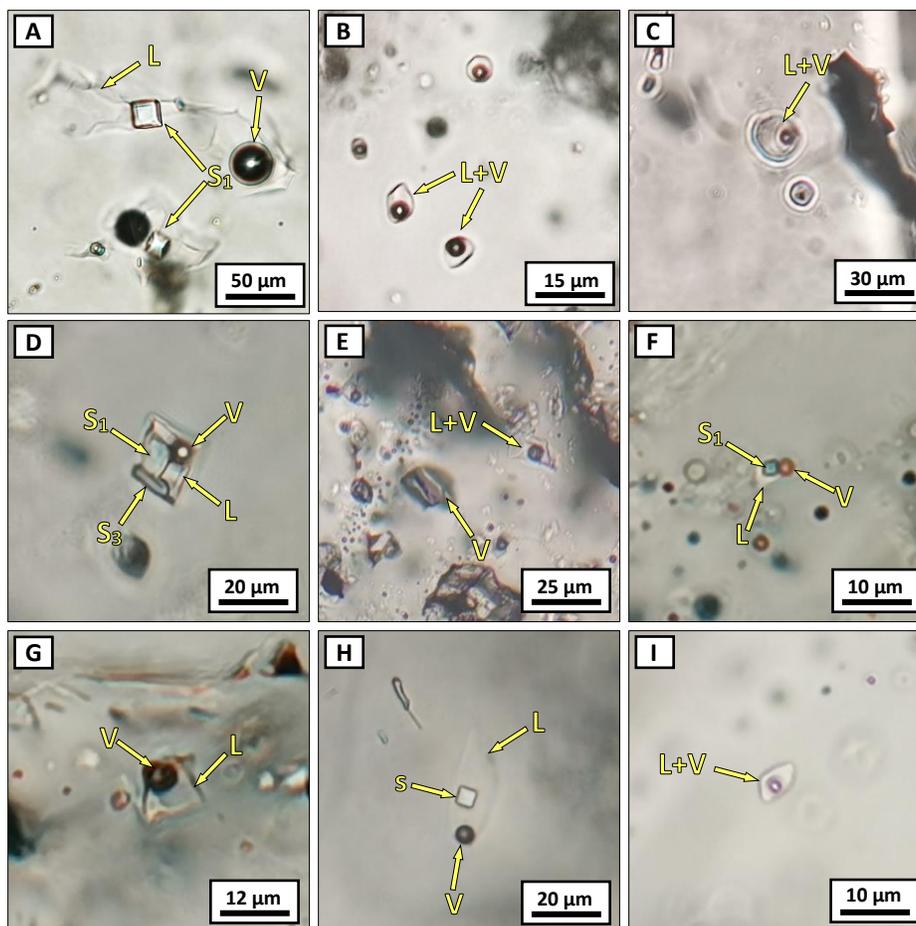


Figura 52. Inclusiones fluidas (IF) primarias en fluorita. A. IF trifásicas primarias (L+V+S₁) del tipo 1. B. IF bifásicas (L+V) del tipo 2. C. IF bifásicas (L+V) del tipo 3. D-F. IF secundarias en fluorita. D-E. Familia de inclusiones fluidas monofásicas (V), bifásicas (L+V), trifásicas (L+V+S₁) y multisólidas (L+V+S₁+S₂), evidenciando ebullición (tipo 1). F-G. IF bifásicas (L+V) asociadas con inclusiones trifásicas (L+V+S₁) con sólidos atrapados (tipo 2). H. IF trifásica (L+V+S₁) del tipo 3. I. IF bifásica (L+V) del tipo 4.

Por las propiedades observadas en cada familia de inclusiones primarias, secundarias y pseudosecundarias se sugieren distintos mecanismos de atrapamiento para cada tipo: 1) atrapamiento heterogéneo a partir de una solución en ebullición y con sólidos suspendidos; 2) atrapamiento heterogéneo desde un fluido monofásico con sólidos en suspensión; 3) atrapamiento heterogéneo a partir de una solución saturada en cloruro sódico, con sólidos suspendidos; 4) atrapamiento homogéneo a partir de un fluido monofásico.

6.1.3 Vetillas de calcita no mineralizadas

Las vetillas están compuestas por calcita de dos generaciones diferenciables por su apariencia limpia y sucia, que constituyen el grueso de las vetillas (calcita sucia) y drusas irregulares (calcita limpia). Para el estudio de inclusiones fluidas se emplearon las presentes en la calcita limpia, por ser de mayor tamaño y más fácilmente distinguibles, encontrándose principalmente inclusiones fluidas primarias y, en mucha menor medida, secundarias y pseudosecundarias.

Las inclusiones fluidas primarias en la calcita limpia son, en su gran mayoría, bifásicas (L+V; *Figura 53*), algunas pocas con cristales atrapados e hijos de halita o un mineral redondeado (L+V+S₁±S₄; *Figura 53C*), de tamaños muy variables (<4-30 μm), formas redondeadas, irregulares, trapezoidales y triangulares, y grados de relleno elevados (0,75-0,9). Localmente, fueron reconocidas asociaciones de inclusiones fluidas bifásicas con grados de relleno cambiantes (V, L+V y V+L; *Figura 53D y F*) relacionadas con inclusiones trifásicas (L+V+S₁; *Figura 53B*). En sectores, se encontraron inclusiones muy irregulares de gran tamaño (>35 μm) relativo a la media, que conservan grados de relleno cercanos a 0,9 y podrían estar asociadas con crecimiento esquelético (¿o en espiral?) de la calcita (*Figura 54A*). En cuanto a modificaciones post-atrapamiento, localmente se observaron evidencias de reequilibrio (inclusiones muy regulares) y aparente estrangulamiento parcial y total (*Figura 54B y C*).

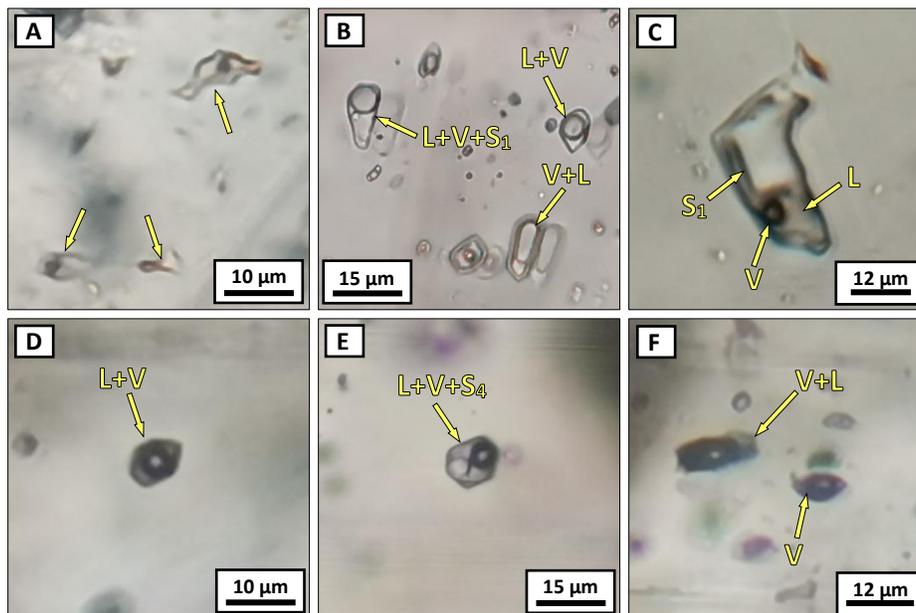


Figura 53. Inclusiones fluidas (IF) primarias en calcita de las vetillas no mineralizadas del evento tardío. A-B. IF primarias bifásicas (L+V) y trifásicas (L+V+S) con grados de relleno variados, dispuestas al azar en los cristales. C. IF con sólido atrapado de gran tamaño (S₁). D-F. Asociación de inclusiones fluidas monofásicas (V), bifásicas (L+V y V+L) y trifásicas (L+V+S), indicativas de ebullición en el medio.

Las propiedades descritas para las inclusiones fluidas primarias en la calcita limpia de las vetillas son indicativas de dos mecanismos de atrapamiento: 1) a partir de un fluido monofásico con sólidos en suspensión, y 2) desde un medio en ebullición con sólidos suspendidos.

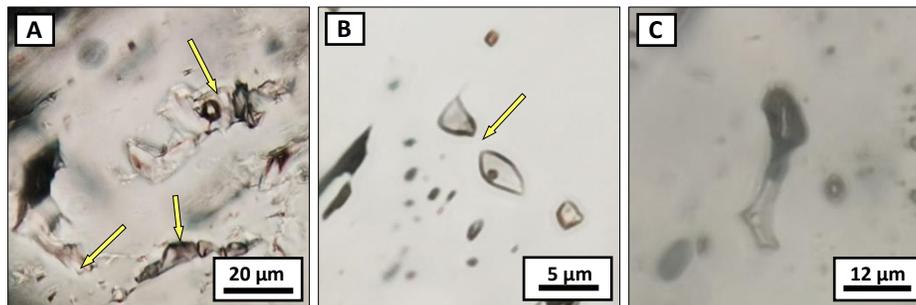


Figura 54. Inclusiones fluidas (IF) primarias en calcita. A. Grandes IF bifásicas (L+V) relacionadas con el crecimiento esquelético del mineral. B y C. IF primarias con indicios de estrangulamiento.

Por su parte, las inclusiones fluidas pseudosecundarias y secundarias son menos frecuentes, y, por lo general, exhiben formas ovaladas, redondeadas y/o regulares, grados de relleno elevados (0,9-0,95), carácter bifásico (L+V) y tamaños inferiores a 10 µm (Figura 55). En ocasiones, las inclusiones pseudosecundarias reflejan las mismas características que las primarias, por lo que se toman como rellenos de fracturas selladas.

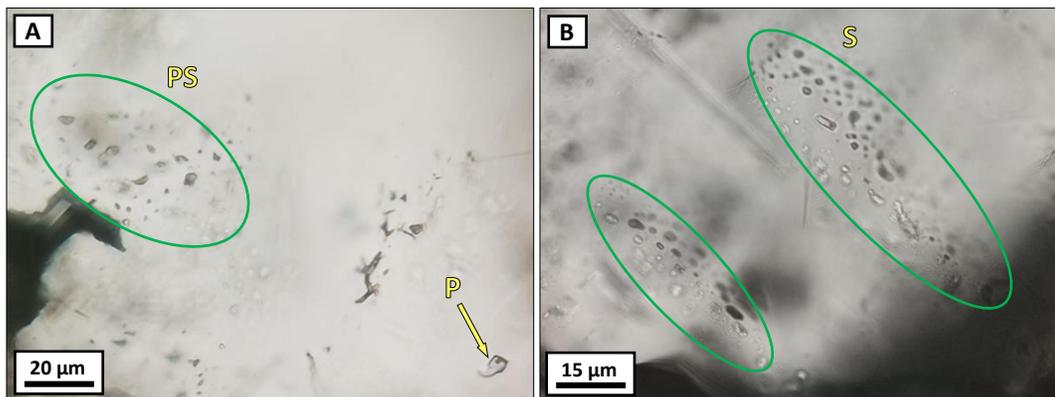


Figura 55. Inclusiones fluidas pseudosecundarias (PS) y secundarias (S) en cristales de calcita del evento tardío. Véase inclusión fluida primaria (P) con forma cuadrada en la parte inferior derecha de la imagen A.

6.1.4 Vena de calcita mineralizada

Las venas mineralizadas son muy escasas en el cuerpo de Santa María y para los estudios de inclusiones fluidas se escogió una vena de calcita con sulfuros de 3 cm de espesor, encajada en un mármol. De allí, se emplearon cristales de calcita de aspecto poco terroso o limpio y sin evidencias de recristalización ni deformación, encontrándose principalmente inclusiones primarias y pseudosecundarias.

Las inclusiones fluidas primarias son las más abundantes en la muestra, y pueden ser bifásicas y trifásicas de dos tipos. Las del tipo 1 son las predominantes, tienen formas rectangulares, cuadradas, cuneiformes y redondeadas, grado de relleno cercano a 0,8, tamaño inferior a 20 µm y puntuales sólidos atrapados traslúcidos y opacos con formas redondeadas y cuadradas (Figura 56A-D). Por su parte, las del tipo 2 presentan formas irregulares y redondeadas, grado de relleno de 0,9, tamaño

menor a 30 μm y sólidos atrapados traslúcidos cuadrados y tabulares de gran tamaño relativo a la inclusión (Figura 56C). En algunos casos, las inclusiones fluidas del primer tipo pueden desarrollar reequilibrio (Figura 56E) y estrangulamiento parcial (Figura 56F), y asociarse con inclusiones ricas en vapor y V+L (Figura 57), muy erráticas y escasas, las cuales a veces se hallan orientadas siguiendo los caminos de las pseudosecundarias.

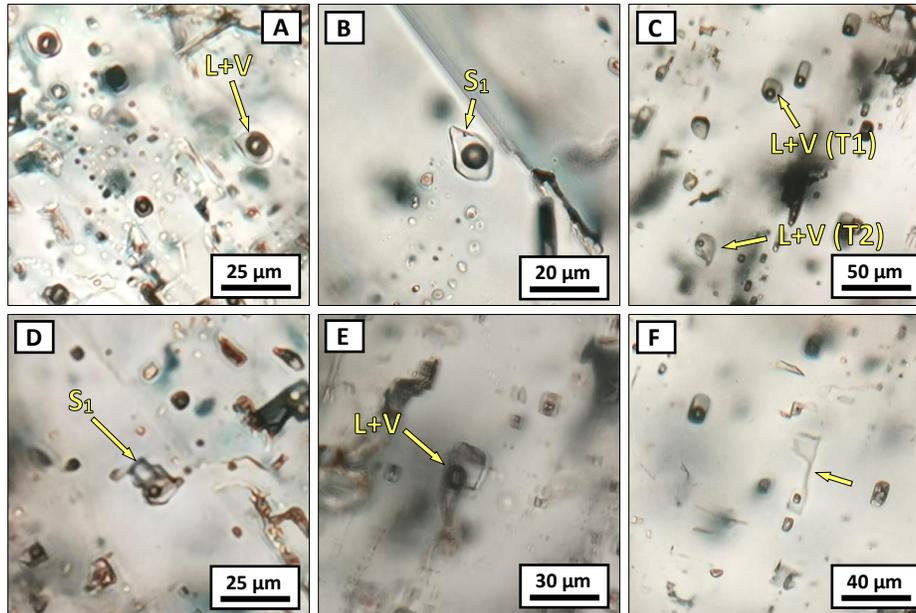


Figura 56. Inclusiones fluidas (IF) primarias características de la vena de calcita mineralizada. A-D. IF bifásicas (L+V) y trifásicas (L+V±S₁±S₂) del tipo 1 y 2 (T1 y T2) en calcita, con grados de relleno de ca. 0,8 a 0,9 y sólidos opacos atrapados (S₂). E. IF primaria con reequilibrio, atrapada en calcita. F. IF primaria con estrangulamiento parcial.

Por otra parte, las inclusiones pseudosecundarias exhiben formas redondeadas y ovaladas, distinguiéndose por seguir caminos que no alcanzan los bordes de los cristales (Figura 57), y sus características son muy similares a las de las primarias del tipo 1 (bifásicas, <10 μm y grado de relleno ca. 0,8). En sectores, las nubes de inclusiones pseudosecundarias se aproximan a los bordes de los cristales, pero conservan sus propiedades, por lo que se clasificaron dentro de este grupo.

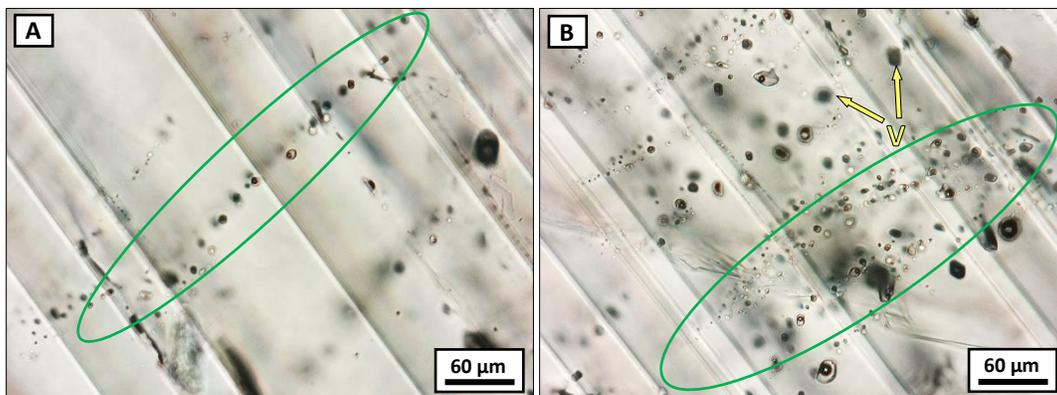


Figura 57. Inclusiones fluidas pseudosecundarias (PS) en calcita de la vena mineralizada, con formas redondeadas y grado de relleno cercano a 0,8. Véanse escasas inclusiones fluidas ricas en vapor (V) ligeramente orientadas.

Teniendo en cuenta las propiedades de las inclusiones estudiadas, se interpreta un atrapamiento heterogéneo a partir de un fluido saturado en solutos con sólidos en suspensión (opacos y traslúcidos), para la gran mayoría de las inclusiones primarias del tipo 1 y 2. Por su parte, las pseudosecundarias y algunas primarias del tipo 1 se atraparon en un medio heterogéneo que experimentaba procesos de ebullición.

6.2 Microtermometría de inclusiones fluidas

Los estudios microtermométricos fueron realizados en las muestras descritas en el apartado 6.1. *Petrografía de Inclusiones Fluidas*, empleando rangos térmicos de -200 °C a 570 °C dada la naturaleza de los fluidos y las condiciones de atrapamiento de las inclusiones. En total fueron estudiadas 570 inclusiones fluidas, hospedadas en minerales de la fase prógrada del sistema (granate: n=12), de la etapa de mineralización principal (calcita: n=28, esfalerita: n=121, cuarzo: n=62, fluorita: n=180) y del vetilleo tardío (calcita: n=167). Los datos se resumen en las *Tabla 2* y 3.

Tabla 2. Datos microtermométricos de las inclusiones fluidas por cada muestra.

Muestra	No. de IFs	Mineral	Etapa	Te (mín/prom/máx)	Tff (mín/prom/máx)	Th (mín/prom/máx)	Salinidad total NaCl+CaCl ₂ (mín/prom/máx)
43-20	12	Grt	Prog.-Retrog.	-98,8/-90,7/ -82,6 °C	-53,2/-33,8/ -23,3 °C	395,9/437,7/450 °C	33/27/22 % en peso
42-1A	12	Cal	Retrog.	-	-35,1/-27,2/ -19,3 °C	313,7/369,3/425 °C	29/27/22 % en peso
42-1A	6	Sp	Retrog.	-112 °C	-	330/400,6/474,3 °C	-
42-1B	2	Qz	Retrog.	-	-95,4/-56,9/-18,4 °C	-	34/21 % en peso
42-1B	8	Sp	Retrog.	-125,6/-95,5/ -70,9 °C	-44,8/-26,2/ -16,3 °C	330/388,3/440 °C	32/25/17 % en peso
42-6	23	Qz	Retrog.	-170/-128,7/ -87,4 °C	-53/-41/-21,8 °C	350/454,5/545,4 °C	34/31/22 % en peso
42-6	1	Sp	Retrog.	-	-	437,6 °C	-
42-9	9	Qz	Retrog.	-150 °C	-62 °C	280/444,8/548 °C	34 % en peso
43-4	14	Qz	Retrog.	-60/-56,7/-50 °C	-44/-29,5/-19 °C	282,2/405,6/450 °C	32/27/22 % en peso
43-4	2	Sp	Retrog.	-122/-118,2/ -114,4 °C	-24,1	400 °C	25 % en peso
43-4	32	Fl	Retrog.	-125/-118,7/ -112,3 °C	-35/-24,1/-8,1 °C	360/405,5/490,2 °C	28/25/15 % en peso
43-7	6	Sp	Retrog.	-	-27/-25,5/ -24,6 °C	402,3/431,5/461,7 °C	26/25 % en peso
43-8	7	Qz	Retrog.	-104,6/-99,7/ -94,8 °C	-79,6/-65,5/ -49,6 °C	272,8/352,8/463,1 °C	33 % en peso
43-8	28	Fl	Retrog.	-147,7/-111,8/ -96,2 °C	-39,4/-22,6/ -17,4 °C	384,2/414,2/484,4 °C	30/22/21 % en peso
43-12	39	Fl	Retrog.	-148,7/-128,9/ -106,8 °C	-45,9/-26,4/ -15,4 °C	280,1/388,7/461,9 °C	32/25/17 % en peso
43-13	23	Fl	Retrog.	-115/-108,9/ -105,5 °C	-17,4/-13,6/ -11 °C	313,1/342,8/385,2 °C	20/18/15 % en peso
43-21	14	Cal	Retrog.	-107,8/-71/-42 °C	-36,9/-21,5/ -12,3 °C	306,1/379,4/466,6 °C	29/22/15 % en peso

43-21	10	Sp	Retrog.	-140/-137,5/ -135 °C	-53,5/-43,2/ -33 °C	368,1/404,3/443,1 °C	33/31/27 % en peso
43-21	23	Fl	Retrog.	-130,1/-119,1/ -94 °C	-35,5/-27,1/ -10,3 °C	374,6/445,1/470 °C	28/25/15 % en peso
58-3	1	Cal	Retrog.	-	-14,5	-	20 % en peso
58-3	20	Fl	Retrog.	-155,3/-133,5/ -111,1 °C	-45,1/-33,7/ -27,2 °C	373,2/408,7/453,7 °C	32/27/25 % en peso
58-7	1	Cal	Retrog.	-	-8,8	326,8	15 % en peso
58-7	48	Sp	Retrog.	-116,7/-103,7/ -95,2 °C	-40,2/-25,4/ -16,1 °C	341,2/396/440,3 °C	31/25/17 % en peso
58-8	37	Sp	Retrog.	-102/-105,9/ -95,1 °C	-40/-25,6/ -14,6 °C	322,7/361,2/382,2 °C	31/25/17 % en peso
71-7	1	Sp	Retrog.	-	-27,4 °C	-	26 % en peso
42-1B	4	Qz	Retrog. tardía	-	-36,7/-22,45/ -15 °C	235,3/243,1/248,7 °C	29/24/18 % en peso
43-8	2	Qz	Retrog. tardía	-100,2 °C	-30,2/-28,9/ -27,6 °C	163,8/182,6/222 °C	27/26/25 % en peso
43-12	5	Fl	Retrog. tardía	-	-32,8/-32,7 °C	222/245/281,6 °C	27 % en peso
58-7	6	Fl	Retrog. tardía	-	-18/-7,6/-2,4 °C	150/162,5/172 °C	22/15 % en peso
42-6	3	Cal	Vet.	-	-29/-21,7/ -14,3 °C	315 °C	28/23/18 % en peso
42-9	1	Cal	Vet.	-	-	570 °C	
43-7	5	Cal	Vet.	-102,9 °C	-22,1/-17,9/ -14,1 °C	272,4/291,6/319,2 °C	23/21/17 % en peso
43-9	43	Cal	Vet.	-154,1/-107,2/ -95 °C	-65,8/-29/ -14,3 °C	319/370,1/423,9 °C	27/26/17 % en peso
43-17	74	Cal	Vet.	-122,4/-117,8/ -110,5 °C	-67,1/-43,7/ -23,7 °C	245,4/383/529,2 °C	32/24 % en peso
43-19	11	Cal	Vet.	-130,7/-114/ -86,6 °C	-33,9/-14,5/0 °C	396,5/462,8/505,9 °C	28/18 % en peso
43-20	27	Cal	Vet.	-114,1/-109,9/ -105,7 °C	-50/-28,2/-10 °C	245/344,1/538,2 °C	33/26/15 % en peso

Sistema químico dominante: $H_2O-CaCl_2-NaCl-CH_4$

Abreviaturas: Cal (calcita), Fl (fluorita), Grt (granate), Prog. (etapa prógrada), Qz (cuarzo), Retrog. (etapa retrógrada), Sp (esfalerita).

Tabla 3. Datos microtermométricos de las asociaciones de inclusiones fluidas.

Mineral	Tipo	Et.	Te (mín/prom/máx)	Tff (mín/prom/máx)	Th (mín/prom/máx)	Salinidad total NaCl+CaCl ₂ (mín/prom/máx)	n
Grt	P: L+V	4	-98,8/-90,7/ -82,6 °C	-53,2/-33,8/ -23,3 °C	395,9/437,7/450 °C	33/27/22 % en peso	12
Sp	P: L+V± S ₁ ±S ₂	4	-140/-107,7/ 70,9 °C	-53,6/-27,3/-14,6 °C	322,7/388,7/474,3 °C	33/27/16 % en peso	119
Fl	P-S-PS: L+ V±S ₁	4	-155,3/-122,2/ 94 °C	-45,9/-23,4/-8,1 °C	280,1/400,1/490,2 °C	31/22/14 % en peso	165
Qz	P: L+V, L+V±S ₁	4	-170/-97,1/-50 °C	-95,4/-44,8/-18,4 °C	272,8/412,8/548 °C	31/21 % en peso	55

Cal	P: L+V	4	-107,8/-71/-42 °C	-36,9/-21,9/-8,8 °C	306,1/371,9/466,6 °C	29/22/15 % en peso	28
Qz	S: L+V	4	-100,2 °C	-35,7/-24,6/-15 °C	163,8/200/281,6 °C	28/23/16 % en peso	6
Fl	S: L+V, L+V±S ₁	4	-	-32,8/-13,9/-2,4 °C	150/200/281,6 °C	27/15 % en peso	11
Cal	P: L+V, L+V±S ₁	V	-154,1/-110,7/-86,6 °C	-67,1/-34,0/0 °C	245/377,6/570 °C	35/27 % en peso	164

Et. 4: estadio mineralizante principal, Et. V: vetilleo tardío, P: Inclusión fluida (IF) primaria, S: IF secundaria, PS: IF pseudosecundaria, L: fase líquida, V: fase vapor, S₁: halita, S₂: mineral opaco.

En términos generales, las inclusiones fluidas estudiadas exhiben comportamientos similares durante el proceso de enfriamiento, por lo que se estableció el sistema químico dominante H₂O-CaCl₂-NaCl-CH₄, a partir del cual se estimaron condiciones de salinidad, densidad y proporciones molares de los diferentes componentes. El cálculo de estas propiedades se realizó con ayuda del software BULK, incluido dentro del paquete FLUIDS (Bakker, 2003), empleando el modelo de interacción iónica propuesto por Bakker (1999).

Las salmueras más comunes en los sistemas geológicos representan mezclas dentro del sistema H₂O±NaCl±CaCl₂±KCl±MgCl₂±FeCl₂±FeCl₃, y dependiendo de la cantidad y proporción de los solutos disueltos en la solución se produce una depresión directamente proporcional de la temperatura eutéctica (Te) hasta alcanzar valores cercanos a -64,5 °C (Steele-McInnis *et al.*, 2016). Por tanto, la Te permite realizar un acercamiento al sistema químico dominante dentro de las inclusiones fluidas.

Mediante ensayos a baja temperatura en inclusiones fluidas de la etapa 4 y el vetilleo tardío se obtuvieron valores de Te de -40 a -180 °C, con un máximo de frecuencia entre -90 y -130 °C, indicando la existencia de compuestos adicionales a los solutos (ej., NaCl y CaCl₂) que deprimen la Te al aumentar su proporción (ej., CH₄; Figura 58A). Con ayuda de análisis de infrarrojo ATR, se identificaron bandas en 2960 y 2870 cm⁻¹ correspondientes a la vibración del estiramiento asimétrico y simétrico del enlace C-H, y bandas de 1460 y 1380 cm⁻¹ ligadas a la torsión asimétrica y simétrica de las vibraciones del enlace H-H del grupo metileno (Figura 59). Esto sumando a la ausencia de bandas típicas de enlaces -CH₂, permite establecer que el compuesto presente en estas inclusiones fluidas es metano y no otro hidrocarburo más complejo.

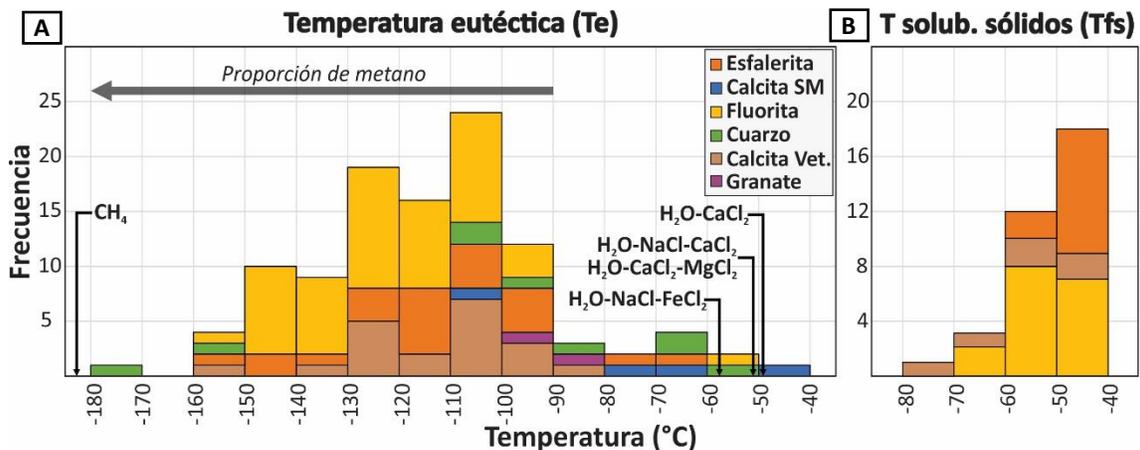


Figura 58. Histogramas de Te y Tfs de las inclusiones fluidas de cada etapa. Las líneas negras representan las Te de sistemas dominados por cloruros de NaCl, CaCl₂, MgCl₂ y/o FeCl₂, y el punto de fusión del metano (CH₄).

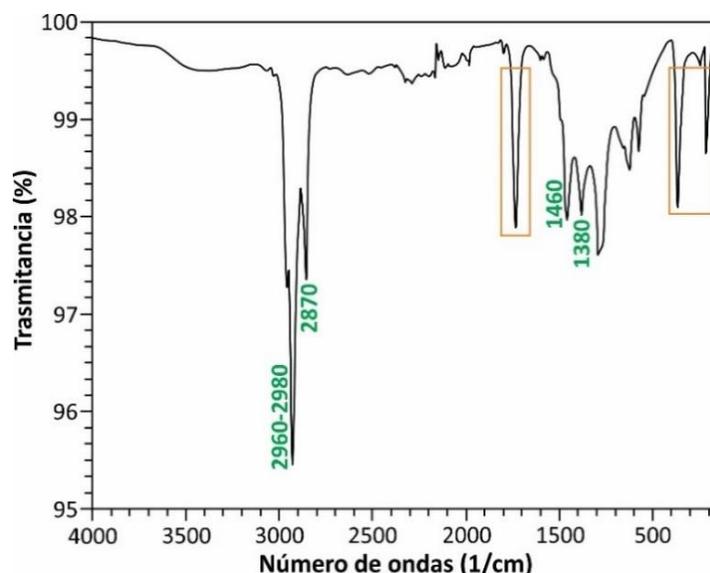


Figura 59. Espectro de infrarrojo mostrando absorción en bandas típicamente asociadas con compuestos del grupo metileno. Los cuadros de color naranja representan los valles distintivos de calcita (vibración de estiramiento del enlace C=O en 1700 cm^{-1}).

Durante el descenso de temperatura hasta $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, se observó la formación de cristales muy finos de minerales anhedrales (hidrohalita y antarticitita), distinguibles por su alto relieve con respecto a los grandes cristales redondeados de hielo y a los bordes de la inclusión fluida. Además, muy esporádicamente, algunas inclusiones fluidas exhiben cristales hijos de halita. De acuerdo con Steele-McInnis *et al.* (2016), en los sistemas dominados por $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ la fusión de hidrohalita ocurre a $-21,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 23 % en peso de NaCl, en el sistema $\text{H}_2\text{O-CaCl}_2$, la fusión de antarticitita tiene lugar a $-49,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 30,8 % en peso de CaCl_2 y el sistema ternario tiene un punto eutéctico cercano a $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por tanto, con ayuda de la temperatura de fusión de los sólidos formados a condiciones criogénicas se pueden establecer las proporciones entre los solutos disueltos en la solución.

La temperatura de fusión de los sólidos (Tfs) en las inclusiones de la etapa 4 y el vetilleo tardío ocurre entre -40 y $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 58B), con una mayor frecuencia de -40 a $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, indicando posiblemente que estos sólidos son hidrohalita y antarticitita y que el sistema está dominado por cloruro de Ca con una relación $\text{CaCl}_2:\text{NaCl}$ cercana a 0,95:0,05. El cálculo de esta proporción se realizó con la fórmula $y=(a+bx)^{-1/c}$, donde y es la fracción de NaCl, x es la T de fusión de la hidrohalita ($T_{\text{ffh}}\approx T_{\text{fs}}$), y a , b y c son constantes establecidas por Chi y Ni (2007). De acuerdo Chu *et al.* (2016), el sistema de $\text{H}_2\text{O-CaCl}_2\text{-NaCl}$ se caracteriza por mostrar normalmente comportamientos metaestables, lo que podría explicar las variaciones amplias en los datos de Tfs y Te. No obstante, las temperaturas de fusión de los sólidos inferiores a la eutéctica del sistema $\text{H}_2\text{O-CaCl}_2\text{-NaCl}$ ($-51\text{ }^{\circ}\text{C}$), podrían indicar la existencia de otros solutos (ej., MgCl_2 , FeCl_2 , FeCl_3 , etc.; Figura 58A; Xu, 2000; Steele-McInnis *et al.*, 2016).

En la Figura 60 se proyectan los promedios de las proporciones de NaCl y CaCl_2 obtenidas en cada mineral, tipología de inclusión fluida (primaria, secundaria o pseudosecundaria) y estadio de mineralización, en el triángulo composicional $\text{H}_2\text{O-CaCl}_2\text{-NaCl}$, donde se observa un incremento en CaCl_2 acompañado por un aumento en la cantidad de agua, a NaCl constante. Tal comportamiento puede atribuirse a procesos de dilución por parte de aguas menos cargadas en solutos. Asimismo, en el recuadro de la izquierda (Figura 60) se presenta la trayectoria general de fusión de estas inclusiones fluidas, en las que se produce la fusión congruente de los sólidos (hidrohalita-antarticitita) muy cerca del punto eutéctico ternario (estrella roja; Davis *et al.*, 1990; Steele-McInnis *et al.*, 2016).

Esta trayectoria evoluciona a lo largo de la línea definida entre la composición del sistema y el compuesto dominante (H₂O).

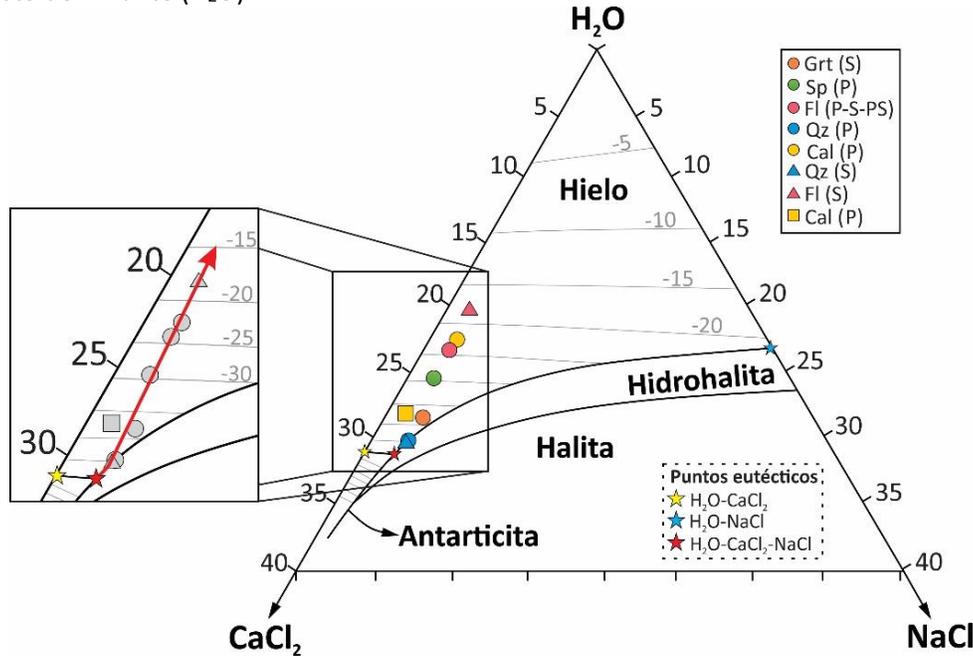


Figura 60. Diagrama de fase del sistema H₂O-CaCl₂-NaCl mostrando la composición de los fluidos en las inclusiones de las diferentes etapas y su trayectoria general de fusión. Véase la distribución de los datos a lo largo de una línea con variaciones ligeras en el contenido de NaCl y muy marcadas en el de CaCl₂-H₂O, evidenciando procesos de dilución. Tomado de Steele-McInnis et al. (2016). Líneas grises: isotermas.

La distribución de los datos de temperatura de homogenización y de salinidad total (% en peso CaCl₂+NaCl) se presentan en la Figura 61. En general, las muestras se pueden agrupar en tres conjuntos que denotan comportamientos microtermométricos diferentes: 1) inclusiones fluidas primarias, secundarias y pseudosecundarias relacionadas con la etapa 4 o de mineralización principal (círculos); 2) inclusiones fluidas secundarias dentro de los minerales de la etapa 4 (triángulos); 3) inclusiones fluidas asociadas con las vetillas de calcita mineralizadas (cuadrados).

A pesar de que los datos microtermométricos conforman nubes limitadas a rangos particulares de temperatura de homogenización y salinidad, los tres tipos de inclusiones fluidas definidos anteriormente muestran trayectorias de evolución con tendencias aproximadamente lineales, dirigidas hacia la zona de baja salinidad y temperatura del diagrama (flechas azules en Figura 61). Este comportamiento es congruente con procesos de dilución de los fluidos mineralizantes a intermedia (etapa 4 y vetillo tardío) y baja temperatura (inclusiones fluidas secundarias), por interacción con aguas de otras fuentes con menor concentración en solutos (Wilkinson, 2001). Del mismo modo, la ocurrencia de muestras con valores de salinidad constante y temperatura variable en la etapa 4 (flecha morada en Figura 61), indica que el enfriamiento conductivo también fue un mecanismo dominante que desencadenó la precipitación de los minerales.

En contraste, un grupo de inclusiones fluidas pertenecientes a la etapa de vetilleo tardío definen una tendencia hacia valores de alta salinidad y baja temperatura (flecha naranja en Figura 61), la cual se produce por ebullición y formación de falsas salmueras. Estas inclusiones fluidas pertenecen a asociaciones en la que se distinguen inclusiones con grados de rellenos muy variables y cristales hijos, que sugiere también la ocurrencia de ebullición.

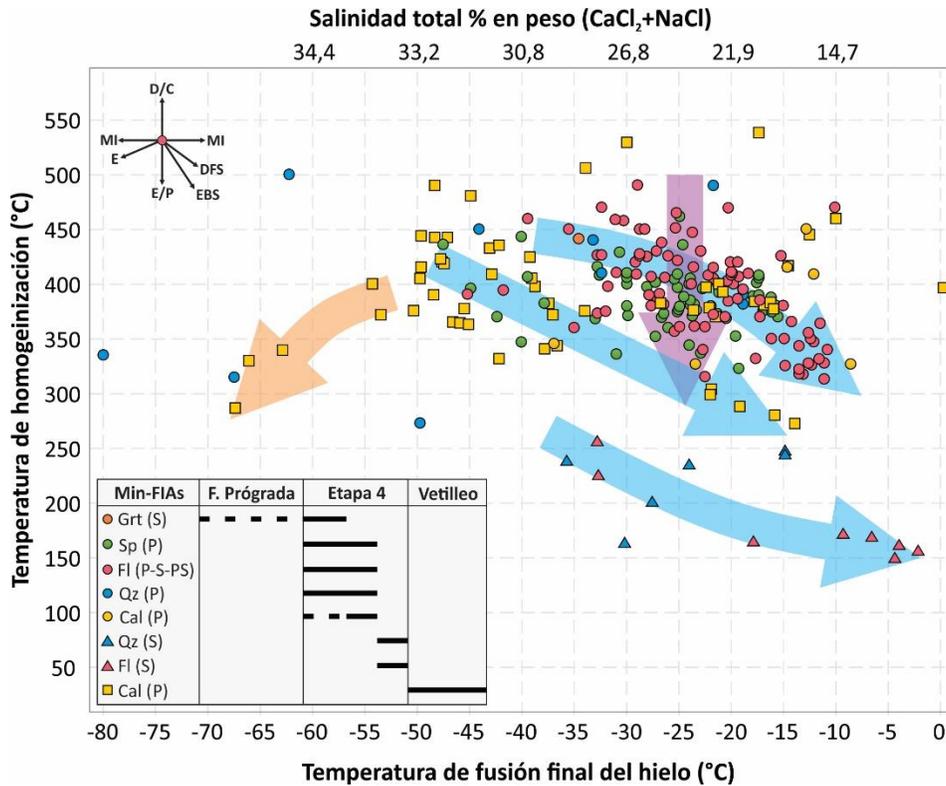


Figura 61. Diagrama de Th vs Tff-Salinidad total, con trayectorias de evolución del fluido y temporalidad de las asociaciones de inclusiones fluidas. Las flechas azules indican procesos de dilución, la morada enfriamiento conductivo y la naranja ebullición (falsas salmueras). Diagrama de Wilkinson (2001) presentado en la parte superior izquierda, donde D: despresurización, C: calentamiento, MI: mezcla isotérmica, DFS: dilución por fluidos superficiales, EBS: ebullición a baja salinidad, E: enfriamiento, P: profundización.

6.2.1 Etapa prógrada

Las inclusiones fluidas medidas en granate pertenecen a dos familias: 1) primarias bifásicas y 2) secundarias bifásicas. Las primeras son muy erráticas y de tamaño fino, dificultando en gran medida la observación de los cambios de fase, especialmente a bajas temperaturas. Durante el calentamiento, las inclusiones no evidencian variaciones en la proporción de L:V, incluso a 600 °C, por lo que sus temperaturas de entrapamiento deben ser superiores a este valor. Por su parte, las inclusiones fluidas secundarias muestran, en promedio, Te de -98,8 °C, Tff de -23,3 °C y Th en el rango 395-450 °C (Figura 62). Tales Th, Tff y Te son correlacionables con aquellas obtenidas para la etapa 4 o de mineralización metálica.

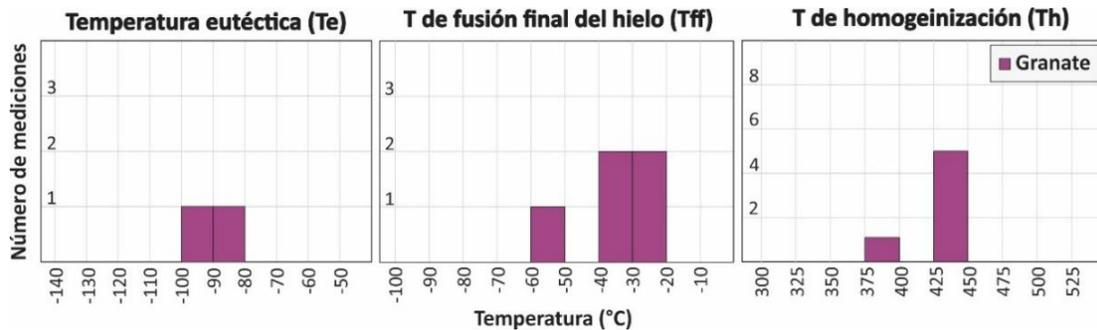


Figura 62. Histogramas para valores de Te, Tff y Th de inclusiones fluidas secundarias en granate.

6.2.2 Evento de mineralización principal (etapa 4)

Del estadio de mineralización principal se estudiaron inclusiones fluidas primarias en esfalerita, cuarzo, calcita y fluorita, e inclusiones fluidas secundarias y pseudosecundarias en fluorita y cuarzo. En términos generales, las inclusiones primarias exhiben T_e de -100 a -150 °C, T_{ff} de -20 a -50, T_h de -56,6 a -40 °C y T_h de 250-500 °C (Figura 63), coherentes con el sistema químico $H_2O-CaCl-NaCl-CH_4$ y con las temperaturas de cristalización típicas encontradas en las fases retrógradas de los sistema tipo skarn (Megaw *et al.*, 1988). En algunas asociaciones de inclusiones fluidas hospedadas en cuarzo de rocas ígneas mineralizadas se evidencia un proceso de ebullición, ocasionando tal dispersión en los datos de T_e , T_{ff} y T_h , similar a lo observado en la calcita de las vetillas tardías.

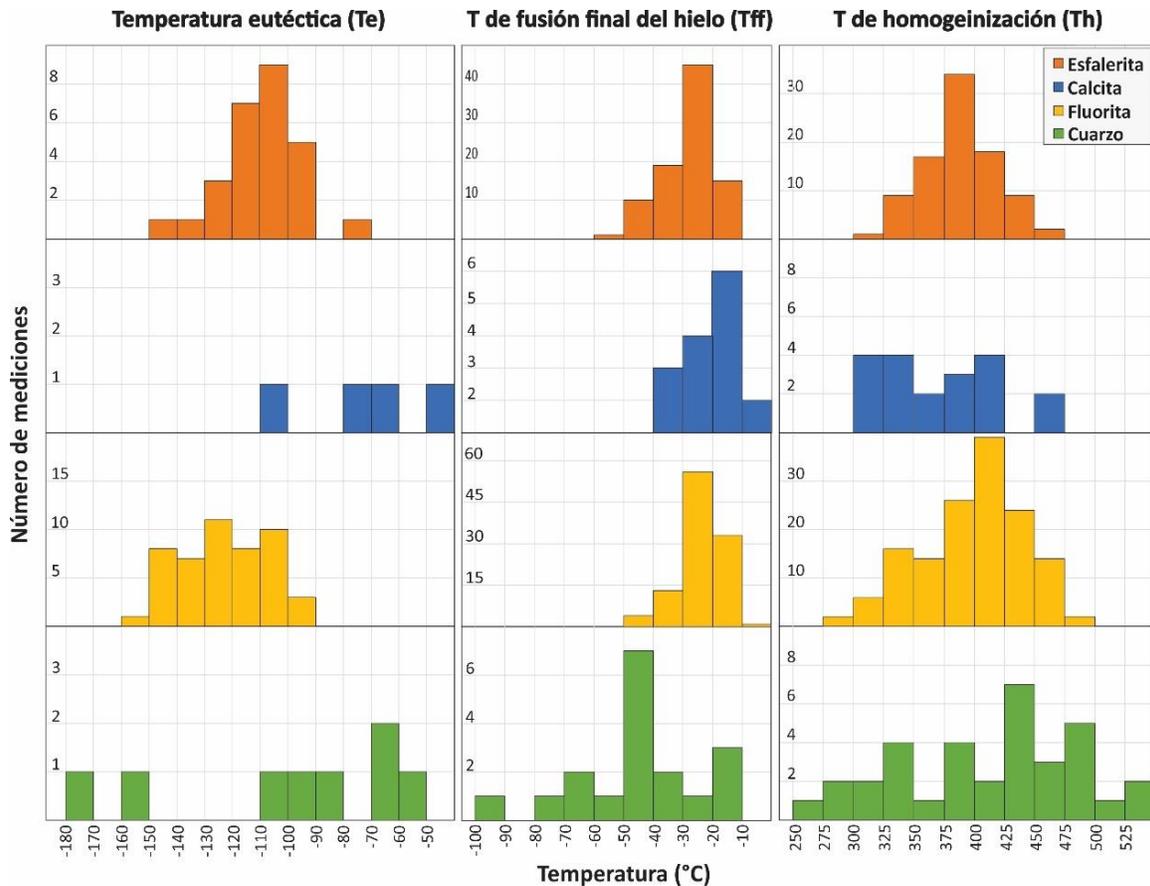


Figura 63. Histogramas para valores de T_e , T_{ff} y T_h de las inclusiones fluidas en esfalerita, calcita, fluorita y cuarzo del evento mineralizante principal (etapa 4).

En algunos cristales de esfalerita (Figura 64) y fluorita (Figura 65) fueron halladas inclusiones fluidas cuyo tamaño supera los 20 μm , facilitando así la observación de los cambios de fase a lo largo de las trayectorias de cristalización y fusión. Durante el congelamiento de las inclusiones se encontraron temperaturas de solidificación total cercanas a -100 °C, aunque en muchos casos el sistema no alcanzaba el *solidus*, como es típico en los sistemas de $H_2O-NaCl-CaCl_2$ (Chu *et al.*, 2016), especialmente al presentar cantidades variables de metano, cuyo punto de fusión es de -182 °C. Los sólidos presentes en condiciones criogénicas, inferiores a la temperatura eutéctica del sistema, son hielo e hidrohilita-antartíctica.

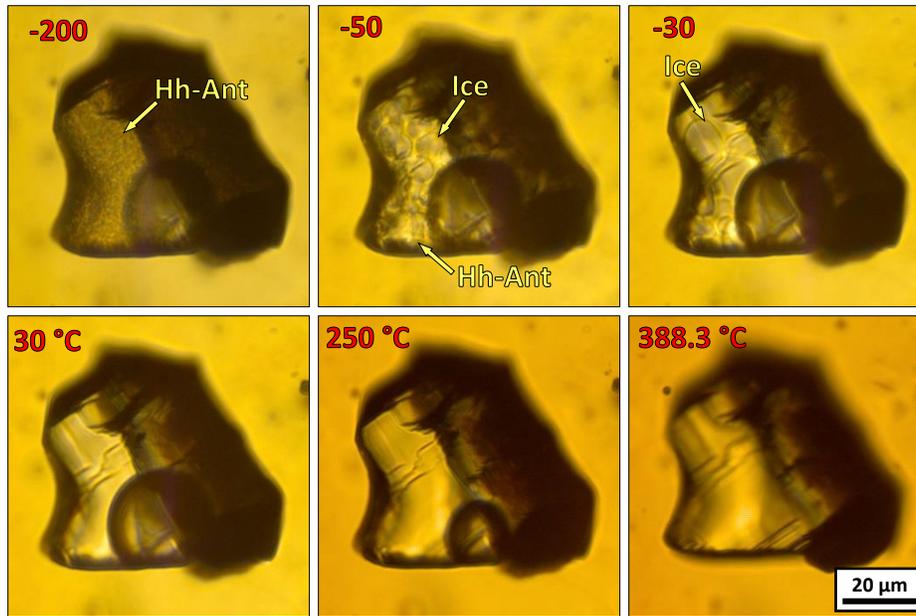


Figura 64. Trayectoria de fusión y homogenización de las inclusiones fluidas primarias en esfalerita. Nótese cristalización de hidrohalita (Hh), antartícita (Ant) y hielo (Ice) a bajas temperaturas.

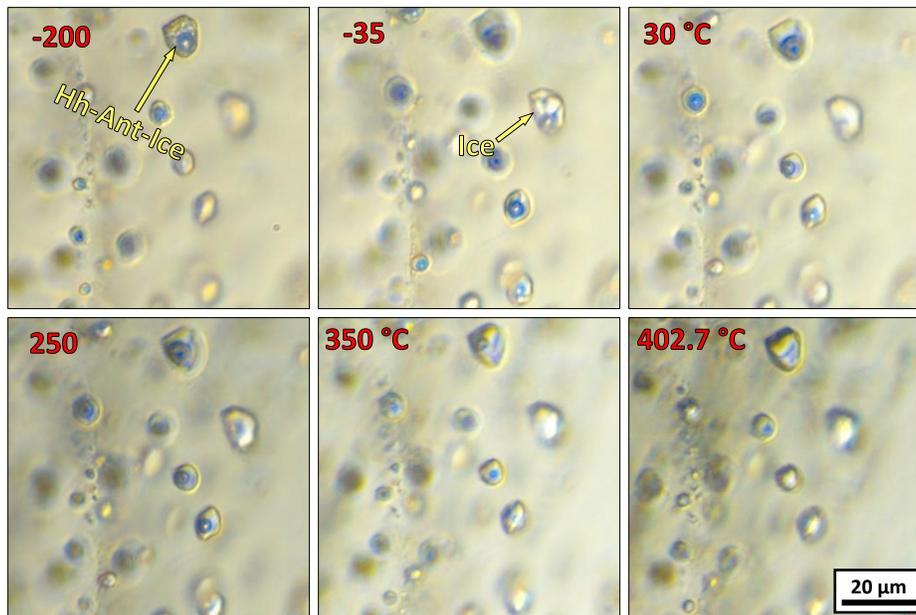


Figura 65. Trayectoria de fusión y homogenización de las inclusiones fluidas secundarias en la fluorita asociadas con el evento mineralizante principal.

Posteriormente, al incrementar paulatinamente la temperatura del sistema a una tasa de 5 a 10 °C/min, se aprecian los primeros cambios de fase entre -90 y -120 °C, oscurecidos en algunos casos por el tamaño limitado de algunas inclusiones fluidas. Tales cambios responden a la primera fusión (punto eutéctico), que genera escasas cantidades de líquido intersticial entre los pequeños cristales de hielo, hidrohálita y antartícita. Conforme incrementa la temperatura, se aprecia un aumento en la proporción entre hielo y antartícita-hidrohalita, hasta consumirse congruentemente ambos cloruros cerca de los -50 °C y, eventualmente, el hielo entre -20 y -40 °C. A partir de allí, el sistema

sobrepasa la superficie del *liquidus* y, previo a la homogenización a líquido de la inclusión entre 350 y 450 °C, no aparecen más cambios de fase.

La gran mayoría de las inclusiones fluidas secundarias en fluorita exhiben valores de Te de -90 a -150 °C, Tff de -10 a -50 °C y Th de 275 a 500 °C, y siguen la misma trayectoria de fusión que las inclusiones fluidas primarias de la etapa 4, por lo que su formación se interpreta como contemporánea a ligeramente tardía con respecto ésta, pero a partir del mismo fluido. En contraste, fueron halladas inclusiones secundarias en fluorita y cuarzo que registran temperaturas de homogenización cercanas e inferiores a los 250 °C y de fusión final del hielo de 0 a -40 °C (Figura 66). Por el tamaño de estas inclusiones (<10 µm), la observación de sus cambios de fase a lo largo del calentamiento y enfriamiento se estableció con base en los movimientos súbitos de la burbuja a diferentes temperaturas. Solo en algunas de estas inclusiones secundarias se encontraron puntos eutécticos cercanos a -100 °C, por lo que se infiere el mismo sistema químico de la etapa 4 (H₂O-CaCl-NaCl-CH₄), posiblemente con mayores cantidades de NaCl por la presencia más recurrente de cristales hijos de halita. La temperatura de solubilización de la halita no es constante, variando entre 192,4 y 316 °C, criterio que podría indicar que los sólidos (o parte de ellos) son atrapados.

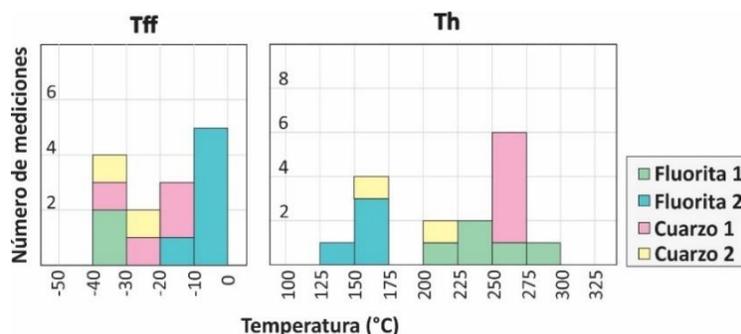


Figura 66. Histogramas para valores de Tff y Th de asociaciones de inclusiones fluidas secundarias en cuarzo y fluorita.

6.2.3 Vetillas y venas de calcita tardías

Las inclusiones fluidas estudiadas en las venas de calcita tardías son de carácter primario y muestran valores promedio de Te de -90 a -130 °C, de Tfs de -40 a -60 °C, de Tff -10 a -50 y de Th en un intervalo muy amplio (250-550 °C; Figura 67), indicando el mismo sistema químico descrito para las otras asociaciones (H₂O-CaCl-NaCl-CH₄). Cabe mencionar que petrográficamente fueron observadas evidencias de ebullición, como la variación local en el grado de relleno de las inclusiones bifásicas y trifásicas en una misma asociación de inclusiones fluidas. Este proceso fue corroborado por la tendencia hacia alta salinidad y baja temperatura identificada en el diagrama de salinidad total vs Th (Figura 61).

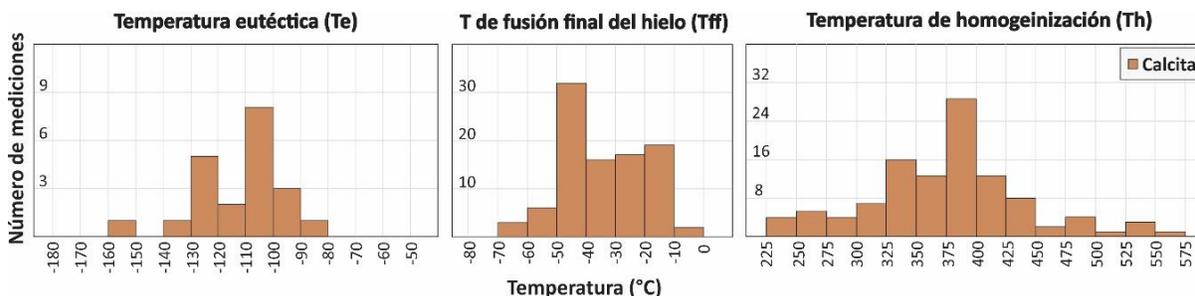


Figura 67. Histogramas para valores de Te, Tff y Th de inclusiones fluidas en venas de calcita mineralizadas.

En general, pudieron reconocerse tres comportamientos en las inclusiones fluidas primarias de las venas tardías de calcita. El primero comprende inclusiones ricas en vapor, que no exhiben cambios mayores durante los ensayos de alta o baja temperatura. El segundo tipo está conformado por inclusiones con grados de relleno de $<0,75$ a $0,8$, que al descender la temperatura hasta -200 °C evidencian un comportamiento metaestable (o mayores contenidos en metano), impidiendo su congelación total y, con ello, la observación de los cambios de fase para establecer su química. Del mismo modo, al calentarlas hasta 600 °C no homogenizan ni a líquido ni a vapor, lo que podría deberse al hecho de que estas inclusiones atraparon cantidades variables de vapor durante su formación en un medio heterogéneo en ebullición. Las trayectorias de cristalización y fusión observadas en estas inclusiones son similares a las ya descritas para aquellas representativas de la etapa de mineralización principal.

El último tipo de inclusiones tiene grados de relleno más elevados y sigue un comportamiento más definido durante los procesos de enfriamiento y calentamiento (*Figura 68*). Inicialmente, a temperaturas muy bajas (-200 °C), muestran congelamientos completos y cerca de los -120 a -100 °C inician los cambios de fase, muchas veces difíciles de observar por el tamaño de las inclusiones. Asimismo, fueron registrados puntos de fusión de hidrohálita y antartícita cercanos a -55 °C, es decir ligeramente por debajo del punto eutéctico del sistema ternario, indicando la posible existencia de otros compuestos en solución. La temperatura de fusión final del hielo en estas inclusiones es muy variable, pero su máximo de frecuencia está entre -40 y -50 °C, indicando salinidades normalmente superiores a las halladas en las inclusiones características de la etapa 4 (*Figura 61*). Seguidamente, al calentar las inclusiones se alcanza la homogenización a temperaturas muy variables, inversamente proporcionales al grado de relleno. No obstante, la mayoría de los datos de Th se disponen en el rango 250 - 500 °C, que es similar al descrito para las inclusiones fluidas de fluorita, esfalerita, calcita y cuarzo de la etapa de mineralización principal.

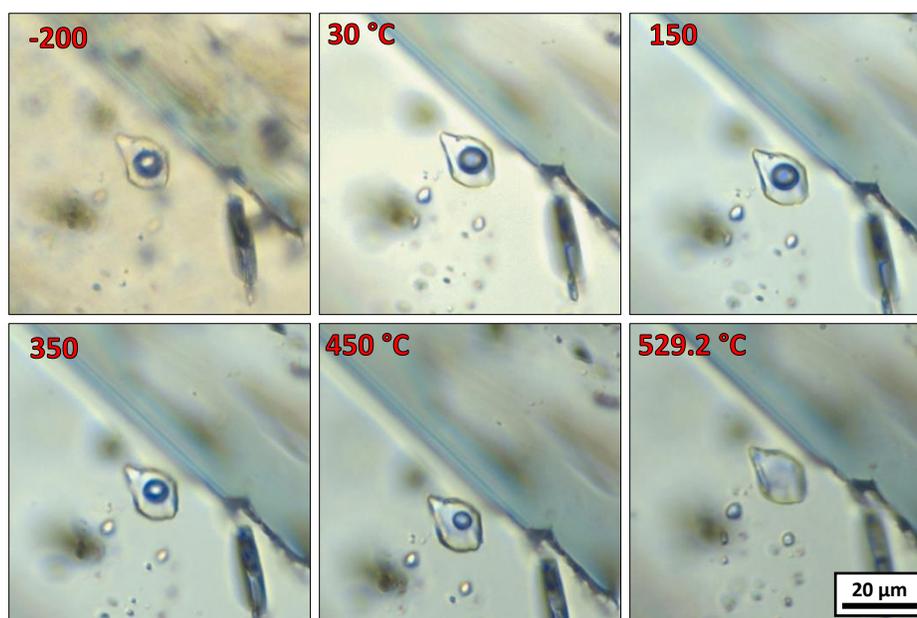


Figura 68. Trayectoria de fusión y homogenización de las inclusiones primarias de las venas de calcita tardías.

7 ESTUDIOS ISOTÓPICOS

7.1 Isótopos estables de carbono y oxígeno en calcita

Fueron analizadas muestras de calcita proveniente de venas, vetillas, rellenos y roca caja de distintos sectores del depósito, representativas de las diferentes litologías (brechas hidráulicas, rocas ígneas, exoskarns, sulfuros masivos, calizas y mármoles). Los resultados son presentados en la *Figura 69* y los datos están disponibles en el *Anexo 12.2*.

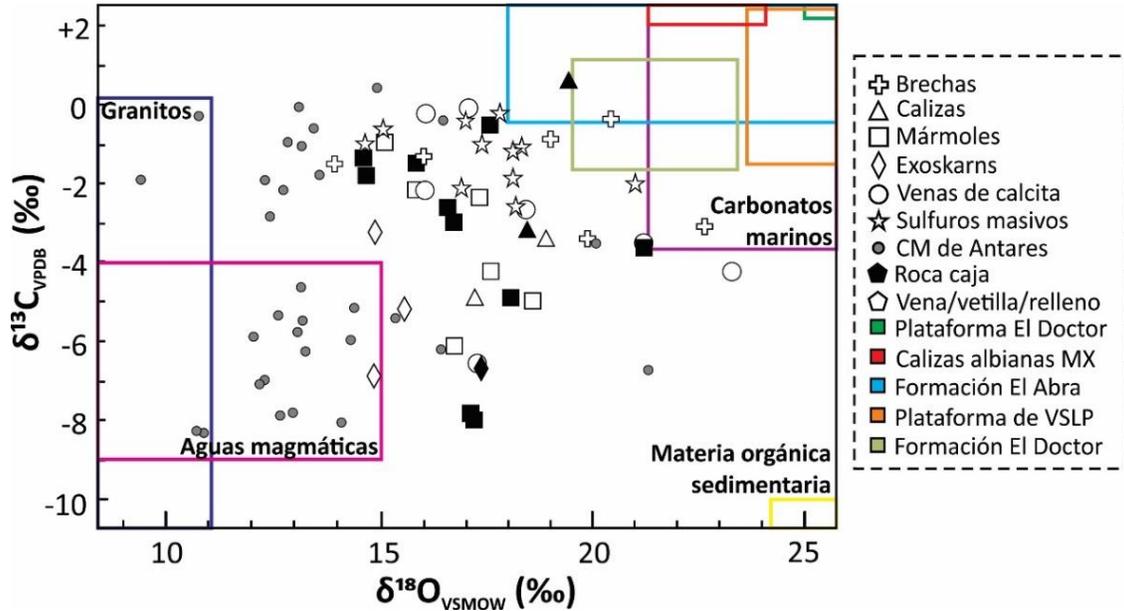


Figura 69. Diagrama $\delta^{18}O_{SMOW}$ vs $\delta^{13}C_{VPDB}$ para las muestras de calcita proveniente de vetillas y rocas caja de las distintas litologías del cuerpo mineralizado de Santa María. Para el análisis de los datos obtenidos se emplearon los valores de $\delta^{18}O_{SMOW}$ y $\delta^{13}C_{VPDB}$ para aguas magmáticas, carbonatos marinos y materia orgánica sedimentaria reportados por Sheppard (1984), Zheng y Hoefs (1993), Veizer et al. (1999) y Hoefs (2009), y para unidades carbonatadas del Albiano-Cenomaniano, correlacionables con las unidades Cuesta del Cura y Aurora, como las formaciones El Abra (Armstrong-Altrin et al., 2011), El Doctor (Levresse et al., 2003; Fitz-Díaz et al., 2011) y Tepalcatepec (Zürcher et al., 2001). Asimismo, fueron incluidos los datos del cuerpo mineralizado de Antares (González-Ambrocio, en preparación) y de las rocas carbonatadas de la Plataforma de Valles-San Luis Potosí (Fitz-Díaz et al., 2011), con fines netamente comparativos.

En los diagramas de O_{SMOW} y C_{VPDB} las rocas calcáreas se distinguen por sus altos valores de O_{SMOW} y C_{VPDB} comparados con los fluidos de origen ígneo, donde se aprecia un comportamiento inverso. En la *Figura 69* se observa que las muestras de calcita procedentes de los tipos de roca que componen el cuerpo de Santa María ocupan un intervalo amplio ubicado entre los campos de aguas magmáticas y rocas carbonatadas, el cual se especifica a continuación:

- *Exoskarns*: tienen valores de $\delta^{18}O_{SMOW}$ de 14,81 a 18,08‰ y de $\delta^{13}C_{VPDB}$ de -6,87 a -3,25‰, y están empobrecidas con respecto a las calizas, mármoles, venas, brechas y sulfuros masivos. Asimismo, esta litología exhibe la afinidad más clara con los fluidos magmáticos (*Figura 69*). Cabe destacar que las muestras con signatura magmática son mucho más abundantes en Antares, donde hay un mayor desarrollo de exoskarns y endoskarns (González-Ambrocio, en preparación).

- *Mármoles*: presentan variaciones muy amplias en sus valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (14,56 a 21,26‰) y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ (-7,99 a -0,93‰), definiendo una franja entre las fuentes magmáticas y carbonatadas (*Figura 69*). Este patrón de distribución puede responder la combinación de dos procesos principales: recristalización estática y metasomatismo.

- *Sulfuros masivos*: las muestras de calcita analizadas provienen exclusivamente de estructuras vetiformes (venas y vetillas) y muestran valores restringidos de $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (14,61 a 21,05‰) y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ (-2,57 a -0,2‰), próximos a las firmas de carbonatos marinos. Este patrón es coherente con la presencia de fluidos con fuentes combinadas entre magmática y de carbonatos marinos (*Figura 69*).

- *Brechas hidráulicas*: la calcita obtenida de estas rocas proviene de la matriz, normalmente lechosa y con textura masiva. Las firmas isotópicas de estas rocas muestran valores amplios de $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (13,87 a 22,71‰) y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ (-3,38 a -0,34‰), similares a las firmas observadas en los mármoles, sulfuros masivos y calizas (*Figura 69*).

- *Venas en rocas ígneas*: como se aprecia en la *Figura 69*, estas muestras definen un intervalo composicional muy amplio de $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (16,03 a 23,28‰) y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ (-6,48 a 0,06‰), procedentes de: 1) calcita tomada de vetillas encajadas en rocas ígneas tonalíticas con alteración potásica, es decir, relacionadas con asociaciones de la etapa prógrada y caracterizadas por su gran influencia magmática, similar a los exoskarns ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$: 17,23‰ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$: -6,48‰); y 2) calcita de vetillas que cortan a las rocas ígneas con alteración masiva de adularia-cuarzo-calcita±fluorita±sulfuros±sericita (etapa 4, coetánea con la fase retrógrada de los skarns), y sus firmas son similares a las de los sulfuros masivos y algunos mármoles ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$: 16,03 a 23,08‰ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$: -5,17 a -0,06‰).

- *Rocas carbonatadas*: la calcita proveniente de las calizas menos alteradas puede agruparse en dos conjuntos: 1) clastos de caliza en una brecha hidráulica ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$: 19,46 y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$: 0,65), que muestra firmas muy similares a las reportadas para las unidades calcáreas El Abra y El Doctor; y 2) wackestones con recristalización moderada, fuerte vetilleo de calcita y desarrollo de mineralizaciones semi-masivas y diseminadas ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$: 17,22 a 18,92 y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$: -4,93 a -3,21; *Figura 15*), que exhiben firmas parecidas a las de un mármol o un sulfuro masivo (*Figura 69*).

7.2 Isótopos estables de azufre en sulfuros

Para los estudios de isótopos estables de azufre fueron estudiados cristales individuales de piritita, esfalerita, arsenopiritita, pirrotina y marcasita provenientes de los cuerpos masivos de sulfuros, de las venas y vetillas mineralizadas, de rellenos en rocas ígneas con alteración pervasiva de adularia-cuarzo-sericita y de estructuras en los exoskarns. Los resultados obtenidos se muestran en la *Figura 70* y en el *Anexo 12.2*.

Sakai (1968), Ohmoto (1972) y Rye y Ohmoto (1974) indicaron que el fraccionamiento isotópico del azufre entre un sulfuro y el fluido formador depende en gran medida de variables como temperatura, pH y fugacidad de oxígeno, factores que pueden modificar los valores hasta en $\pm 20\%$. Por tal motivo, es necesario estimar estas condiciones previo a la integración de los datos, para evitar interpretaciones poco acertadas.

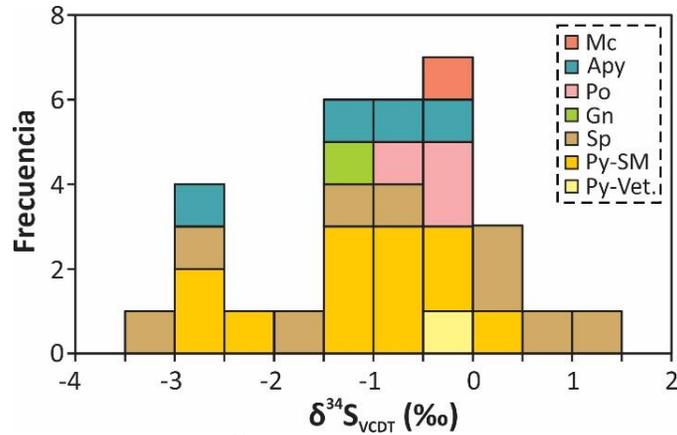


Figura 70. Histograma con los valores de $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ para los sulfuros del cuerpo mineralizado de Santa María. SM: sulfuro masivo, Vet.: venas, CM: cuerpo mineralizado, Mc: marcasita, Apy: arsenopirita, Po: pirrotina, Gn: galena, Sp: esfalerita, Py: pirita.

En la fase retrógrada del cuerpo de Santa María domina una paragénesis calcisilicatada (tremolita, actinolita, epidota) en los exoskarns y de adularia-cuarzo en las rocas ígneas, en asociación constante con clorita, cuarzo y calcita, indicando condiciones de pH neutras a ligeramente alcalinas (Browne, 1978; Corbett y Leach, 1997). Sumado a ello, la ausencia de hematita entre los minerales metálicos indica condiciones de $f\text{O}_2$ inferiores al buffer de HM (hematita-magnetita), posiblemente inferiores al buffer FMQ (fayalita-magnetita-cuarzo) por la escasez de minerales como epidota (Liou, 1972) o magnetita. Asimismo, la idea de un ambiente no oxidante es soportada también por la aparición frecuente de pirrotina en asociación con los sulfuros de Fe y Zn, y de CH_4 en las inclusiones fluidas. De acuerdo con Sakai (1968), las condiciones de $f\text{O}_2$ con tendencia a reductoras favorecen la preponderancia de especies reducidas del azufre en los fluidos (H_2S , HS^- y S_2^-), cuyas firmas isotópicas no varían considerablemente entre el sulfuro y la solución acuosa a temperaturas hidrotermales. Por estas razones, se puede inferir que los sulfuros la etapa mineralizante principal en el cuerpo mineralizado de Santa María guardan la composición isotópica de los fluidos hidrotermales, con variaciones cercanas o inferiores a 0,5‰ (Figura 71).

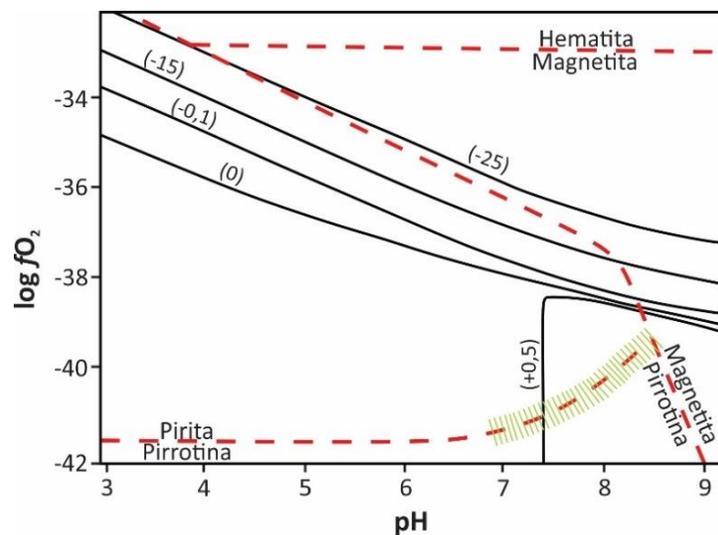


Figura 71. Diagrama de pH vs $\log f\text{O}_2$, donde las líneas negras indican la diferencia entre los valores de $\delta^{34}\text{S}$ H_2S y $\delta^{34}\text{S}$ fluido. El campo de líneas olivas claras representa las condiciones inferidas para el cuerpo de Santa María, con base en criterios mineralógicos. Modificado de Rollinson (1993).

En términos generales, los datos de $\delta^{34}_{\text{S}_{\text{VCDT}}}$ obtenidos para los sulfuros del cuerpo de Santa María se disponen en un rango estrecho de -3,2 a 1,2‰ con ligera dispersión (Figura 70), donde los sulfuros masivos tienen valores de -3,2 a 1,2‰, los exoskarns de -2,6‰, las calizas de -2,8‰ y las rocas ígneas de -0,3 a 0,2‰. De forma similar, los cristales de piritita de una vena de calcita tardía muestran valores de -0,3‰.

Como se aprecia en la Figura 72, los valores de $\delta^{34}_{\text{S}_{\text{VCDT}}}$ de -3,2 a 1,2‰ son congruentes con una fuente magmática para el azufre y son comparables con los datos presentados por Gilmer *et al.* (1988), Jiménez-Franco (2012) y González-Ambrocio (en preparación) de -3,5 a 2,5‰, de -3,87 a 2,6‰ y de -2,8 a 1,7‰, respectivamente, para diferentes áreas mineralizadas en el Distrito Minero de Velardeña. Cabe mencionar que Gilmer *et al.*, (1988) indica valores de $\delta^{34}_{\text{S}_{\text{VCDT}}}$ en el rango de -7,23‰ a 3,13‰ para la sucesión sedimentaria mesozoica de la zona, que pudieron haber modificado ligeramente las firmas isotópicas puramente magmáticas (Figura 72).

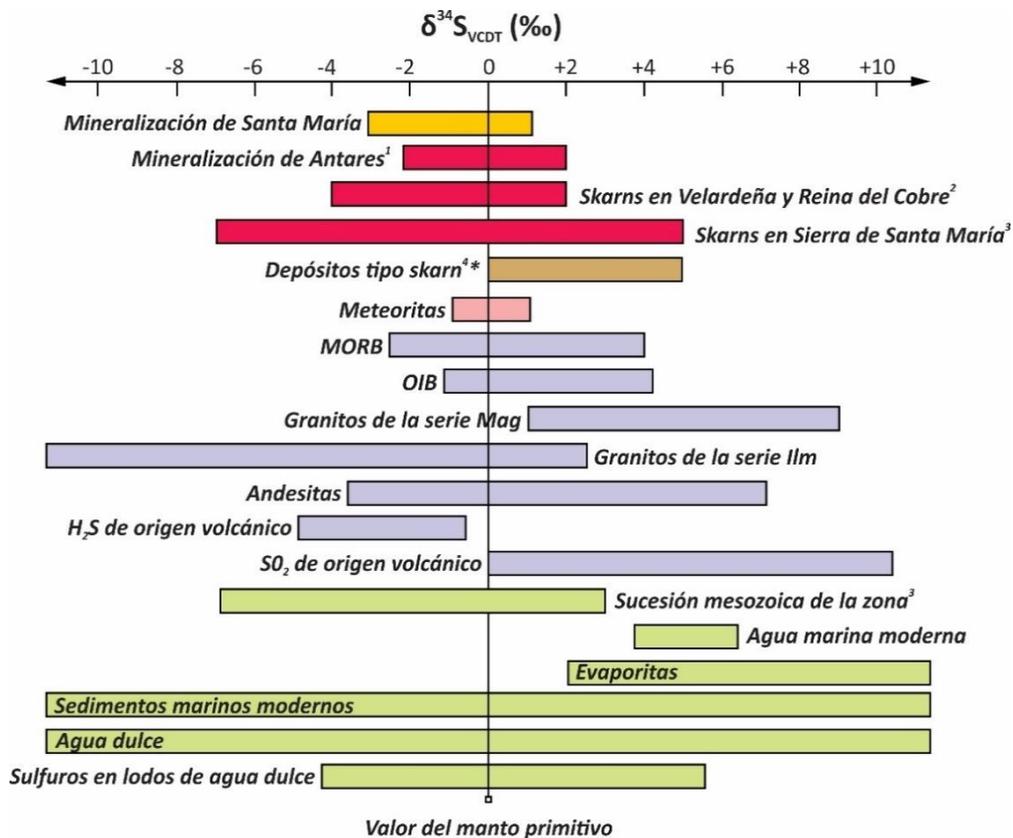


Figura 72. Diagrama comparativo de valores de δ^{34}_{S} de diferentes fuentes. Modificado de Rollinson (1993) y Seal (2006). 1: González-Ambrocio (en preparación), 2: Jiménez-Franco (2012), 3: Gilmer *et al.* (1988), 4: Shanks (2014). Mag: magnetita, Ilm: ilmenita. *Los valores en los skarns pueden variar en gran medida, especialmente en los depósitos distales, donde se presenta interacción con la roca encajonante y modificación de la firma isotópica magmática (Shimazaki y Sakai, 1984; Megaw *et al.*, 1988; Zhao *et al.*, 2003; Ault y Williams-Jones, 2004; Meinert *et al.*, 2005).

7.3 Fechamientos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Estos estudios fueron realizados en agregados de adularia provenientes de rocas ígneas alteradas pervasivamente a este feldespato. Los cristales de adularia estudiados exhiben formas pseudoromboédricas e intercrecimientos con arsenopiritita, esfalerita y piritita (Figura 27C-D), por lo

que las edades obtenidas son representativas de un evento de ebullición dentro del estadio mineralizante principal (etapa 4). Los valores medidos durante el proceso de calentamiento progresivo se muestran en el Anexo 12.4.

Los datos obtenidos tienen un error de 2σ y corresponden a: 1) edades meseta de $37,48 \pm 0,09$ Ma y $37,62 \pm 0,09$ Ma; 2) edades calculadas con diagramas de isócrona inversa de $37,47 \pm 0,13$ Ma y $37,47 \pm 0,3$ Ma (Figura 73). Cabe mencionar que los diagramas de meseta evidencian ligeras pérdidas de Ar hacia los bordes de las muestras, posiblemente por movilización posterior de fluidos hidrotermales (Lee, 2014). Adicionalmente, el y-intercepto de las isócronas inversas se ubica muy cerca de la relación atmosférica de $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$, como es típico en estos análisis (Kuiper, 2002; Lee, 2014); y las mediciones se aglomeran próximas al eje $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, indicando una dominancia de Ar radiogénico y escaso de origen atrapado (Kuiper, 2002).

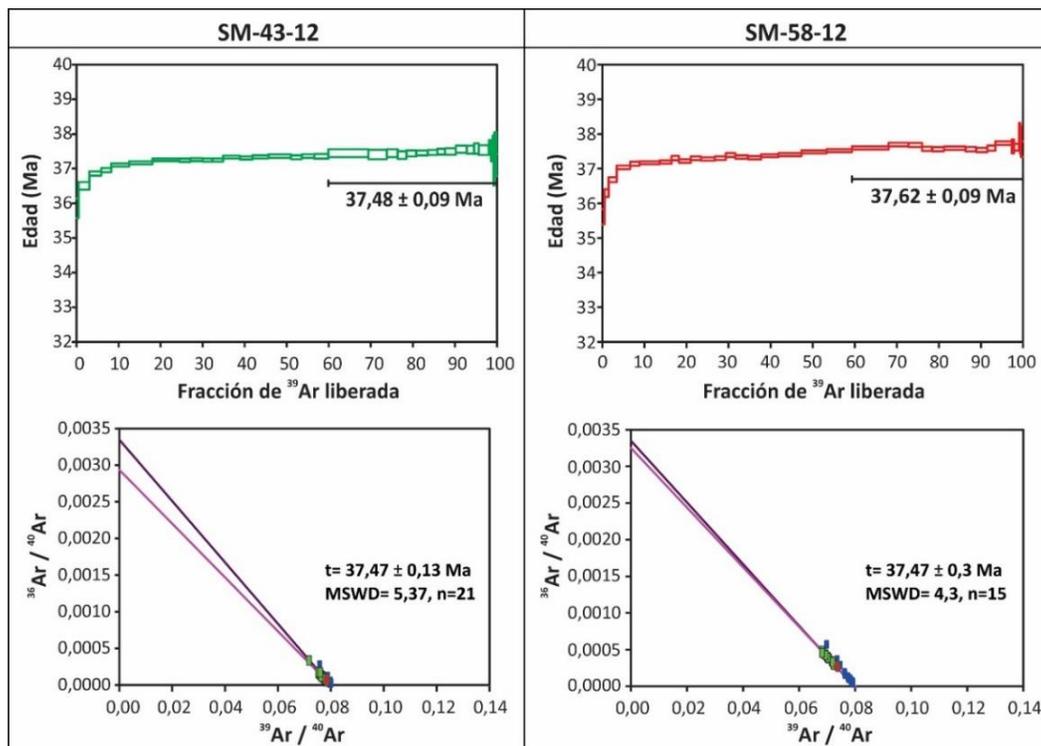


Figura 73. Fechamientos $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ para adularia pseudoromboédrica de la etapa 4. En la parte superior, se encuentran las edades meseta y en la parte inferior las isócronas inversas respectivas.

8 DISCUSIÓN

8.1 Origen, características y tipología del cuerpo mineralizado de Santa María

El cuerpo mineralizado de Santa María se desarrolló a lo largo del contacto entre el dique de Santa María y rocas carbonatadas (Gilmer *et al.*, 1988; Hernández, 1991; Jiménez-Franco *et al.*, 2020), por lo que su morfología es elongada (Industrias Peñoles, 2010), y está constituido por variadas litologías con asociaciones minerales y características fisicoquímicas distintivas, como se muestra en la Figura 74. Por su mineralogía calcisilicatada y ambiente geológico, este depósito puede clasificarse como de tipo skarn cuya formación estuvo enmarcada en tres etapas: una prógrada de alta temperatura, una retrógrada de intermedia temperatura y un vetilleo tardío. Las características de temperatura, salinidad, proporción de metano y valores isotópicos de cada estadio se presentan en la Figura 75.

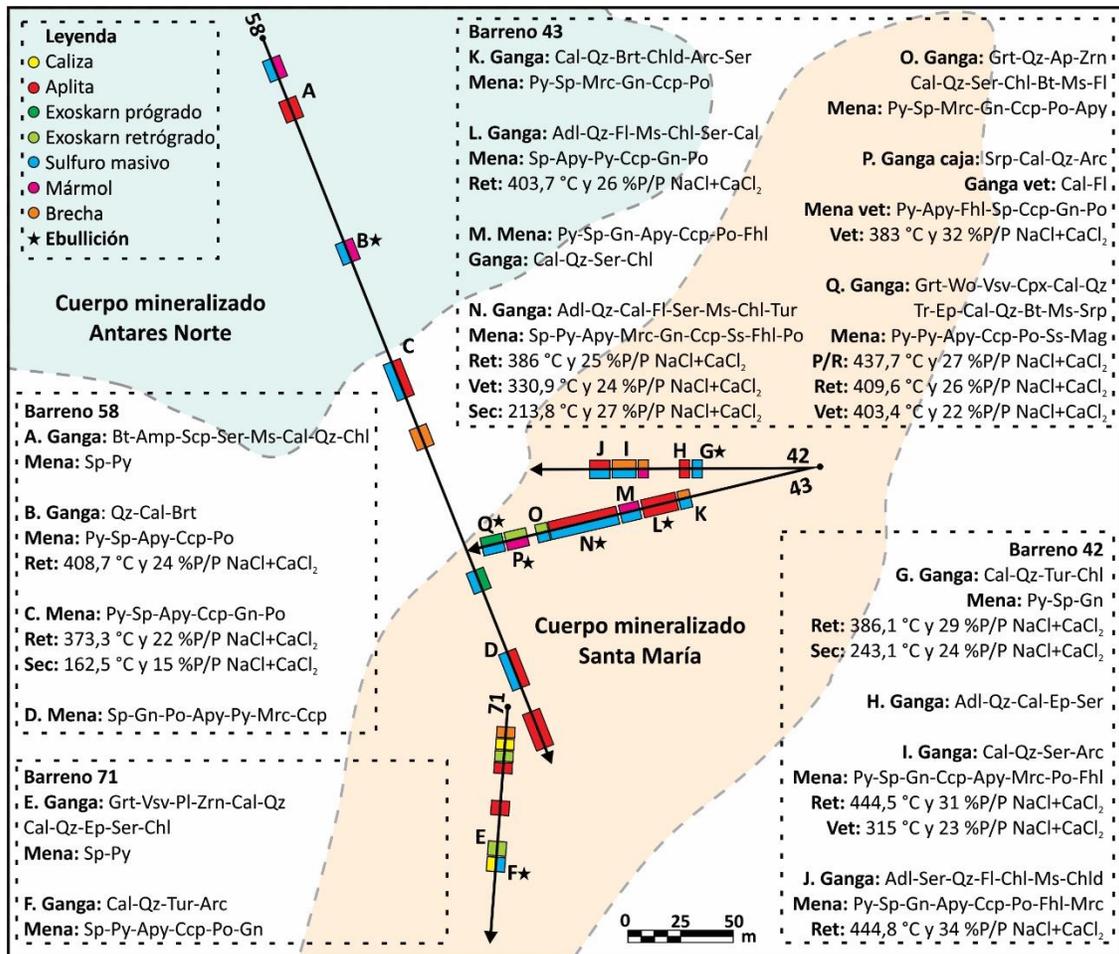


Figura 74. Distribución espacial de asociaciones minerales y datos microtermométricos en el cuerpo de Santa María. Abreviaturas minerales presentadas en apartado de petrografía y química mineral. P/R: inclusiones fluidas (IF) en granate, Ret: IF de etapa 4, Vet: IF en vetillas de calcita, Sec: IF secundarias, %P/P: % en peso. Esquema base tomado de Industrias Peñoles (2010).

En primera instancia, se generó la etapa prógrada durante la intrusión de diques félsicos, por metamorfismo térmico y metasomatismo ligado a la exolución de fluidos hidrotermales de alta temperatura, que favorecieron la cristalización de fases calcisilicatadas como granate (grosularia-andradita), wollastonita, vesuvianita, calcita y cuarzo en las rocas carbonatadas (skarns *sensu stricto*); y de biotita hidrotermal en rocas ígneas de composición tonalítica. Tal mineralogía es diagnóstica de alteración potásica con temperaturas de entre 500 y 700 °C (Sillitoe, 2010; Kouzmanov y Pokrovski, 2012), y de la transición entre las facies hornfelsa hornblenda y hornfelsa piroxeno, es decir, temperatura cercana o superior a 600 °C (Bucher y Grapes, 2011; Winter, 2014). Cabe destacar que, como es común en los depósitos de skarn, la fase de alta temperatura no registra abundancia de mineralización metálica, sino que ésta acompaña a la etapa retrógrada del sistema (Burt, 1977; Kwak, 1987; Meinert, 1992; Misra, 2000).

Como se mencionó en el apartado 5.3 *Secuencia Paragenética*, en el cuerpo de Santa María la fase retrógrada inició con la formación de granates poiquilíticos, tremolita, actinolita, escapolita y epidota, que indica un descenso paulatino de la temperatura desde la fase prógrada, y la mineralogía se diversificó en gran medida conforme el fluido evolucionó y percoló en las rocas encajonantes. Durante la etapa 4 se dio el clímax de la precipitación metálica a manera de cuerpos

de sulfuros masivos, reemplazamientos pervasivos de rocas meta-carbonatadas e ígneas, rellenos en diferentes litologías y vetillas. La mena está compuesta mayoritariamente por pirita y esfalerita (caramelo y tendencia marmatítica), con menores proporciones de arsenopirita, pirrotina, galena, calcopirita, marcasita y cobres grises (freibergita-tetraedrita-hakita), y trazas de magnetita-wüstita y sulfosales de Pb (Se-lilianita y Se-heyrovskyita).

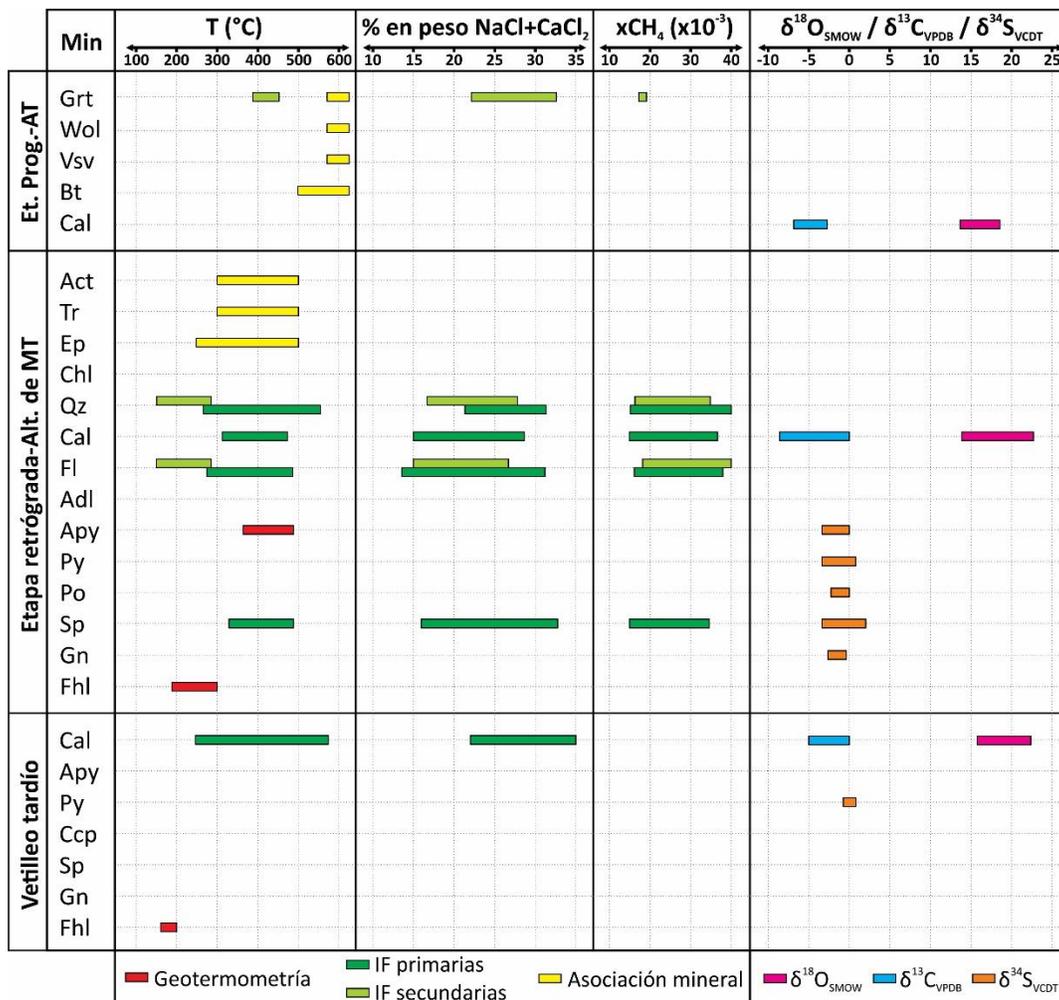


Figura 75. Condiciones de temperatura, salinidad total (% en peso de NaCl+CaCl₂), fracción molar de metano y valores isotópicos ($\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$) para cada estadio de formación del cuerpo de Santa María. MT: media temperatura, Et. Prog.: etapa prógrada, AT: alteración hidrotermal de alta temperatura.

Los minerales metálicos presentan texturas de intercrecimiento, intersticiales, de reemplazamiento, poiquilíticas, de exsolución, entre otras, que demuestran una precipitación cíclica de las diferentes fases, pero bajo condiciones fisicoquímicas poco cambiantes. Esta hipótesis es soportada por: 1) la escasa variación entre las Th obtenidas mediante estudios microtermométricos en las inclusiones fluidas primarias en esfalerita (325-500 °C) y en la geotermometría de arsenopirita (370-490 °C) y cobres grises (ca. 300 °C); 2) la constancia en la química de los fluidos de las asociaciones de inclusiones fluidas de la etapa 4 y el vetilleo tardío, en las que domina el sistema H₂O-CaCl₂-NaCl-CH₄ con salinidades entre 15 y 30 % en peso NaCl+CaCl₂; 3) los escasos cambios en los valores de isótopos estables de azufre que definen el intervalo de -3,5‰ a 1,5‰. Cabe mencionar que la geotermometría con isótopos de azufre (Seal, 2006) arrojó temperaturas de cristalización <100 °C y

>600 °C, inconsistentes con los obtenidos mediante otras técnicas (ca. 300-500°C). Esto podría ser causado porque no se alcanzó el equilibrio isotópico entre los sulfuros, evidenciado además por los eventos multiepisódicos observados en la mena. De forma tardía con respecto a la etapa 4, precipitó marcasita con textura ojo de pájaro como reemplazamiento de pirrotina, y cobres grises (tetraedrita-freibergita-hakita) a partir de cristales de galena, esfalerita y/o calcopirita, los cuales registran temperaturas de cristalización cercanas a 170 °C. Estos minerales están ligados con eventos tardíos en el sistema, que además evidencian un aumento en la fS_2 (Ramdohr, 1969), posiblemente bajo condiciones de sulfuración intermedia (Einaudi *et al.*, 2003; Simmons *et al.*, 2005).

Por su parte, la ganga varía su naturaleza dependiendo del tipo de roca en que se desarrolló, apareciendo alteraciones pervasivamente distribuidas de adularia pseudoromboédrica-cuarzo-calcita-fluorita-sericita en las rocas ígneas y de clorita-cuarzo-moscovita-actinolita-epidota-fluorita-adularia-calcita en los exoskarns. La química de los fluidos y las temperaturas de homogenización en inclusiones fluidas de fluorita (325-475 °C), calcita (300-475 °C) y cuarzo (325-500 °C) son similares a aquellas registradas para la esfalerita de la etapa 4, reforzando la idea de coprecipitación y, por tal, relación con los mismos fluidos mineralizantes. Sumado a ello, las alteraciones hidrotermales con anfíboles secundarios (tremolita-actinolita), epidota muy cristalina y moscovita, son estables a temperaturas superiores a 250 °C y en condiciones de pH predominantemente neutras (Browne, 1978; Corbett y Leach, 1997). De manera ligeramente tardía y más localizada se desarrollaron alteraciones hidrotermales subordinadas de menor temperatura: sericitización y alteración propilítica, a modo de parches o en rellenos discretos que afectaron a las asociaciones previamente mencionadas.

Los sistemas de skarn pueden estar relacionados con otras tipologías de depósitos como pórfidos y/o epitermales (Meinert, 1992; Sillitoe, 2010; Kouzmanov y Pokrovski, 2012), estos últimos caracterizados por poseer rangos de temperaturas de entre 100 y 320 °C (White y Hedenquist, 1990; Hedenquist *et al.*, 2000; Simmons *et al.*, 2005), y por representar eventos tardíos con respecto a los estadios de alta temperatura, ayudados muchas veces por sistemas de fallas (Cooke y Simmons, 2000; Hoffmann, 2003; Pinet y Tremblay, 2009). El último evento mineralizante registrado en Santa María se dispone en venas y vetillas (<5 cm) que cortan a las fases prógrada y retrógrada del sistema, y están conformadas enteramente por calcita lechosa; éstas, de manera esporádica, presentan mineralización metálica de arsenopirita, piritita y calcopirita, con muy bajas cantidades de esfalerita, galena y pirrotina. No obstante, las temperaturas de homogenización obtenidas en inclusiones primarias en calcita de esta etapa rebasan los rangos epitermales, ocupando un intervalo muy amplio con picos de frecuencia entre 325 y 450 °C, siendo además correlacionables con aquellas calculadas mediante geotermometría en arsenopirita de ca. 370 °C.

Por otro lado, tanto los valores de $\delta^{34}S_{VCDT}$ (0,5‰ a -3‰) como el sistema químico dominante (H_2O - $CaCl_2$ - $NaCl$ - CH_4 , 20-33 % en peso $NaCl+CaCl_2$) en el vetilleo son muy similares a los encontrados en la etapa 4, indicando que la fuente del hidrotermalismo se mantuvo activa en ambos eventos y sin variar en gran medida sus características fisicoquímicas. Durante un evento póstumo, en estas estructuras se formaron rellenos intersticiales de cobres grises que definen un rango composicional entre hakita y tenantita, y registran temperaturas inferiores a 170 °C. Por la mineralogía encontrada, se pueden inferir condiciones de fugacidad de azufre inicialmente bajas a intermedias durante la cristalización de los sulfuros y, posteriormente, intermedias por la estabilización de los cobres grises en ambos estadios (Figura 76; Einaudi *et al.*, 2003).

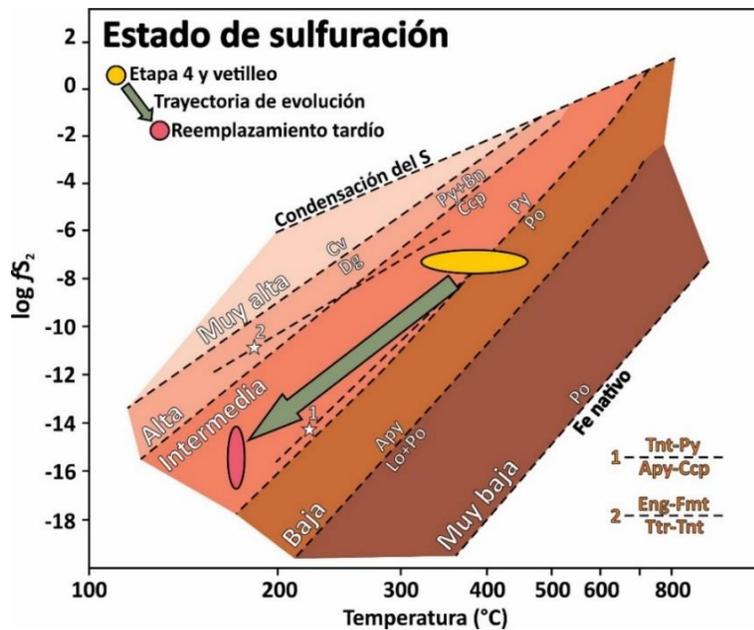


Figura 76. Diagrama de T vs $\log fS_2$, donde se observa la evolución de los fluidos mineralizantes desde temperaturas intermedias-altas (350-500 °C) a intermedias-bajas (ca. 170 °C), a condiciones de sulfuración de intermedias a bajas. Modificado de Einaudi et al. (2003) y Camprubí y Albinson (2007), Cv: covelina, Dg: digenita, Bn: bornita, Eng: enargita, Fmt: famatinita.

Dadas las amplias similitudes en la mineralogía y condiciones fisicoquímicas estimadas durante la formación de la etapa 4 y de las venas tardías de calcita, se infiere una fuente común para ambos estadios. No obstante, existen grandes diferencias composicionales entre los cobres grises tardíos de la etapa 4 (sulfuros masivos) y aquellos presentes en las venas de calcita, mostrando enriquecimientos en Sb y As, que los ubican entre los extremos hakita-tetraedrita-freibergita y tenantita-hakita, respectivamente. Tal comportamiento puede responder a dos causas: en la primera, la formación de cada familia de sulfosales fue a partir de fluidos diferentes y en distintos momentos, afectando a los sulfuros masivos y a las venas de calcita de manera independiente. Por su parte, la segunda posibilidad sería a partir de un fluido similar que encontró permeabilidad química en los sulfuros masivos y reemplazó fases como galena, posiblemente argentífera (Cruz-Pérez y López-Escalona, 1981; Hernández, 1991), y calcopirita, lo cual explicaría las altas relaciones Ag/Cu; y permeabilidad primaria en las venas de calcita, donde ocupó espacios intercristalinos de los sulfuros ya formados, sin reaccionar en gran medida con éstos.

Durante la exhumación del cuerpo mineralizado se dio la percolación de aguas meteóricas al sistema y, consecuentemente, se produjo la oxidación parcial de los sulfuros y minerales ferromagnesianos, y formación de óxidos e hidróxidos de Fe (hematita terrosa-goethita) a manera de parches, vetillas y *stockworks*. Asimismo, los feldespatos fueron parcialmente reemplazados por minerales del grupo de la arcilla.

De acuerdo con fechamientos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en adularia de la etapa 4 (fase retrógrada), el evento mineralizante principal se desarrolló a finales del Eoceno (ca. 37,5 Ma). A pesar de que esta edad es ligeramente más antigua que las reportadas para los diques del Complejo Intrusivo Velardeña de $33,4 \pm 1,7$ Ma (Felder, 1979), su relación genética se aprecia claramente en: 1) el crecimiento de mineralización idéntica en las rocas ígneas, calizas y exoskarns; 2) los isótopos de oxígeno y carbono en calcita con fuentes combinadas entre magmáticas y de carbonatos marinos; 3) los isótopos

estables de azufre en sulfuros con afinidad magmática. Cabe resaltar que las edades reportadas por Felder (1979) son K-Ar (fusión total), y pudieron ser parcialmente modificadas por calentamientos tardíos (ej., alteración por movilización de fluidos hidrotermales; Lee, 2014). Según Jiménez-Franco (2012), las rocas del Complejo Intrusivo Velardeña son granitoides tipo I, con una afinidad claramente metaluminosa y tendencia subalcalina-calcialcalina. Recurrentemente, rocas de estas características pertenecen a la serie de la magnetita, formándose en condiciones oxidantes (Ishihara, 1977; congruente con la aparición local de magnetita en algunas de las tonalitas estudiadas), y están ligadas con la formación de depósitos tipo pórfido, epitermales y skarns (Hedenquist *et al.*, 2000; Meinert *et al.*, 2005, Sillitoe, 2010).

Los fechamientos en adularia de ca. 37,5 Ma concuerdan con la fase de magmatismo propuesta por Ferrari *et al.* (2018) de 45 a 35 Ma, que genera los cuerpos intrusivos félsicos previos (y parcialmente contemporáneos) a las fases iniciales del magmatismo silíceo climácico de la Sierra Madre Occidental. Por otra parte, intrusivos de edades comparables han sido descritos por diversos autores en otros sectores de la Sierra de Parras (Buseck, 1962; Solé *et al.*, 2007; Sosa-Valdés, 2010). Particularmente, Buseck (1962) reportó en Concepción del Oro una edad K-Ar en adularia de $38 \pm 1,2$ Ma, que es representativa de la fase de mineralización en este distrito minero. Como indica Camprubí (2013), el evento magmático del Eoceno-Oligoceno es responsable de diversas mineralizaciones económicas en el Sector Transversal de Parras (ej., Velardeña, Concepción del Oro, Mapimí, Mazapil y Tronco de Peras), además de a lo largo del Sistema de Falla de San Luis-Tepehuanes (ej., San Martín), apoyando la hipótesis de este autor de la existencia de una estructura regional que favoreció el desarrollo de depósitos magmático-hidrotermales en el primer sector.

Por tanto, la génesis de las mineralizaciones tipo skarn del cuerpo de Santa María se puede atribuir al intenso magmatismo silíceo de la Sierra Madre Occidental prevaleciente entre el Eoceno y Oligoceno (Ferrari *et al.*, 2018), y su invasión progresiva en las plataformas carbonatadas deformadas que componen el Sector Transversal de Parras de la Sierra Madre Oriental (Camprubí, 2013). De esta forma, las mineralizaciones estudiadas pertenecen a la época metalogenética del Eoceno al Mioceno Temprano del centro y noroccidente de México (Camprubí, 2013).

8.2 Naturaleza de los fluidos mineralizantes y evolución del depósito

Los fluidos involucrados en la génesis del yacimiento fueron estudiados mediante datos mineralógicos, microtermométricos e isotópicos. En primera instancia, con base en criterios mineralógicos se pueden estimar las condiciones de pH, fugacidad de oxígeno y fugacidad de azufre durante la cristalización. Como se mencionó en el apartado 7.2 *Isótopos Estables de Azufre en Sulfuros*, la presencia de asociaciones calcisilicatadas hidratadas de intermedia-alta temperatura, de la paragénesis adularia-cuarzo y la constancia en la aparición de calcita, son indicativas de fluidos con pH neutro a ligeramente alcalino (Browne, 1978; Corbett y Leach, 1997; Cooke y Simmons, 2000; Simmons *et al.*, 2005); asimismo, la escasez de óxidos de Fe (hematita-magnetita) y dominancia de sulfuros, la recurrencia en la formación de pirrotina y la aparición de clorita-pirita, permiten estimar condiciones de fO_2 tendientes a reductoras (Einaudi *et al.*, 2003; Simmons *et al.*, 2005). Además, la existencia de reemplazamientos de pirrotina por marcasita, de la asociación esfalerita pobre en hierro-pirita, pirrotina-arsenopirita, esfalerita rica en hierro-pirita y cobres grises, puede ser explicada mediante las variaciones observadas en las temperaturas de homogenización (350-500 °C), a fugacidades de azufre aproximadamente constantes (*Figura 76*; Camprubí y Albinson, 2007).

Las salmueras relacionadas con la etapa 4 y el vetilleo tardío registran temperaturas eutécticas inferiores a -100 °C, muy por debajo de las T_e registradas para los sistemas dominados por agua y

cloruros de Na, Ca, Mg y/o Fe (Steele-McInnis *et al.*, 2016). Por tanto, se infirió la existencia de metano, cuyo punto de fusión es de $-182,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y temperatura crítica de $17,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, y es soluble a condiciones supercríticas en agua (Zheng *et al.*, 2019). La presencia de este compuesto fue corroborada con ayuda de infrarrojo ATR. La aparición de metano en sistemas magmático-hidrotermales ha sido estudiada por diversos autores (Welhan, 1988; Salvi y Williams-Jones, 1997; Potter y Konnerup-Madsen, 2003; Etiope y Sherwood Lollar, 2013; Zhang *et al.*, 2019; Ren *et al.*, 2020), encontrando que las fuentes principales de este compuesto son de dos clases: biogénicas y abiogénicas. Las primeras se subdividen en dos tipos: 1) termogénesis de materia orgánica en rocas y sedimentos a moderada-alta temperatura ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$), y 2) producción biológica por acción bacteriana a baja temperatura. Por otra parte, las abiogénicas pueden ser: 1) desgasificación de cuerpos magmáticos en estadios tardíos de cristalización; 2) síntesis inorgánica a altas temperaturas ($300\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$) involucrando CO_2 y H_2 , u otras moléculas C-H derivadas de distintas fuentes (ej., reacción de fluidos con rocas carbonatadas); 3) síntesis Fischer-Tropsch.

La producción de metano por acción bacteriana ocurre normalmente a bajas temperaturas, permitiendo descartarla dado que los fluidos muestran rangos de 350 a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por su parte, las reacciones Fischer-Tropsch y de síntesis inorgánica ocurren lentamente, incluso al estar catalizadas por óxidos de Ni y Fe, y no forman únicamente hidrocarburos livianos (Zhang *et al.*, 2019); de allí, la ausencia de rasgos característicos de enlaces $-\text{CH}_2$ en el infrarrojo ATR, permite eliminar también ésta como fuente probable. Adicionalmente, las inclusiones fluidas con metano están relacionadas con la etapa 4 de la fase retrógrada y con el vetilleo tardío, y sus rangos de temperatura son bajos para estar representando plenamente los fluidos prístinos de origen magmático, por lo que la exsolución de este compuesto a partir de los magmas puede ser descartada. Asimismo, el metano está más asociado con magmas reducidos (serie de la ilmenita; Zhang *et al.*, 2019), normalmente peraluminosos (Chappell y White, 1974; Chappell y Fleming, 2001), contrario a los intrusivos de Velardeña que son de la serie magnetita.

Por lo anteriormente expuesto, se considera que el metano se formó por termogénesis del material orgánico o lixiviación de éste presente en las calizas (influencia directa del encajonante; *Figura 15D*), durante la movilización de los fluidos hidrotermales de intermedia-alta temperatura; que además es el mecanismo más común en hidrotermalismo continental (Welhan, 1988). No obstante, no se descarta la formación de CH_4 gas por descomposición térmica durante la intrusión del dique de Santa María e incorporación posterior a los fluidos de la etapa retrógrada. Cabe destacar que el metano es estable en condiciones reductoras y, según Potter y Konnerup-Madsen (2003), de 2 a 3 unidades por debajo de la curva del *buffer* FMQ se produce la especiación en los fluidos exsueitos, resultando en composiciones enriquecidas en este componente (*Figura 77*).

Por otra parte, las salmueras del estadio 4 y del vetilleo tardío registran temperaturas de fusión de los sólidos (antarticitita-hidrohalita) cercanas a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Según MacInnis *et al.* (2016), la temperatura eutéctica del sistema $\text{H}_2\text{O-CaCl}_2\text{-NaCl}$ ($-51\text{ }^{\circ}\text{C}$) es muy similar a la del sistema $\text{H}_2\text{O-CaCl}_2$ ($-49,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), lo cual contrasta con la de los sistemas $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ ($-21,2\text{ }^{\circ}\text{C}$), $\text{H}_2\text{O-CaCl}_2\text{-FeCl}_2$ ($-58\text{ }^{\circ}\text{C}$) y $\text{H}_2\text{O-CaCl}_2\text{-FeCl}_3$ ($-63\text{ }^{\circ}\text{C}$). De allí se puede interpretar que conforme incrementa la proporción NaCl/CaCl_2 la fusión de los sólidos ocurre a mayor temperatura y al ingresar determinados cloruros (FeCl_2 , FeCl_3 , etc.) la temperatura eutéctica se deprime. Consecuentemente, las salmueras preponderantes en la etapa de mineralización principal y el vetilleo tardío fueron predominantemente cálcicas, con incrementos locales en la proporción relativa de NaCl y presencia probable de solutos adicionales. Además, la salinidad de estos fluidos varió entre 15 y 34 % en peso (NaCl+CaCl_2), a una proporción de NaCl:CaCl_2 cercana a 0,05:0,95.

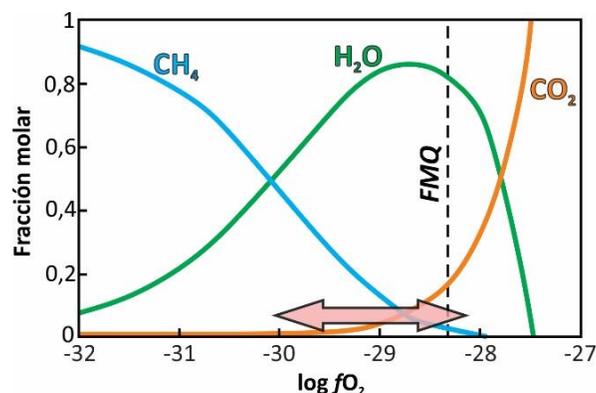


Figura 77. Distribución del metano, dióxido de carbono y agua a 400 °C y 1,35 Kbar en un fluido del sistema C-O-H, en función a la fugacidad de oxígeno. Nótese la preferencia del CH₄ por los ambientes reductores, opuesta a la del CO₂. La flecha rosada representa una aproximación a las condiciones estimadas para el cuerpo de Santa María. Modificado de Zhang *et al.* (2019).

Los valores de isótopos de azufre obtenidos no muestran grandes cambios en todo el set de muestras analizadas, que incluyó minerales sulfurados de la etapa 4 y del vetilleo tardío, variando entre -3,5‰ y 1,5‰ $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ (Figura 70). Además, se correlacionan bien con los datos presentados por Gilmer *et al.* (1988), Jiménez-Franco (2012) y González-Ambrocio (en preparación) para los sulfuros de Antares, Santa María, Reyna del Cobre y otras localidades dentro del Distrito Minero de Velardeña (Figura 78). Rye y Ohmoto (1974), Shimazaki y Sakai (1984), Ohmoto (1972), Seal (2006), indicaron que los datos cercanos a cero están típicamente relacionados con azufre magmático, definiendo un rango entre -3‰ y 3‰ (Chaussidon y Lorand, 1990); y, de acuerdo con Megaw *et al.*, (1988) y Meinert *et al.* (2005), es la fuente más común del azufre en los depósitos tipo skarn.

Cabe mencionar que Gilmer *et al.* (1988) presentaron valores de -7,23‰ a 3,13‰ para la sucesión sedimentaria mesozoica de la zona; no obstante, las calizas de la Formación Cuesta del Cura no exhiben sulfuros accesorios (ej., pirita framboidal) y no existen ni reportes de sulfatos evaporíticos en la Sierra de Santa María, ni evidencia isotópica de azufre derivado de esta fuente (valores muy positivos; Rye y Ohmoto, 1974). Por tal motivo, se interpreta que la fuente dominante del azufre fue magmática y pudo ser ligeramente modificada por la influencia de las rocas sedimentarias, como se evidencia por la ligera dispersión en los datos de $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ (Figura 70 y Figura 78).

Según lo expuesto por Shimazaki y Yamamoto (1979), las variaciones ligeras en los valores de $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ observadas en los sulfuros tomados de distintos lugares del cuerpo mineralizado de Santa María y pertenecientes a dos etapas (mineralización principal y el vetilleo tardío), indican que: 1) el azufre proviene de una gran fuente homogénea, 2) las condiciones fisicoquímicas prevalecieron aproximadamente constantes durante el depósito de la mena, y 3) la precipitación de los minerales sulfurados en cada estadio no generó cambios significativos en la composición isotópica total de la solución. Esto es coherente con la fuente magmática propuesta para el azufre y con la constancia en la química de los fluidos mineralizantes.

Por último, los valores de los isótopos de oxígeno y carbono varían en el rango definido entre firmas plenamente magmáticas (<15‰ $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ y <-4‰ $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$) y de rocas carbonatadas marinas (>20‰ $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ y >-4‰ $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$). Con excepción de los exoskarns y venas encajadas en rocas con alteración potásica, los cuales presentan valores magmáticos, todas las litologías estudiadas muestran una influencia muy acentuada de las rocas calcáreas (Figura 79), evidenciada también por la presencia de metano en las inclusiones fluidas y la leve dispersión en los datos de isótopos de

azufre. Este fenómeno se observa en el comportamiento isotópico de los mármoles, cuyas firmas exhiben migración desde valores sedimentarios hacia magmáticos, producidos por los lóbulos de empobrecimientos en $\delta^{18}\text{O}$ desarrollados durante la migración de los frentes metasomáticos (Meinert *et al.*, 2005; Barker *et al.*, 2013; Barker y Dipple, 2019).

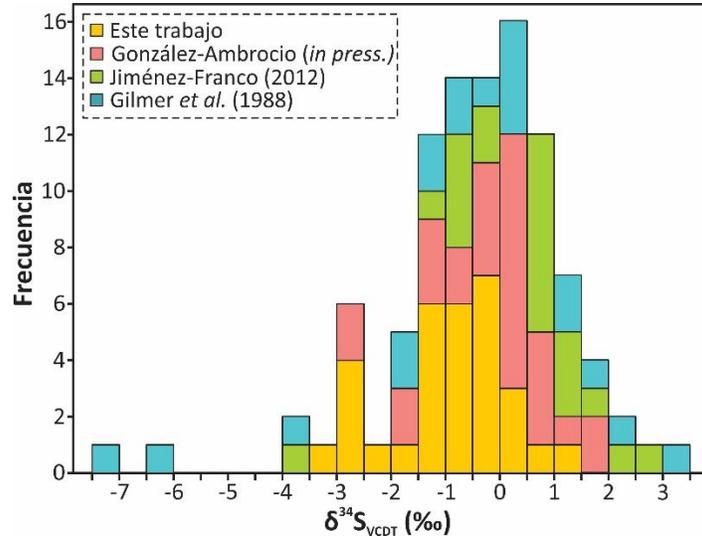


Figura 78. Comparación entre valores de isótopos de azufre en sulfuros provenientes de los cuerpos mineralizados de Santa María y Antares (González-Ambrocio, en preparación), y otras áreas mineralizadas en las sierras de Santa María y San Lorenzo (Gilmer *et al.*, 1988; Jiménez-Franco, 2012). Los datos más negativos corresponden a muestras de las formaciones Aurora-Cuesta del Cura (-7,23‰) e Indidura-Caracol (-6,02‰).

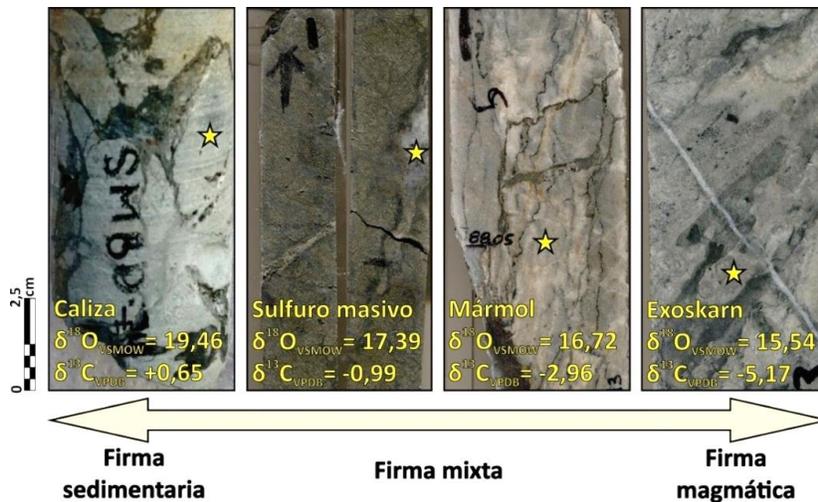


Figura 79. Variación de la firma isotópica en calcita proveniente de calizas, sulfuros masivos, mármoles y skarns, mostrando variaciones acentuadas entre firmas claramente sedimentarias (carbonatos de origen marino) y tendientes a magmáticas.

Conjugando la información anteriormente expuesta, en la Figura 80 se sintetiza el modelo evolutivo del cuerpo mineralizado de Santa María. En primera medida, durante la etapa prógrada, se generó metamorfismo térmico (marmorización) y se exsolvieron fluidos hidrotermales-magmáticos de alta temperatura (>600 °C) a partir del cuerpo ígneo, que circularon por la sucesión carbonatada, metasomatizando estas rocas y permitiendo la cristalización de fases calcisilicatadas como granate, vesuvianita y wollastonita. Parte de estos fluidos prístinos generaron también alteración potásica

en las tonalitas. Posteriormente, las aguas magmáticas migraron y circularon por las rocas sedimentarias, reequilibrándose isotópicamente e incorporando metano y algo de azufre. Durante este proceso disminuyó la temperatura en el sistema por enfriamiento conductivo de los fluidos, al mismo tiempo que se producía neutralización por interacción con la roca encajonante y dilución por mezcla con probables aguas de circulación profunda (y/o connatas). En esta etapa se dieron alteraciones hidrotermales calcisilicatadas en los skarns y de adularia-cuarzo en las rocas ígneas, muy relacionadas además con la precipitación principal de los sulfuros y la generación posterior de vetillas de calcita estériles o mineralizadas. Cabe mencionar que en este estadio pudo darse también la incursión de fluidos magmáticos tardíos y de menor temperatura, generados por la cristalización avanzada del cuerpo intrusivo. Finalmente, durante el proceso de exhumación del depósito, percolaron aguas meteóricas que produjeron oxidación de los minerales con Fe.

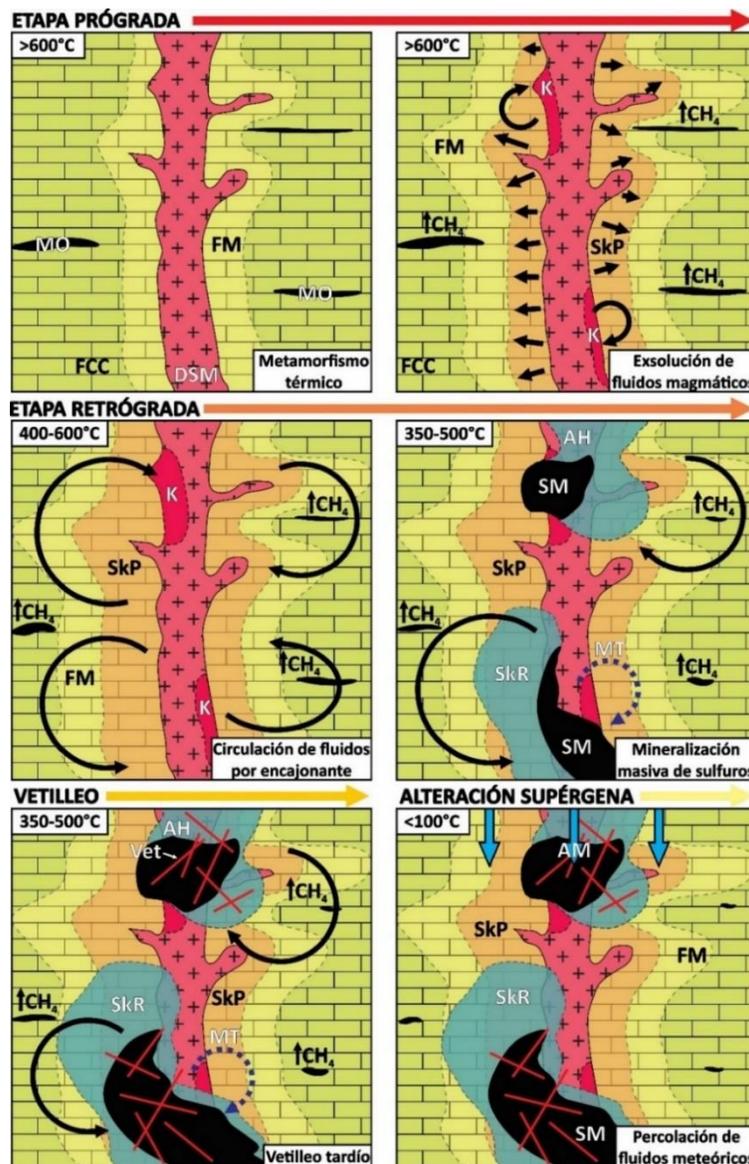


Figura 80. Modelo evolutivo esquemático propuesto para el sistema de skarn en Santa María, explicación en el texto. MO: materia orgánica, FCC: Formación Cuesta del Cura, DSM: Dique de Santa María, FM: frente de marmorización, K: alteración potásica, SkP: skarn progrado, SkR: skarn retrógrado, SM: sulfuro masivo, AH: alteración de adularia-cuarzo, Vet: vetillas de calcita, MT: fluidos magmáticos tardíos, AM: agua meteórica.

8.3 Mecanismos de precipitación mineral

En el cuerpo de Santa María fueron identificados dos eventos de precipitación metálica: el primero en sulfuros masivos (esfalerita-pirita-galena-arsenopirita-pirrotina-calcopirita±cobres grises±sulfosales de Pb±magnetita), y el segundo en venas de calcita tardías con arsenopirita, pirita, calcopirita, esfalerita, galena y cobres grises. De acuerdo con diversos autores (Spycer y Reed, 1989; Hedenquist *et al.*, 2000; Bakker, 2003; Sillitoe, 2010; Kouzmanov y Pokrovski, 2012), la Ag y los metales básicos (Zn-Pb) normalmente se transportan a modo de complejos clorurados en sistemas hidrotermales de temperatura intermedia (excepto en fluidos muy sulfurados y poco salinos; Spycer y Reed, 1989; Hofstra y Cline, 2000). Tales ligandos se desestabilizan más efectivamente mediante procesos de enfriamiento, dilución, reducción e/o incremento de pH (Cooke y Simmons, 2000; Kouzmanov y Pokrovski, 2012) que por ebullición, siendo este último muy importante en la precipitación del oro (White y Hedenquist, 1990; Cooke y Simmons, 2000).

En la *Figura 81* se muestran los datos de Th y salinidad obtenidos en este trabajo, junto con los presentados por Gilmer *et al.* (1988) y Jiménez-Franco *et al.* (2020) quienes definieron que el sistema químico H₂O-NaCl fue el preponderante en los fluidos mineralizantes en los skarns de la Sierra de Santa María. De este modo, para el cuerpo de Santa María (*Figura 81A*) se interpretan tres procesos de precipitación: 1) dilución y neutralización de los fluidos mineralizantes por interacción con las rocas encajonantes carbonatadas y sus aguas connatas (flechas azules); 2) enfriamiento conductivo de los fluidos durante la circulación por la sucesión carbonatada (flechas moradas); 3) ebullición y formación de falsas salmueras (flechas rojas). De los tres mencionados, el enfriamiento conductivo y la dilución/neutralización fueron los mecanismos dominantes de precipitación, ya que ocasionaron el aumento del pH y disminución de la temperatura, *f*O₂ y salinidad de los fluidos, desestabilizando así los ligandos transportadores de metales.

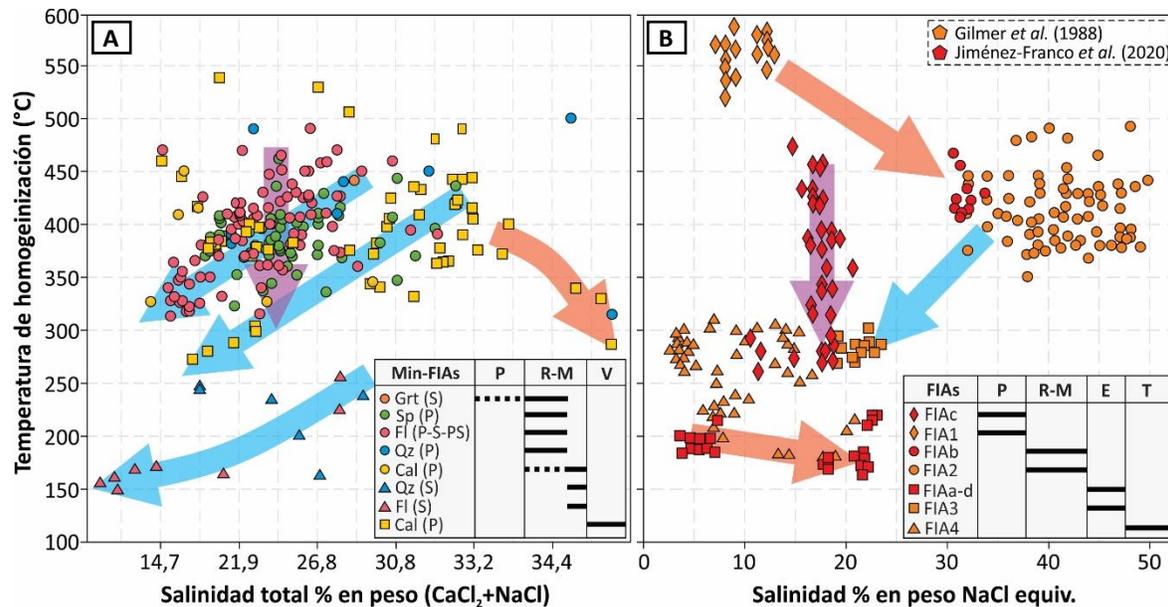


Figura 81. Diagramas de salinidad vs temperatura de homogenización para el cuerpo de Santa María (A) y otras mineralizaciones de tipo skarn y epitermales de la Sierra de Santa María (B). Datos tomados de Gilmer *et al.* (1988) y Jiménez-Franco *et al.* (2020). P, R, M: etapas prógrada, retrógrada y mineralizante, V: vetilleo, E: epitermal, T: inclusiones fluidas secundarias tardías.

Por su parte, la ebullición denotada por la flecha naranja en la *Figura 81A* afectó a los fluidos de las venas tardías de calcita, donde son recurrentes las asociaciones que agrupan inclusiones ricas en vapor, bifásicas con grados de relleno variables (L+V y V+L) y trifásicas (L+V+S). En algunas rocas ígneas y sulfuros masivos fueron reconocidas pequeñas zonas con brechamiento hidráulico y cataclasis, estas segundas asociadas con sistemas de falla localizados, los cuales pudieron estar activos durante la movilización de los fluidos, induciendo procesos de ebullición por descompresión súbita (Hedenquist *et al.*, 2000). Cabe destacar que las evidencias petrográficas y microtermométricas sugieren que la ebullición actuó como un proceso auxiliar durante el vetilleo.

Como se muestra en la *Figura 81B*, Gilmer *et al.* (1988) definieron las asociaciones de inclusiones fluidas FIA1 (etapa prógrada), FIA2 (estadio mineralizante), FIA3 (fase epitermal) y FIA4 (evento tardío), y Jiménez-Franco *et al.* (2020) las FIAa (fase epitermal), FIAb (estadio mineralizante), FIAC (etapa prógrada) y FIAd (fase epitermal). Estos autores sugirieron que la ebullición fue el principal mecanismo de depósito de las menas, basados en el incremento de la salinidad de los fluidos entre la FIA1 y FIA2, y dentro de la FIAa y FIAd (*Figura 81B*). Según los datos de Gilmer *et al.* (1988), entre la FIA2 y la FIA3, se produjo una disminución de la temperatura y la salinidad, la cual, de acuerdo con Wilkinson (2001), podría relacionarse con una dilución (flecha azul en *Figura 81B*). Asimismo, en las inclusiones fluidas de la FIAC presentadas por Jiménez-Franco *et al.* (2020) se evidencia un proceso de enfriamiento conductivo (*Figura 81B*).

La presencia de adularia en campos geotérmicos y sistemas hidrotermales está relacionada con la coexistencia de vapor y agua caliente (ej., medios en ebullición; Steiner, 1970; Corbett y Leach, 1997), y con un alto flujo hidrotermal en condiciones de elevada permeabilidad (Browne, 1978). En Santa María, la adularia pseudoromboédrica es un mineral de alteración dominante de la etapa 4 en las rocas ígneas y se formó conjuntamente con las mineralizaciones metálicas, indicando que la ebullición estuvo presente, aunque de forma muy local. Jiménez-Franco (2012) encontró que las rocas ígneas asociadas con la mineralización en Antares son granitoides con altos valores en álcalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$), que incluso llegan a ubicarlos en el campo de peralcalinos. Por ende, la alta disponibilidad en K del sistema y las características fisicoquímicas de los fluidos (pH, $f\text{O}_2$, etc.), favorecieron la cristalización de este mineral en altas proporciones, aún sin dominancia de ebullición (metasomatismo potásico; Hofstra y Cline, 2000).

Steiner (1970) y Libbey y Williams-Jones (2016) sostienen que la adularia en rocas ígneas se dispone como reemplazamientos selectivos en fenocristales de plagioclasa y pervasivos de la matriz, como se observa en la etapa 4. Estos mismos autores, indican que cuando este feldespato se desarrolla en fracturas donde cristaliza a manera de incrustaciones y evidencia descompresiones bruscas y procesos de ebullición o *flashing*. Dada la ausencia de estas evidencias, se reafirma que la ebullición no representó el mecanismo de depósito más importante; no obstante, sí ocasionó la acumulación puntual de sulfuros en rocas ígneas, como se evidencia por los intercrecimientos de adularia pseudoromboédrica con los sulfuros. De hecho, de haberse producido ebullición en grandes proporciones, el metano (estado gas a $T > -161,5\text{ }^\circ\text{C}$) hubiese migrado hacia la fase vapor, dejando la porción líquida empobrecida en este compuesto. Por tanto, la presencia de CH_4 en inclusiones fluidas bifásicas (L+V) de la etapa 4, sugiere también que la ebullición actuó de forma recesiva.

8.4 Relación con otras zonas mineralizadas del Distrito Minero de Velardeña

El Distrito Minero de Velardeña abarca parte de las sierras de Santa María, San Lorenzo y Los Trobadores, junto con pequeñas serranías aledañas. De acuerdo con informes técnicos de Industrias Peñoles, Pinet y Tremblay (2009) y Jiménez-Franco (2012), existen seis zonas mineralizadas en la

sierra de Santa María (La Industria, La Esperanza, Molotitos, Los Azules, Antares y Santa María), cinco en la sierra de San Lorenzo (San Mateo, Terneras, Santa Isabel, Guardarraya y Reyna del Cobre) y una en la sierra de Los Trobadores (San Diego). Con excepción de las áreas de San Mateo, Terneras y La Industria que son depósitos principalmente vetiformes, todos los cuerpos mineralizados son masivos (o semi-masivos) en las zonas de contacto entre cuerpos intrusivos félsicos a intermedios y las rocas carbonatadas de la Formación Cuesta del Cura, relacionados con sistemas de skarn proximales y/o distales (Industrias Peñoles, 2010).

En la Sierra de Santa María, la mineralización más próxima al cuerpo de Santa María es Antares y ambos sistemas se encuentran separados por la denominada “Falla de Calcita” de cinemática normal (*Figura 82*). El primero de ellos se ubica en el bloque de techo y el segundo en el bloque de piso (Industrias Peñoles, 2010), por lo que Antares debió formarse a mayor profundidad que Santa María. Según González-Ambrocio (en preparación), en Antares la mineralogía de mena está dominada por pirrotina (>>pirita), arsenopirita, calcopirita, esfalerita con tendencia marmatítica, molibdenita y muy poca galena y sulfosales de plomo; además, no se restringe a la etapa retrógrada, sino que puede asociarse con fases como granate. Asimismo, este autor indica que en Antares se presenta un amplio desarrollo de exoskarn con abundante granate verde y marrón claro (proximal), wollastonita, clinopiroxeno y vesuvianita, y recurrentes zonas con alteración potásica de biotita (ausencia de adularia-cuarzo-sericita).

Sumado a lo anteriormente expuesto, González-Ambrocio (en preparación) indica que en Antares los isótopos de carbono, oxígeno y azufre exhiben valores mayoritariamente magmáticos, con poca influencia del encajonante calcáreo (*Figura 69 y 77*). Este comportamiento responde al hecho de que en la zona de Antares el sistema se desarrolló muy próximo a los pórfidos riolíticos (Industrias Peñoles, 2010) que por su mayor tamaño y naturaleza pudieron exsolver más fluidos metasomáticos que las estructuras satélites como el dique de Santa María, favoreciendo la cristalización de una mineralogía de alta temperatura, la cual preponderó en los estadios prógrado y retrógrado del sistema. Dada la cercanía entre los dos yacimientos, su relación con los cuerpos ígneos y sus características se infiere que Antares y Santa María fueron generados en la misma fase de magmatismo silíceo que afectó la Sierra de Santa María durante el Eoceno-Oligoceno. De este modo, ambos depósitos conforman un único edificio mineralizante, donde Santa María es el skarn distal y Antares el skarn proximal con respecto a la fuente de calor principal (pórfido riolítico; *Figura 82*), similar a lo presentado por Sillitoe (2010) en sistemas tipo pórfido $Cu\pm Au\pm Mo$ (*Figura 5, 82*).

Al suroeste del cuerpo de Santa María se localiza la zona de Los Azules, donde la mineralización se desarrolló en diseminaciones dentro de los diques (alaskíticos y traquíticos), reemplazamientos masivos, vetillas y *stockworks* que cortan a las rocas ígneas y las calizas (Gilmer *et al.*, 1988; Hernández, 1991). La mineralogía está dominada por una asociación de arsenopirita, galena, boulangerita, esfalerita, pirita, freibergita, calcopirita y pirrotina, acompañada por cuarzo, fluorita y calcita, y se ubica dentro de la zona de la arsenopirita (diseminación en pórfido; Gilmer *et al.*, 1988). Sus características mineralógicas y ocurrencia son similares a las de Santa María, y podría tratarse también de un cuerpo distal con respecto a los stocks félsicos del Complejo Intrusivo Velardeña. Cabe mencionar que existe muy poca bibliografía de los otros sectores mineralizados en la Sierra de Santa María y, por tanto, no se enfatiza en ellos.

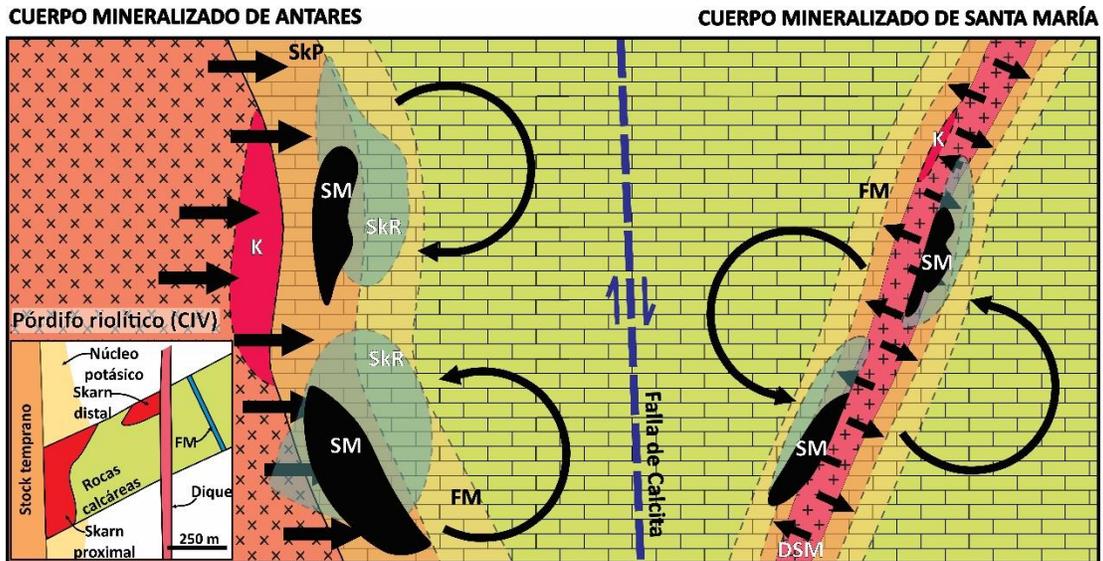


Figura 82. Representación esquemática de la relación entre los procesos evolutivos de los cuerpos de Antares y Santa María. Con fines comparativos, en la porción inferior izquierda del diagrama se muestra el modelo de Sillitoe (2010) para depósitos skarn proximales y distales en sistemas tipo pórfido de $\text{Cu}\pm\text{Au}\pm\text{Mo}$. En ese orden de ideas, Santa María sería el "skarn distal" y Antares el "skarn proximal". Abreviaturas: Figura 77.

Por su parte, en la sierra de San Lorenzo el yacimiento de Reyna del Cobre es un sistema de skarn desarrollado en el contacto entre un intrusivo y rocas de la Formación Cuesta del Cura. Allí, las rocas ígneas fueron clasificadas por Spurr y Garrey (1908) como dioritas-monzonitas, por Industrias Peñoles (2010) como pórfidos riolíticos correlacionables con los de la Sierra de Santa María y por Jiménez-Franco (2012) como monzogranitos. La mineralogía de mena en Reyna del Cobre se compone de calcopirita, pirita, esfalerita y galena, con una ganga de granate, clinopiroxeno, wollastonita, adularia, epidota, calcita, cuarzo, clorita, fluorita, siderita y barita (Jiménez-Franco, 2012). González-Partida (1994; en Jiménez-Franco, 2012) y Jiménez-Franco (2012) presentan datos microtermométricos de las etapas del yacimiento: 1) 352-640 °C y salinidad de 14-18,5 % en peso eq. NaCl para el fluido prístino; 2) 243-480 °C y 17-42% para la mineralización, correlacionable con 260-324 °C y 16,4-22,1 % en peso eq. NaCl de la fase retrógrada; 3) 100-186 °C y 12 a 21,5 % en peso eq. NaCl en estructuras vetiformes. El sistema químico dominante en las inclusiones fluidas es NaCl-H₂O y las temperaturas representan a las fases prógrada (1), retrógrada-mineralizante (2) y epitermal-vetiforme (3) del sistema.

El mejor desarrollo de la fase epitermal se encuentra en el área de Terneras (sierra de San Lorenzo), donde aparecen estructuras vetiformes conformadas por pirita, arsenopirita, galena, esfalerita, calcopirita, tetraedrita, jamesonita, covelina, estibina y oro nativo, asociadas con calcita y cuarzo (Pinet y Tremblay, 2009). Según Hoffmann (2003), la secuencia de depósito en esta localidad es: 1) pirita, arsenopirita, calcopirita y cuarzo; 2) galena, esfalerita, pirita y tetraedrita; 3) tetraedrita, covelina, oro nativo y cuarzo; 4) cuarzo, manganocalcita y escasos sulfuros; 5) calcita.

Al considerar lo expuesto con anterioridad, en la sierra de Santa María el cuerpo mineralizado de Antares es un sistema de skarn proximal con una firma magmática sobresaliente; en cambio, el área de Santa María, y posiblemente Los Azules, corresponde a un depósito distal con respecto a Antares, desarrollado en el dominio frágil, con influencia marcada de las rocas sedimentarias en su génesis y relacionado con diques aplíticos. Pinet y Tremblay (2009) indican que en la sierra de San Lorenzo los distintos tipos de mineralización son más o menos contemporáneos (skarns, *carbonate-hosted* y

epitermales), y se encuentran relacionados con cuerpos ígneos de composición intermedia que pudieron formarse durante el mismo evento magmático que aquellos en Santa María y, por tanto, ser aproximadamente coetáneos como sugirieron Spurr y Garrey (1908).

9 APLICACIONES A LA INDUSTRIA MINERA Y BENEFICIO A LA COMUNIDAD

La minería tiene un impacto social muy marcado porque representa una fuente importante de empleo y desarrolla beneficios para la comunidad, que pueden incluir talleres de retroalimentación, cursos, construcciones, tecnificación de instalaciones comunes, entre otras. Tal es el caso de Velardeña, donde la industria extractiva conforma uno de los principales renglones de la economía (SGM, 2018) y la Minera El Roble, filial de Industrias Peñoles, ha desarrollado distintos acercamientos con la población mediante centros comunitarios, que son espacios de integración social, convivencia y desarrollo en los que se imparten talleres de computación, cocina, inglés, superación personal, taekwondo, computación infantil, entre otros (Industrias Peñoles, 2018).

La caracterización de los yacimientos minerales y su evolución es invaluable para la industria minera, dado que permite establecer con mayor veracidad la ubicación y distribución de las zonas mineralizadas por medio del estudio de: las asociaciones minerales y texturales (Moncada *et al.*, 2012), las rutas de migración de los fluidos y su interacción con las entidades litológicas (Moon, 1991; Ault y Williams-Jones, 2004; Barker *et al.*, 2013), los halos de alteración hidrotermal generados (Barker *et al.*, 2013; Barker y Dipple, 2019), entre otras. Asimismo, la correcta caracterización del sistema mineralizante permite concebir una idea más clara e integral de la forma en que debe realizarse la exploración y explotación.

De este modo, a partir de la investigación en cuestión se puede aportar al conocimiento existente del yacimiento de Santa María y con ello abrir la puerta a nuevas posibilidades exploratorias empleando las distintas técnicas, como se presenta a continuación:

1. Dado que la mena se encuentra muy relacionada con minerales como cuarzo, clorita, adularia y fluorita, dentro de la etapa retrógrada del sistema (exoskarns no desarrollan mineralización económica), el enfoque exploratorio debe realizarse en las zonas dominadas por estas asociaciones.
2. La existencia de cobres grises con valores de Ag de hasta 31 % en peso en algunos sulfuros masivos, ratifica el potencial argentífero del yacimiento.
3. El hecho de que las inclusiones fluidas exhiban temperaturas elevadas en los dos estadios mineralizantes (masivo y vetilleo) indica que la fuente de los fluidos se mantuvo activa durante un tiempo prolongado. Esto abre la posibilidad de presentarse otros cuerpos mineralizados en cercanías de Santa María e incluso sistemas de otros tipos adyacentes o en profundidad (ej., mantos, chimeneas, *carbonate-hosted*, epitermales, pórfidos). Esta hipótesis se argumenta también por la escasa variación observada en los isótopos de azufre de ambas etapas, y la persistente afinidad magmática.
4. Las evidencias de ebullición, aunque puntuales, podrían relacionarse con zonas de bonanza en otros sectores del depósito (ej., porción superior o lateral del sistema). De este modo, se tendría que hacer un muestreo sistemático y un reconocimiento de texturas indicativas de desmezcla, para así ubicar la base de la ebullición donde recurrentemente se concentran mineralizaciones económicas en determinados sistemas (Moncada, 2008).

5. La localización de zonas con altas temperaturas registradas en los datos de microtermometría y geotermometría podría ayudar a delimitar los canales de migración de los fluidos mineralizantes y, así, definir las regiones de mayor potencial.
6. La presencia de Se en sulfosales accesorias debe tenerse en cuenta, dado que este elemento puede bioacumularse rápidamente y alcanzar niveles tóxicos para los organismos.
7. Las amplias variaciones en los valores de isótopos de oxígeno y carbono de muestras ubicadas en distintos sectores del yacimiento registran el paso de fluidos hidrotermales (Meinert *et al.*, 2005; Barker *et al.*, 2019). Por tanto, conociendo la distribución areal de estos datos a escala más regional se pueden delimitar las zonas afectadas por el hidrotermalismo y, con ello, los sectores más prospectivos.
8. Las edades reportadas para la etapa de mineralización en Santa María son muy similares a aquellas del skarn de Concepción del Oro en Zacatecas (Buseck, 1962), reforzando el potencial de los intrusivos cenozoicos encajados en las rocas de la Traversa de Parras.

Por lo tanto, aplicando los datos obtenidos en esta Tesis de Maestría a los métodos utilizados actualmente en Santa María, se podrían proponer nuevas metodologías para la exploración. Asimismo, teniendo en cuenta la utilidad de estos análisis en la industria, plantear otras estrategias para el reconocimiento de zonas productivas en otros sectores del distrito y en otras localidades del Sector Transversal de Parras.

10 CONCLUSIONES

El cuerpo mineralizado de Santa María forma parte del Distrito Minero de Velardeña en el estado de Durango, y representa un sistema de tipo skarn rico en Zn(-Pb-Ag), formado durante tres etapas principales: una prógrada, una retrógrada y un vetilleo tardío. Este depósito exhibe edades $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ en adularia de $37,47 \pm 0,13$ a $37,62 \pm 0,09$ Ma, aproximadamente correlacionables con aquellas de los cuerpos magmáticos del distrito ($33,1 \pm 1,4$ Ma), que registran el inicio de uno de los estadios climáticos del volcanismo silícico de la Sierra Madre Occidental, el cual generó múltiples yacimientos en el Sector Transversal de Parras.

La fase prógrada se formó por la circulación de fluidos metasomáticos de alta temperatura (>600 °C) desde los cuerpos magmáticos hacia las rocas calcáreas, permitiendo la cristalización de fases calcisilicatadas anhidras como granate (grosularia-andradita), wollastonita y vesubianita, diagnósticas de la parte alta de la facies hornfelsa-hornblenda. Este proceso tuvo su equivalente en las rocas ígneas, donde se generaron alteraciones de alta temperatura (alteración potásica).

El estadio retrógrado fue multiepisódico y se compone de asociaciones hidratadas de menor temperatura (anfíboles, epidota, zoisita-clinozoisita, micas, entre otros) y alteraciones pervasivas de adularia pseudoromboédrica-cuarzo-sericita, superpuestas a la etapa prógrada. Durante esta etapa se dio también el grueso de la precipitación metálica en dos pulsos: 1) esfalerita, pirita, pirrotina, arsenopirita, calcopirita, lillianita-gustavita, heyrovskyita-eskimoita, magnetita-wüstita y cobres grises (tetraedrita-freibergita); 2) galena, arsenopirita, cobres grises (hakita-tetraedrita-freibergita), pirita y marcasita. Esta mineralogía indica condiciones de pH neutro a ligeramente alcalino, fugacidades de oxígeno reductoras y sulfuración entre intermedia y baja.

Los datos microtermométricos sugieren que los fluidos pertenecen al sistema químico $\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2-\text{NaCl}-\text{CH}_4$ en los estadios de mineralización principal y vetilleo tardío, con salinidades totales ($\text{NaCl}+\text{CaCl}_2$) de 15 a 27 % en peso y de 15 a 34 % en peso, respectivamente. Asimismo, las

temperaturas obtenidas varían de 325 a 450 °C para ambas etapas, y se correlacionan muy bien con la geotermometría en arsenopirita (370-490 °C) y, parcialmente, en cobres grises (*ca.* 300 °C). No obstante, cobres grises representan normalmente un mineral tardío, de reemplazamiento y relleno, y su formación principal se dio cerca de los 170 °C.

Los datos isotópicos de $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ se ubican entre los campos de rocas ígneas y carbonatos marinos, mostrando la mayoría de ellos firmas mixtas. Este comportamiento evidencia la fuerte influencia que tuvieron las rocas sedimentarias en la formación del depósito. Por su parte, el azufre ($\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$) exhibe valores muy cercanos a cero, indicando una procedencia magmática, y su ligera dispersión podría relacionarse con la interacción con rocas sedimentarias.

Los fluidos mineralizantes corresponden a aguas magmáticas de alta temperatura que fueron enfriadas, reequilibradas y neutralizadas al circular por las rocas calcáreas, adquiriendo parte de sus firmas. Este argumento se basa en: 1) firmas sedimentarias en los isótopos de oxígeno y carbono, 2) leve dispersión en los isótopos de azufre, 3) presencia de metano termogénico en las inclusiones fluidas, y 4) mineralogía calcisilicatada ubicua. De allí que los principales mecanismos de precipitación metálica fueron enfriamiento conductivo, dilución y neutralización de los fluidos mineralizantes por la circulación y reacción con el encajonante, y por la interacción con posibles aguas connatas y/o de circulación profunda. Asimismo, Santa María representa la región distal de un único sistema mineralizante, donde Antares es la contraparte proximal con respecto a los pórfidos riolíticos, y ambos cuerpos pertenecen a la época metalogenética del Eoceno al Mioceno Temprano del centro y noroccidente de México.

11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ángeles-Villeda, M., Hinojosa-Espinosa, J., López-Oliva, J., Valdés-González, A., Livas-Vera, M., 2005, Estratigrafía y microfacies de la parte sur del Cañón La Boca, Santiago, Nuevo León, México: Revista Mexicana de las Ciencias Geológicas, 22(2), 272-281.
- Armstrong-Altrin, J., Madhavarajtu, J., Sial, A.N., Kasper-Zubillaga, J.J., Nagarajan, R., Flores-Castro, K., Rodríguez, J.L., 2011, Petrography and stable isotope geochemistry of the Cretaceous El Abra limestones (Actopan), Mexico: implication on diagenesis: Journal Geological Society of India, 77, 349-359.
- Ault, K.M., Williams-Jones, A.E., 2004, Sulfur and lead isotope study of the El Mochito Zn-Pb-Ag deposit: Economic Geology, 99, 1223-1231.
- Bacon, R.W., 1978, Geology of the northern Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México: University of Texas, Tesis de Maestría, 124, Arlington; en Barboza-Gudiño, J., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., Martínez-Macías, P., 2004, Aportaciones para la interpretación estratigráficas y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México.
- Baker, T., Van Acherberg, E., Ryan, C., Lang, J., 2004, Composition and evolution of ore fluids in a magmatic-hydrothermal skarn deposit: Geological Society of America, Geology, 32(2), 117-120.
- Bakker, R., 1999, Optimal interpretation of microthermometrical data from fluid inclusions: thermodynamic modelling and computer programming: Tesis de habilitación, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 1-54.
- Bakker, R., 2003, Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties: Chemical Geology, 194, 3-23.

- Barboza-Gudiño, J., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., Martínez-Macías, P., 2004, Aportaciones para la interpretación estratigráficas y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México: *Revista Mexicana de las Ciencias Geológicas*, 21(3), 299-319.
- Barker, S.L.L., Dipple, G.M., 2019, Exploring for carbonate-hosted ore deposits using carbon and oxygen isotopes: capítulo 8 en Decrée, S., Robb, L., *Ore Deposits: Origin, Exploration, and Exploitation*, American Geophysical Union.
- Barker, S.L.L., Dipple, G.M., Hickey, K.A., Lepore, W.A., Vaughan, J.R., 2013, Applying stable isotopes to mineral exploration: teaching an old dog new tricks: *Economic Geology*, 108, 1-9.
- Bose, E., 1906, Excursions dans les environs de Parras (Mexico): 10th International Geological Congress Mexico, Guidebook XXIII, en Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2013, Geological-mining monograph of the State of Durango.
- Browne, P.R., 1978, Hydrothermal alteration in active geothermal fields: *Annual Reviews Earth and Planetary Sciences*, 6, 229-250.
- Bryan, S., 2007, Silicic Large Igneous Provinces: Episodes, 30(1), 11.
- Burrows, R.H., 1910, Geology of Northern México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 7(1), 85-103; en Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2013, Geological-mining monograph of the State of Durango.
- Burt, D., 1977, Mineralogy and petrology of skarn deposits: *Società Italiana di Mineralogia e Petrologia*, 33(2), 859-873.
- Burt, D., 1982, Skarn deposits-historical bibliography through 1979. *Economic Geology*, 77, 755-763.
- Buseck, P., 1966, Contact metamorphism and ore deposition-Concepción del Oro, Mexico: *Economic Geology*, 61(1), 97-136.
- Buzatu, A., Damian, G., Dill, H., Buzgar, N., Apopei, A., 2015, Mineralogy and geochemistry of sulfosalts from Baia Sprie ore deposit (Romania)-New bismuth minerals occurrence: *Ore Geology Reviews*, 65, 132-147.
- Camprubí, 2013, Tectonic and metallogenetic history of Mexico: *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 17, 201-243.
- Camprubí, A., Albinson, T., 2007, Epithermal deposits in México-Update of current knowledge, and an empirical reclassification: *Geological Society of America, special paper* 422, 377-415.
- Camprubí, A., Centeno-García, E., Tolson, G., Iriondo, A., Ortega, B., Bolaños, D., Abdullin, F., Portugal-Reyna, J., Ramos-Arias, M., 2018, Geochronology of Mexican mineral deposits. VII: the Peña Colorada magmatic-hydrothermal iron oxide deposits (IOCG "clan"), Colima. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 633-674.
- Chappell, B.W., Fleming, P., 2001, S-type Granites and Related Rocks: *Australian Geological Survey Organisation Record*, 104.
- Chappell, B.W., White, A.J., 1974, Two contrasting granite types: *Pacific Geology*, 8, 173-174.
- Chaussidon, M., Lorand, J.P., 1990: Sulfur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariège (North-Eastern Pyrenees, France): An ion microprobe study: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 2835-2846.
- Chi, G., Ni, P., 2007, Equations for calculation of NaCl/(NaCl+CaCl₂) ratios and salinities from hydrohalite-melting and ice-melting temperatures in the H₂O-NaCl-CaCl₂ system: *Acta Petrologica Sinica*, 23, 33-37.
- Chu, H., Chi, G., Chou, M., 2016, Freezing and melting behaviours of H₂O-NaCl-CaCl₂ solutions in fused silica capillaries and glass-sandwiched films: implications for fluid inclusion studies: *Geofluids*, 16, 518-532.
- Clark, L., 1960, The Fe-As-S system: phase relations and applications: *Economic Geology*, 55, 1345-1381.

- Cooke, D., Simmons, S., 2000, Characteristics and genesis of epithermal gold deposits: *SEG Reviews*, 13, 221-244.
- Coplen, T.B., 1988, Normalization of oxygen and hydrogen isotope data. *Chemical Geology*, 72, 293-297.
- Coplen, T.B., Brand, W.A., Gehre, M., Gröning, M., Meijer, H.A.J., Toman, B., Verkouteren, R.M., 2006, New guidelines for $\delta^{13}\text{C}$ measurements. *Analytical Chemistry*, 78, 2439-2441.
- Corbett, G., Leach, T., 1997, Southwest Pacific Rim gold-copper systems: structure, alteration and mineralization: Short course manual.
- Corriveau, L., 2007, Iron oxide copper-gold deposits: A Canadian perspective, in mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces and exploration methods: Geological Association Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, 307-328.
- Corriveau, L., Gorton, M.P., 1993, Coexisting K-rich alkaline and shoshonitic magmatism of arc affinities in the Proterozoic: A reassessment of syenitic rocks in the southwestern Grenville Province: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113, 262-279.
- Cruz-Pérez, R., López-Escalona, J., 1981, Estudio geológico-minero de las sierras de Santa María y San Lorenzo, municipio de Cuencamé, estado de Durango: Consejo de Recursos Minerales, Gerencia de Exploración Geológica. Durango.
- Davis, D., Lowenstein, T., Spencer, R., 1990, Melting behaviour of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O, and NaCl-CaCl₂-H₂O: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 591-601.
- Dunham, R.J., 1962, Classification of carbonate rocks according to depositional texture: *American Association of Petroleum Geologists*, 1, 108-121.
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García, M., Marrett, R., 2000, Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 1-26.
- Einaudi, M.T., Burt, D., 1982, A special issue devoted to skarn deposits; Introduction-terminology, classification and composition of skarn deposits: *Economic Geology*, 77, 745-754.
- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W., Inan, E.E., 2003, Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transitions from porphyry to epithermal environments; en Simmons, S.F., Graham, I.J., Volcanic, geothermal and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth: *Society of Economic Geologists Special Publication*, 10, Chapter 15, 285-313.
- Etioppe, G., Sherwood-Lollar, B., 2013, Abiotic methane on Earth: *American Geophysical Union, Reviews on Geophysics*, 51, 276-299.
- Felder, F., 1979, Estudio de algunas estructuras mineralizadas en el domo de Santa María, Velardeña, Durango: Asociación de Ingenieros de Minas y Metalurgistas Geólogos de México, Convención Nacional, XIII, Acapulco, Memoir, 192-224; en Gilmer, A., Clark, K., Conde, J., Hernández, I., Figueroa, J., Porter, E., 1988, Sierra de Santa María, Velardeña Mining District, Durango, Mexico: *Economic Geology*, 83, 1802-1829.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S., López-Martínez, M., Silva-Fragoso, A., 2018, Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift: *Earth Science Reviews*, 183, 115-152.
- Fitz-Díaz, E., Hudleston, P., Siebenaller, L., Kirschner, D., Camprubí, A., Tolson, G., Pi Puig, T., 2011, Insights into fluid flow and water-rock interaction during deformation of carbonate sequences in the Mexican fold-thrust belt: *Journal of Structural Geology*, 33, 1237-1253.

- Fitz-Díaz, E., Lawton, T., Juárez-Arriaga-E., Chávez-Cabello, G., 2018, The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, Basin development, magmatism and tectonics: *Earth Science Reviews*, 183, 56-84.
- Fries, C., Hibbard, C., Dunkle, D., 1955, Early Cenozoic vertebrates in the red conglomerate at Guanajuato, Mexico: *Smithsonian Miscellaneous Collections*, publicación 4181, 123(7).
- Garduño-Monreal, V.H., Zaldívar, J.R., 1983, Una nueva localidad en Durango del Basamento Paleozoico y su Cubierta Mesozoica, dentro del flanco Oriental de la Sierra Madre Occidental.
- Gilmer, A., Clark, K., Conde, J., Hernández, I., Figueroa, J., Porter, E., 1988, Sierra de Santa María, Velardeña Mining District, Durango, Mexico: *Economic Geology*, 83, 1802-1829.
- Hedenquist, J., Arribas, A., González-Urien, E., 2000, Exploration for epithermal gold deposits: *SEG Reviews*, 15, 245-277.
- Henry, C.D., Aranda-Gómez, J.J., 2000, Plate interactions control middle-late Miocene proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range: *Tectonophysics*, 318, 1-26.
- Hernández, C., 1991, Economic geology of the Velardeña Mining District, Durango; en Salas, G., *Geology of North America-The Geology of Mexico: The Geological Society of America*, P-3, 269-278.
- Hoefs, J., 2009, *Stable Isotope Geochemistry*: Ed. Springer Verlag, 285; en Demir, Y., Dişli, A., Fluid inclusion and stable isotope constraints (C, O, H) on the Dağbaşı Fe-Cu-Zn skarn mineralization (Trabzon, NE Turkey); *Ore Geology Reviews*, 116, 1-22.
- Hoffmann, E., 2003, Le système de veines épithermales et de failles normales au sein de la propriété Velardeña, Mexique: analyse structurale et métallogénique: Tesis de Maestría, Université du Québec, Canadá.
- Hofstra, A., Cline, J., 2000, Characteristics and models for Carlin-type gold deposits: *SEG Reviews*, 15, 163-220.
- Imlay, R.W., 1936, Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico, *Geology of the western part of the Sierra de Parras: Bulletin of the Geological Society of America*, 75, 1091-1152.
- Imlay, R.W., 1937, *Geology of the Middle Part of the Sierra de Parras Coahuila, México: Geological Society of America Bulletin*, 48, 587-630.
- Industrias Peñoles, 2010, Estudio de prefactibilidad del Proyecto Velardeña. Torreón.
- Industrias Peñoles, 2018, Informe de desarrollo sustentable.
- Irvine, T., Baragar, W., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548.
- Ishihara, S., 1977, The Magnetite-series and Ilmenite-series granitic rocks: *Mining Geology*, 27, 293-305.
- Ivanyuk, G.Y., Kalashnikov, A.O., Pakhomovsky, Y.A., Bazai, A.V., Goyainov, P.M., Mikhailova, J.A., Yakovenchuk, V.N., Konopleva, N.G., 2017, Subsolidus evolution of the magnetite-spinel-ulvöspinel solid solutions in the Kovdor Phoscorite-carbonatite complex, NW Russia: *Minerals*, 7, 215-243.
- Jiménez-Franco, A., 2012. Estudio de la paragénesis, inclusiones fluidas e isotopía de azufre del skarn de Velardeña, Durango. Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias de La Tierra, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Jiménez-Franco, A., Canet, C., Alfonso, P., González-Partida, E., Rajabi, A., Escalante, E., 2020, The Velardeña Zn-(Pb-Cu) skarn-epithermal deposits, central-northern Mexico: new physical-chemical constraints on ore-forming processes: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(3), 1-26.
- Kelly, W.A., 1936, *Geology of the mountains bordering the valleys of Acatita and Las Delicias: Geological Society of America Bulletin*, 47, 1009-1038

- Kouzmanov, K., Pokrovski, G., 2012, Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu-(Au-Mo) systems: Society of Economic Geologists Special Publications, 16, 573-618.
- Kretschmar, U., Scott, S.D., 1976, Phase relation involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application: The Canadian Mineralogist, 14, 364-386.
- Kuiper, K.F., Deino, A., Hilgen, F.J., Krijgsman, W., Renne, P.R., Wijbrans, J.R., 2008, Synchronizing rocks clocks of Earth history: Science, 320, 500-504.
- Kuiper, Y.D., 2002, The interpretation of inverse isochron diagrams in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology: Earth and Planetary Science Letters, 203, 499-506.
- Kwak, T., 1987, W-Sn Skarn Deposits, and Related Metamorphic Skarns and Granitoids. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Lee, J.K., 2014, Ar-Ar and K-Ar Dating: Encyclopedia of Scientific Dating Methods, Springer.
- Lehmann, C., Osleger, D., Montañez, I., Sliter, W., Arnaud-Vanneau, A., Banner, J., 1999, Evolution of Cupido and Coahuila carbonate platforms, Early Cretaceous, northeastern Mexico: Geological Society of America Bulletin, 111(7), 1010-1029.
- Levich, R.A., 1973, Geology and ore deposits of the Sierra de Santa Maria, Velardeña, Durango, Mexico: Unpub. M.S. thesis, Austin, University Texas, 148 p., en Gilmer, A., Clark, K., Conde, J., Hernández, I., Figueroa, J., Porter, E., 1988, Sierra de Santa María, Velardeña Mining District, Durango, Mexico: Economic Geology, 83, 1802-1829.
- Levesse, G., Gonzalez-Partida, E., Tritlla, J., Camprubí, A., Cienfuegos-Alvarado, E., Morales-Puente, P., 2003, Fluid characteristics of the world-class carbonate hosted Las Cuevas fluorite deposit (San Luis Potosí, Mexico): Journal of Geochemical Exploration, 78-79, 537-543.
- Libbey, R.B., Williams-Jones, A-E., Compositions of hydrothermal silicates and carbonates as indicators of physicochemical conditions in the Reykjanes geothermal system, Iceland: Geothermics, 64, 15.27.
- Liou, J.G., 1972, Synthesis and stability relations of epidote, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{FeSi}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$: Journal of Petrology, 14(3), 381-413.
- McCrea, J.M., 1950, On the isotopic chemistry of carbonates and paleotemperature scale: Journal of Chemical Physics, 18, 849-857.
- McDougall, I., Harrison, T.M., 1999, Geochronology and thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method, 2nd edition: Oxford University Press. Oxford.
- McDowell, F., Keizer, R.P., 1977, Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlán, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 88, 1479-1487.
- Megaw, P., Ruiz, J., Titley, S., 1988, High temperature, carbonate-hosted Ag-Pb-Zn-(Cu) deposits of northern Mexico: Economic Geology, 83, 1856-1885.
- Meinert, L., 1982, Skarn, manto, and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea Mining District, Sonora, Mexico: Economic Geology, 77, 919-949.
- Meinert, L., 1992, Skarn and skarn deposits: Geoscience Canada, 19(4), 145-162.
- Meinert, L., Dipple, G., Nicolescu, S., 2005, World skarn deposits: Economic Geology 100th Anniversary Volume, 299-336.
- Min, G., Mundi, R., Renne, P.R., Ludwig, K., 2000, A test for systematic errors in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology through comparison with U/Pb analysis of a 1.1-Ga rhyolite: Geochimica et Cosmochimica acta, 64(1), 73-98.
- Misra, K., 2000, Understanding Mineral Deposits: Kluwer Academic Publishers.
- Moncada, D., Mutchler, S., Nieto, A., Reynolds, T.J., Rimstidt, J.D., Bodnar, R.J., Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration: Journal of Chemical Exploration, 114, 20-35.

- Moncada, J.D., 2008, Application of fluid inclusion and mineral textures in exploration for epithermal precious metal deposits: MSc thesis, Virginia Polytechnic Institute and Virginia State University, Blacksburg, Virginia.
- Moon, K.J., 1991, Application of fluid inclusion in mineral exploration: *Journal of Geochemical Exploration*, 42, 205-221.
- Murakami, H., 2005, How to study skarn type deposits: Short term seminar at Remote Sensing Center, MTA.
- Nadoll, P., 2011, Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks - Case studies from the Proterozoic Belt Supergroup, Cu-Mo-porphyry + skarn and Climax-Mo deposits in the western United States: Tesis de doctorado, University of Auckland.
- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J., French, D., Walshe, J., 2014, The chemistry of hydrothermal magnetite: A review: *Ore Geology Reviews*, 61, 1-32.
- Newberry, R., Swanson, S., 1986, Scheelite skarn granitoids-an evolution of the roles of magmatic source and process: *Ore Geology Reviews*, 1, 57-81.
- Nieto-Samaniego, A., Alaniz-Álvarez, S., Camprubí, A., 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 285-318.
- Ohmoto, H., 1972, Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits: *Economic Geology*, 67, 551-578.
- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldán-Quintana J., Aranda-Gómez, J. J., Morán-Zenteno, D., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., 1992, Carta geológica de la República Mexicana, Quinta Edición, Escala 1:2 000 000: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; y Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, consejo de Recursos Minerales, 74.
- Pinet, N., Tremblay, A., 2009, Structural analysis of the Velardeña minning district, Mexico: a faulted Au-Ag-rich hydrothermal system: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 46, 123-138.
- Potter, J., Konnerup-Madsen, J., 2003, A review on the occurrence and origin of abiogenic hydrocarbons in igneous rocks, en Petford, N., McCagrey, K.J., 2003, *Hydrocarbons in Crystalline Rocks: Geological Society of London, Special Publications*, 214, 151-173.
- Ramdohr, P., 1969, *The Ore Minerals and Their Intergrowths*: Pergamon Press.
- Ramírez-Peña, C., 2014, Análisis del contexto tectónico del emplazamiento de intrusivos en el transpaís de la Sierra Madre Oriental: Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría, 189. Linares, Nuevo León.
- Ren, T., Zhong, H., Zhang, X.C., 2020, Fluid inclusion and stable isotope (C, O and S) constraints on the genesis of high-grade Langdu Cu skarn deposits in Yunnan, SW China: *Ore Geology Reviews*, 118, 1-13.
- Révész, K.M., Landwehr, J.M., 2002, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopic composition of CaCO_3 measured by continuous flow isotope ratio mass spectrometry statistical evaluation and verification by application to Devils Hole Core DH-11 Calcite: *Rapid Communication in Mass Spectrometry*, 16, 2102-2114.
- Révész, K.M., Landwehr, J.M., Keybl, J., 2001, Measurement of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopic ratios of CaCO_3 using a Thermoquest Finnigan Gas Bench II Delta Plus XL continuous flow isotope ratio mass spectrometer with application to Devils Hole core DH-11 calcite: United States Geological Survey, Open-File Report, 01-257.
- Roedder, E., 1984, *Fluid Inclusions: Reviews in Mineralogy*, 12, Mineralogical Society of America, Washington.
- Rogers, C.L., De Cerna Z., Vloten Van, R., Tavera, A.E., Ojeda-Rodríguez. J., 1961, Reconocimiento geológico y depósitos de fosfatos del norte De Zacatecas y áreas adyacentes en Coahuila,

- Nuevo León y San Luis Potosí, Consejo de Recursos Naturales No Renovables (México), 56, 332.
- Rollinson, H., 1993, *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*: Pearson Education Limited, Edinburgo.
- Rye, R., Ohmoto, H., 1974, Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: a review; *Economic Geology*, 69, 826-842.
- Sack, R., 2005, Internally consistent database for sulfides and sulfosalts in the system $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Cu}_2\text{S}-\text{AsS}-\text{FeS}-\text{Sb}_2\text{S}_3-\text{As}_2\text{S}_3$: Update: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(5), 1157-1164.
- Sack, R., Fredericks, R., Hardy, L., Ebel, D., 2005, Origin of high-Ag fahlores from the Galena Mine, Wallace, Idaho, USA: *American Mineralogist*, 90, 1000-1007.
- Sakai, H., 1968, Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes: *Geochemical Journal*, 2, 29-49.
- Salvi, S., Williams-Jones, A., 1996, Fischer-Tropsch synthesis of hydrocarbons during sub-soludis alteration of the Strange Lake peralkaline granite, Quebec/Labrador, Canada: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(1), 83-99.
- Seal, R.R., 2006, Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61, 633-677.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1997, Carta geológico-minera Velardeña G13-D44. Escala 1:50.000. Pachuca.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2013, Geological-mining monograph of the State of Durango.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2018, Panorama minero del Estado de Durango.
- Shanks, W., 2006, Stable Isotope Geochemistry of Mineral Deposits: sección 13,3 en Turekian, K., Holland, H., *Treatise on Geochemistry*, 2nd Edition, Elsevier.
- Sharp, Z., Essene, E., Kelly, W., 1985, A re-examination of the arsenopyrite geothermometer: pressure considerations and applications to natural assemblages: the Canadian *Mineralogist*, 23, 517-534.
- Sheppard, S.M., 1984, Isotope geothermometry, en Lagache, M., 1984, *Thermométrie et Barométrie Géologiques*, Société Française de Minéralogie et de Cristallographie, 349-412.
- Shimazaki, H., Sakai, H., 1984, regional variation of sulfur isotopic composition of skarn deposits in the westernmost part of the inner zone of southwestern Japan: *Mining Geology*, 34(6), 419-424.
- Shimazaki, H., Yamamoto, M., 1979, Sulfur isotope ratios of some Japanese skarn deposits: *Geochemical Journal*, 13, 261-268.
- Sillitoe, R., 2010, Porphyry copper systems: *Economic Geology*, 105, 3-41.
- Simmons, S.F., White, N.C., John, D.A., 2005, Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits: *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume, 485-522.
- Solé, J., Salinas, J.C., González-Torres, E., Cendejas-Cruz, J.E., 2007, Edades K/Ar de 54 rocas ígneas y metamórficas del occidente, centro y sur de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(1), 104-119.
- Sosa-Valdés, R., 2011, Geocronología U-Pb del Cinturón de Intrusivos de Concepción del Oro: Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, 117; en Ramírez-Peña, C., 2014, Análisis del contexto tectónico del emplazamiento de intrusivos en el transpaís de la Sierra Madre Oriental: Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría, 189. Linares, Nuevo León.
- Spurr, J., Garrey, G., 1908, Ore-deposits of the Velardeña District, Mexico: *Economic Geology*, 3, 688-725.

- Spycher, N., Reed, M., 1989, Evolution of a Broadlands-type epithermal ore fluid along alternative P-T paths: implications for the transport and deposition of base, precious and volatile metals: *Economic Geology*, 84, 328-359.
- Steele-MacInnis, M., Ridley, J., Lecumberri-Sánchez, P., Schlegel, T., Heinrich, C., 2016, Application of low-temperature microthermometric data for interpreting multicomponent fluid inclusion compositions: *Earth Science Reviews*, 159, 14-35.
- Steiner, A., 1970, Genesis of hydrothermal K-feldspar (adularia) in an active geothermal environment at Wairakei, New Zealand: *Mineralogical Magazine*, 37(292), 916-922.
- Stinnesbeck, W., 1983, Sobre una fauna de amonites de la Formación Cuesta del Cura (Albiano Superior-Cenomaniano Inferior) de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México: *Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León*, 8, 129-132; en Barboza-Gudiño, J., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., Martínez-Macías, P., 2004, Aportaciones para la interpretación estratigráficas y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México.
- Tardy, M., Sigal, J., Glacon, G., 1974, Bosquejo sobre la estratigrafía y la paleogeografía de los flysch cretácicos del sector transversal de Parras, Sierra Madre Oriental, México: *Serie Divulgación 2, Universidad Autónoma Nacional de México, Instituto de Geología*, 12-28.
- Van den Kerkhof, A.M., Hein, U.F., 2001, Fluid inclusion petrography: *Lithos*, 55, 27-47.
- Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., Bruckschen, P., Buhl, D., Bruhn, F., Carden, G.A.F., Diener, A., Ebner, S., Godderis, Y., Jasper, T., Korte, G., Pawellek, F., Podlaha, O.G., Strauss, H., 1999, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater: *Chemical Geology*, 161, 59-88.
- Villarreal-Fuentes, J., 2007, Depósitos de celestina en la zona de Los Alamitos, estado de Coahuila: un ejemplo de mineralización tipo MVT: *Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, Tesis de Maestría*, 94. Juriquilla-Querétaro.
- Welhan, J., 1988, Origins of methane in hydrothermal systems: *Chemical Geology*, 71, 183-198.
- White, N., Hedenquist, J., 1990, Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes, and guidelines for exploration: *Journal of Geochemical Exploration*, 36, 445-474.
- Wilkinson, J.J., 2001, Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits: *Lithos*, 55, 229-272.
- Xu, G., 2000, Fluid inclusions with NaCl-CaCl₂-H₂O composition from the Cloncurry hydrothermal system, NW Queensland, Australia: *Lithos*, 21-35.
- Zamora-Vega, O., Richards, J., Spell, T., Dufrane, A., 2018, Multiple mineralization events in the Zacatecas Ag-Pb-Zn-Cu-Au district, and their relationship to the tectonomagmatic evolution of the Mesa Central, Mexico: *Ore Geology Reviews*, 102, 519-561.
- Zhang, W., Williams-Jones, A., Leng, C., Zhang, X.C., Chen, T.C., Qin, C.J., Su, W.C., Yan, J.H., 2019, The origin of CH₄-rich fluids in reduced porphyry-skarn Cu-Mo-Ay systems, *Ore Geology Reviews*, 114, 1-17.
- Zhao, Y., Dong, Y., Li, D., Bi, C., 2003, Geology, mineralogy, geochemistry, and zonation of the Bajiazi dolostone-hosted Zn-Pb-Ag skarn deposit, Liaoning Province, China: *Ore Geology Reviews*, 23, 153-182.
- Zheng, Y., Hoefs, J., 1993, Carbon and oxygen isotope covariations in hydrothermal calcites: theoretical modeling on mixing processes and application to Pb-Zn deposits in the Harz Mountains, Germany: *Mineralium Deposita*, 28, 79-89.
- Zürcher, L., Ruiz, J., Barton, M.D., 2000, Paragenesis, elemental distribution and stable isotopes at the Peña Colorada iron skarn, Colima, México: *Economic Geology*, 96, 535-557.

12 ANEXOS

12.1 Descripción macroscópica y microscópica

SM-42-1

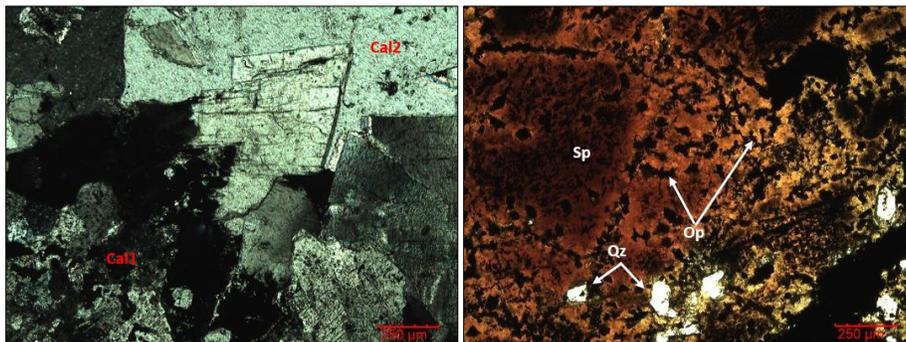
Descripción macroscópica

Zona de sulfuros masivos conformada principalmente por calcopirita, pirita, galena y esfalerita marrón oscura. Rellenando intersticios de la mena, se observan carbonatos y cuarzo. Cortando, se hallan venas y vetillas discontinuas, de espesores inferiores a 3,5 cm y ligeramente brechadas, conformadas enteramente por carbonatos de color blanco y semitraslúcido, con desarrollos puntualmente drusiformes, las cuales muestran escasa mineralización de pirita en bandas sinuosas y muy delgadas.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Esfalerita	Masiva	Enferma	Anhedral
Opacos	Masiva		Subhedral
Calcita	Masiva (rellenos), vetillas tardías, agregados		Euhedral a anhedral
Cuarzo	Inclusiones en sulfuros y diseminada		Euhedral a subhedral
Turmalina	Agregados, inclusiones, diseminada		Subhedral a euhedral
Clorita	Agregados		Anhedral
Moscovita	Inclusiones en Sp, agregados		Subhedral

Sulfuro masivo compuesto principalmente por esfalerita y pirita, minerales que se encuentran en estrecha asociación con calcita terrosa, turmalina, cuarzo, moscovita y clorita, muchos de los cuales se ubican normalmente en los intersticios de los sulfuros. Asimismo, se aprecian rellenos tardíos de calcita masiva y limpia, y vetillas ligeramente tardías de calcita terrosa que cortan los sulfuros. La esfalerita muestra una clara zonación composicional y textura enferma.



Izq. Calcita (Cal2) masiva de aspecto limpio y calcita (Cal1) de grano más fino y apariencia terrosa. Der. Cristales masivos de esfalerita (Sp) con zonación marcada, entre núcleos ricos en Fe y bordes pobres en este elemento. Este mineral contiene abundantes inclusiones de opacos (Op) y cuarzo (Qz).

SM-42-2

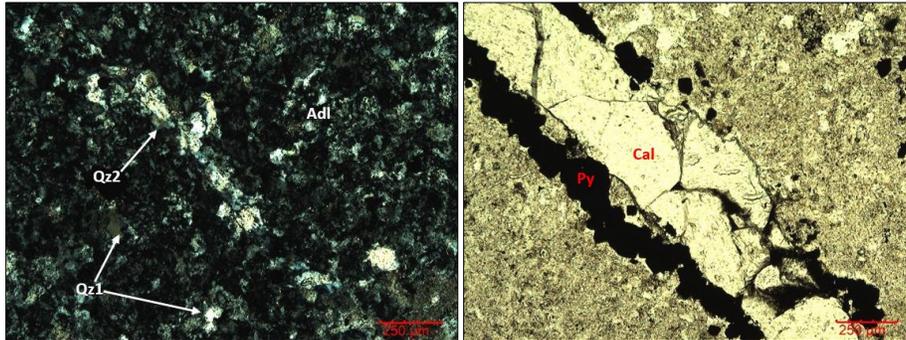
Descripción macroscópica

Aplita con silicificación pervasiva que le otorga el color grisáceo-blanquecino a la roca, la cual conserva aparentes relictos de cristales de plagioclasa, algunos de ellos tabulares. Diseminados en la roca se aprecian agregados y cristales individuales de pirita y calcopirita. Cortando, se observa un *stockwork* de vetillas de carbonato con minerales metálicos (calcopirita-pirita) hacia los bordes, discontinuas y rectilíneas, con desarrollo de cristales euhedrales con texturas drusiformes en cavidades. Oxidación de sulfuros produce manchones de óxidos de Fe.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Cuarzo	Agregados, vetillas		Anhedral
Adularia	Pervasiva		Anhedral
Calcita	Vetillas, parches, agregados diseminados		Anhedral
Epidota	Diseminada		Anhedral
Óxidos de Fe	Reemplazamiento		Anhedral
Sericita	Agregados		Anhedral
Apatito	Diseminada		Euhedral

Roca con alteración adularia-cuarzo pervasiva, con obliteración total de su textura y composición originales, conformada enteramente por cuarzo, adularia y parches de calcita. Cortando, se encuentran vetillas continuas, rectilíneas y sinuosas, de cuarzo y calcita-pirita. Por último, se observa oxidación parcial de pirita.



Izq. Alteración pervasiva (adularia-cuarzo) de la roca, que obliteró completamente las características originales. Se aprecian agregados de adularia (Adl) con bordes difusos, en asociación con cuarzo (Qz1). Cortando, se aprecia una vetilla de cuarzo (Qz2). Der. Vetillas de calcita (Cal) cuyos bordes se componen de minerales opacos, que por sus formas parece tratarse de pirita (Py). Estas estructuras cortan a la roca, que muestra un aspecto terroso por reemplazamiento incipiente de los feldespatos de la alteración.

SM-42-3

Descripción macroscópica

Contacto entre mármol de color gris medio, y brecha cuya matriz se compone por cristales gruesos de carbonato de color blanco y los clastos son de rocas indiferenciadas de color beige con fuerte alteración argílica. Los minerales de mena (pirita) se presentan diseminados en ambas litologías, a manera de pequeños clústeres y como cristales individuales.

SM-42-4

Descripción macroscópica

Brecha clastosoportada conformada por matriz de carbonatos blanquecinos de grano grueso y grisáceos de grano más fino, estos primeros con desarrollos drusiformes locales donde se aprecian translúcidos y euhedrales. Los clastos son de color gris medio y se trata de mármoles de grano fino, algunos de ellos con aparente silicificación. Los minerales de mena aparecen en muy bajos porcentajes y son pirita-calcopirita, que se hallan diseminados indistintamente.

SM-42-5

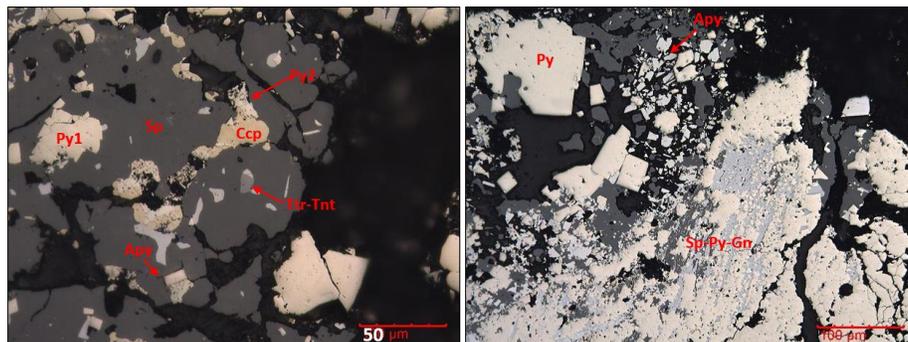
Descripción macroscópica

Contacto entre brecha con matriz de carbonato blanco y clastos grisáceos, y aparente cuerpo de sulfuros masivos de grano muy fino. En este contacto, se observa un sector alargado conformado casi enteramente por calcopirita-pirita-esfalerita (?), que contrasta con el extremo opuesto de la brecha, en el que los sulfuros son más gruesos y de carácter no untuoso. Cortando, se aprecian vetillas y venas con espesores muy variables y no mayores de 1,5 cm, compuestas por carbonato grisáceo, que brechan parcialmente a los sulfuros y contienen pequeñas pátinas de oxidación.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Pirita	Brechada	Ojo de pájaro	Anhedral a euhedral
Esfalerita	Brechada	Enferma	Anhedral
Galena	Intersticial		Anhedral
Arsenopirita	Inclusiones, agregados		Subhedral a euhedral
Calcopirita	Diseminada		Anhedral
Tetraedrita-tenantita	Inclusiones en Sp		Anhedral
Marcasita	Agregados, reemplazamiento		Anhedral

Sulfuro masivo conformado principalmente por pirita y esfalerita de textura brechada, aparentemente por la entrada de carbonato; con inclusiones de galena, arsenopirita y calcopirita, minerales que también componen rellenos tardíos (previos al brechamiento). La esfalerita, muestra gran abundancia de inclusiones de pirita, galena, arsenopirita y lo que tetraedrita-tenantita, y localmente exhibe textura enferma. Por su parte, la pirita puede mostrar inclusiones de galena y arsenopirita, intercrecimientos con esfalerita y galena, y textura ojo de pájaro.



Izq. Tetraedrita-tenantita (Ttr-Tnt) como inclusión en esfalerita (Sp), en cercanía de calcopirita (Ccp) y pirita fina (Py2). Adicionalmente, se aprecian cristales de pirita (Py1) y arsenopirita (Apy). Der. Intercrecimientos

entre esfalerita-pirita-galena (Sp-Py-Gn). Véanse además cristales subhedrales de pirita (Py) y arsenopirita (Apy).

SM-42-6

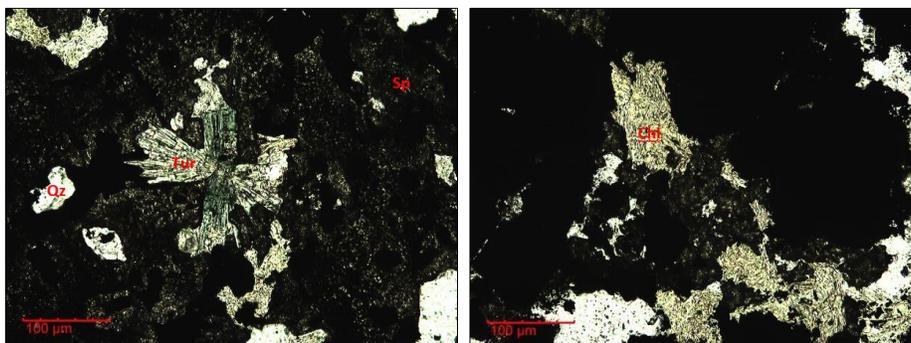
Descripción macroscópica

Cuerpo de sulfuros masivos, correspondientes a pirita con menores cantidades de esfalerita y calcopirita. Cortando, aparecen vetillas discontinuas y rectilíneas de color blanco, compuestas enteramente por carbonatos.

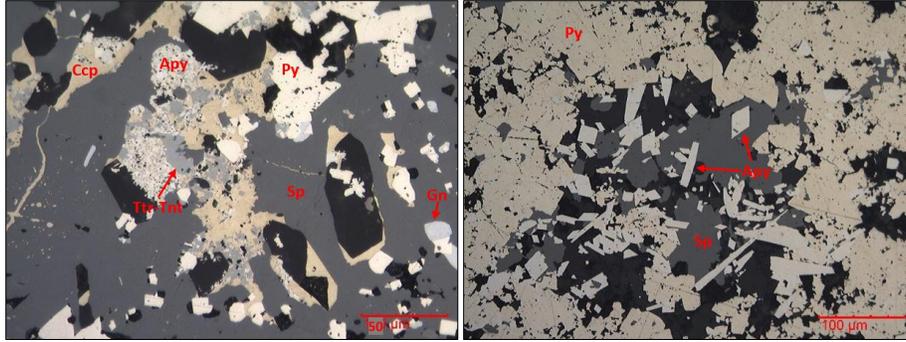
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Esfalerita	Masiva	Enferma	Anhedral
Pirita arseniosa	Masiva		Subhedral
Calcopirita	Exsolución, rellenos	Intersticial	Anhedral
Arsenopirita	Inclusiones en Py		Subhedral a euhedral
Galena	Inclusiones en Sp	Intersticial	Anhedral
Tetraedrita-tenantita	Inclusiones en Sp		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Py		
Marcasita	Reemplazamiento, agregados		Anhedral
Turmalina	Acicular radial		Euhedral
Cuarzo	Inclusiones en Sp		Euhedral
Calcita		Intersticial	Anhedral
Clorita			

Sulfuro masivo conformado primordialmente por pirita y esfalerita, con menores cantidades de arsenopirita, calcopirita y galena. Por las relaciones texturales que muestran los minerales de mena, parecen haberse formado durante un mismo evento. Adicionalmente, se encuentran enjambres de un turmalina radial y cristales euhedrales de cuarzo en asociación cercana con la mena. Asimismo, se hallan rellenos de clorita y calcita.



Izq. Interpenetraciones de agregados radiales de turmalina (Tur) y esfalerita (Sp). Véanse también las inclusiones de cuarzo (Qz) en la esfalerita. Der. Rellenos de clorita (Chl) entre los minerales de mena.



Izq. Cristales de esfalerita (Sp), calcopirita (Ccp), arsenopirita (Apy), galena (Gn), tetraedrita-tenantita (Ttr-Tnt) y pirita (Py). Der. Agregados de arsenopirita (Apy) euhedral, asociada con esfalerita (Sp) y pirita (Py).

SM-42-7

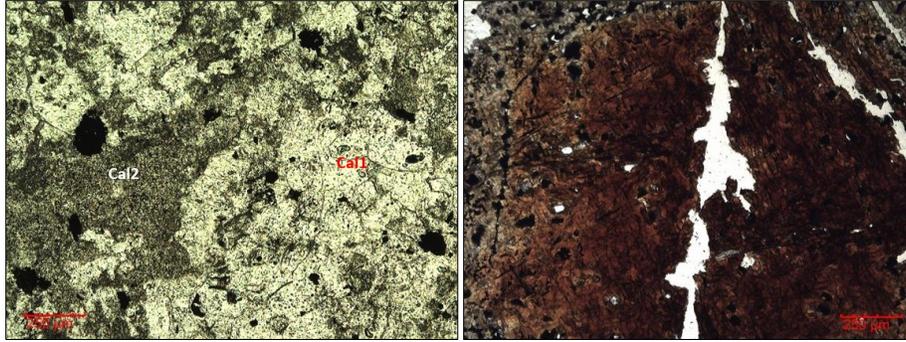
Descripción macroscópica

Brecha matrizsoportada conformada por clastos menores a 1 cm del cuerpo masivo de sulfuros (pirita predomina), embebidos en una matriz de color gris claro a medio, con parches blancos, cuya composición es casi exclusivamente carbonatos. Cortando, se aprecia una vena de entre 1 y 3 cm de espesor, conformada por carbonatos blancos, estéril.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Calcita	Masiva (vena), agregados, empalizada, flameante, vetillas		Anhedral
Esfalerita	Diseminada, clastos		Anhedral
Cuarzo	Agregados, rellenos, microcristalina		Anhedral
Pirita	Diseminada, clastos		Subhedral a anhedral
Opaco acicular	Agregados radiales		Subhedral
Sericita	Agregados, rellenos		Anhedral
Minerales de arcilla	Agregados, rellenos		Anhedral
Apatito	Diseminada		Subhedral a euhedral

Brecha hidráulica conformada por matriz de calcita de al menos tres variedades distintas, que embeben fragmentos de un sulfuro masivo compuesto principalmente por pirita, esfalerita y galena, asociadas con pequeñas cantidades de sericita-calcita-cuarzo. En distintos sectores se aprecian rellenos de sericita, minerales de arcilla (?), cuarzo, apatito y pirita de grano fino y euhedral, minerales que brechan los cristales de calcita. Cortando todo lo anterior, aparece una vena de calcita masiva y en empalizada, con vetillas satélites discontinuas.



Izq. Matriz de la brecha, conformada principalmente por una variedad de calcita limpia (Cal1) y otra terrosa (Cal2). Aparecen también algunos minerales opacos (Op) diseminados. Der. Acercamiento a un fragmento de esfalerita (Sp) zonada con núcleos ricos en Fe, y abundantes inclusiones de minerales opacos.

SM-42-8

Descripción macroscópica

Aparente brecha compuesta por matriz de carbonato blanquecino, con clastos gris medio, gris-beige y gris oscuro, algunos de ellos parecen corresponder a los cuerpos masivos de sulfuros, pero la mayoría son mármoles de grano fino. Se observan agregados de sulfuros (calcopirita-pirita) diseminados en diversos sectores de la muestra y desarrollos drusiformes puntuales en los cristales de carbonato.

SM-42-9

Descripción macroscópica

Aparentemente se trata de la aplita con silicificación pervasiva que le otorga un color gris claro a medio, cortada por vetillas pirita y con diseminaciones de ésta. Atravesando, se aprecian venas irregulares de carbonato blancuzco, que brechan a la roca y embeben pequeños fragmentos de ésta. Se aprecian además algunas pátinas de oxidación.

SM-42-10

Descripción macroscópica

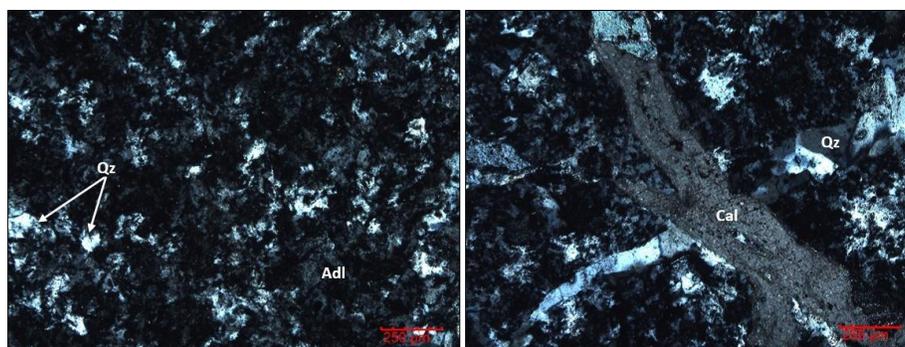
Aplita con silicificación pervasiva que le da un color gris claro, con intenso vetilleo de sulfuros, predominantemente pirita en cristales cúbicos. Hacia el sector superior de la muestra, la roca exhibe brechamiento generado por la introducción de carbonatos blanquecinos que no acarrear mineralización. Los sulfuros también se distribuyen diseminados y a manera de clústeres en la roca. En sectores se aprecian pátinas de oxidación y aparente generación de sulfuros de cobre secundarios.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Calcita	Vetillas		Euhedral a anhedral
Cuarzo	Reemplazamiento		Anhedral
Plagioclasa (?)	Relíctica		Anhedral a subhedral
Adularia	Diseminada, pervasiva		Subhedral a anhedral

Pirita	Vetillas, diseminada		Subhedral
Moscovita	Parches, vetillas		Subhedral
Sericita	Rellenos, vetillas, agregados		Anhedral
Calcedonia	Rellenos, agregados		Anhedral

Roca ígnea de composición aparentemente tonalítica, pero que por la alteración (adularia-cuarzo) no se tiene certeza de esto, conformada principalmente por cristales irregulares de cuarzo rodeados por lo que parecen ser plagioclasas alteradas. Por sus características, es difícil distinguir tanto entre el cuarzo primario y el de la alteración, como los posibles cristales de adularia de escaso tamaño. Cortando, se aprecian un buen número de familias de vetillas, entre las que resaltan: 1) vetillas rectilíneas y continuas de cuarzo; 2) vetillas muy delgadas y discontinuas de opacos; 3) vetillas y venas de espesores variables, continuas, irregulares de calcita, pirita, calcedonia (?) y moscovita, que muestran zonificación composicional y textural; 4) vetillas sinuosas y continuas de calcita limpia.



Izq. Aspecto general de la roca, cuyas características primarias han sido obliteradas por reemplazamiento pervasivo a una asociación de cuarzo (Qz) y adularia (Adl). Der. Roca cortada por dos familias de vetillas: unas tempranas de cuarzo (Qz) y otras tardías de calcita (Cal).

SM-42-11

Descripción macroscópica

Zona de contacto entre aplita con silicificación y zona rica en calcopirita. La aplita presenta su color gris claro característico y evidencia vetilleo sinuoso de pirita-calcopirita. El cuerpo de sulfuros se compone en su mayoría por pirita y esfalerita, las cuales se disponen a manera de bandas intercaladas con otras de color beige compuestas por posibles minerales de arcilla manchados ligeramente por óxidos, y que además rodean cristales traslúcidos con formas poligonales. Cortando ambas entidades a lo largo de su contacto, se aprecia una vena brechada de carbonato con forma muy irregular.

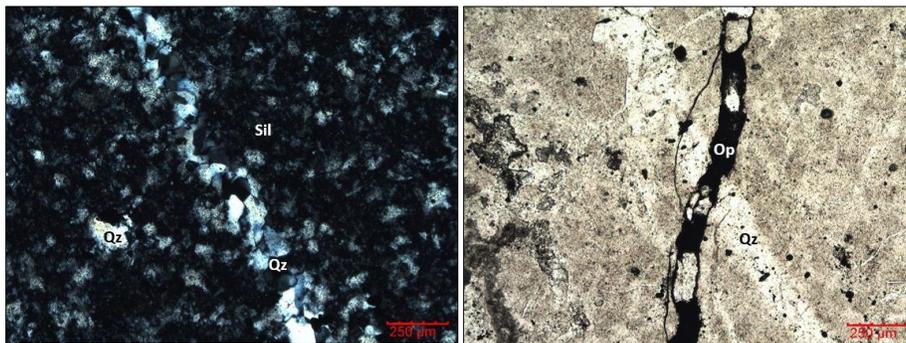
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Cuarzo	Pervasiva, vetillas, agregados, inclusiones		Anhedral
Calcita	Masiva, agregados, rellenos, vetillas		Anhedral a euhedral
Adularia	Pervasiva		-
Sericita	Agregados, halo, rellenos		Anhedral

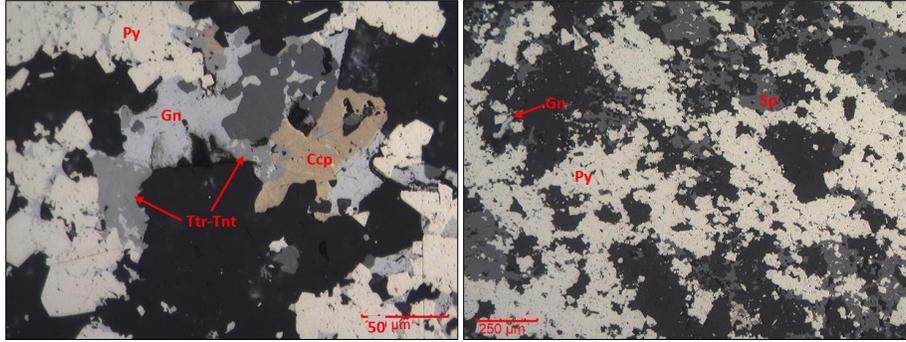
Esfalerita	Masiva, listones	Enferma	Anhedral
Pirita	Masiva, bandeada, agregados		Anhedral
Galena	Diseminada, intersticial		Anhedral
Calcopirita	Diseminada		Anhedral
Arsenopirita	Diseminada		Euhedral
Tetraedrita-tenantita	Diseminada, inclusiones en Sp		Anhedral
Pirargirita-proustita	Inclusiones en Sp		Anhedral

Contacto entre posible roca ígnea finogranular con silicificación pervasiva y cuerpo de sulfuros masivos, en cuya interfase se aprecia un relleno de calcita y un halo de sericita semi-pervasiva. La alteración de la roca ha obliterado completamente sus características primarias (muy pocos pseudomorfos tabulares), y se aprecia cuarzo de recristalización a partir de la sílice; asimismo, se observan abundantes vetillas de tres familias: las primeras rectilíneas y continuas de cuarzo con opacos, cortadas por vetillas de calcita con cuarzo en agregados, y, a su vez, cortadas por vetillas delgadas de opacos. La zona de contacto es un poco compleja, porque comprende un relleno de calcita semi-masiva de al menos dos generaciones, que embebe clastos (o altera) de la roca encajonante y exhibe rellenos de cuarzo y sericita; del mismo modo, se desarrolla un halo de sericita semi-pervasiva y en rellenos junto con opacos de grano fino, en un sector donde se preservan algunos pseudomorfos tabulares (plagioclasas preexistentes) y escasos circones.

El sulfuro masivo, por su parte, se compone principalmente por pirita y esfalerita, con menores cantidades de calcopirita, galena y arsenopirita, y trazas de lo que parece corresponder a sulfosales de las series tetraedrita-tenantita y pirargirita-proustita. La pirita y la esfalerita conforman el grueso de la muestra, presentándose con textura masiva en agregados de gran tamaño, los cuales pueden mostrar una gran abundancia de inclusiones (especialmente la esfalerita) de galena, cuarzo, calcita, calcopirita, arsenopirita y sulfosales. Por su parte, la galena además de aparecer en inclusiones también ocupa espacios intercristalinos de la pirita, y la calcopirita se encuentra diseminada en asociación local con las sulfosales. Cortando, se aprecia una vetilla continua de carbonato, con algo de esfalerita y calcopirita, y posibles fragmentos de pirita embebidos.



Izq. Aspecto general de la roca, alterada pervasivamente por cuarzo (Qz) y sílice (Sil) microcristalina. Cortando, aparece una vetilla rectilínea y continua de cuarzo. Der. Vetillas de cuarzo (Qz) cortadas por otras de minerales opacos (Op), ambas encajadas en la roca silicificada de aspecto terroso.



Izq. Asociación de pirita (Py), calcopirita (Ccp), galena (Gn) y tetraedrita-tenantita (Ttr-Tnt). Véanse además intercrecimientos entre las sulfosales y la galena. Der. Apariencia general del sulfuro masivo, compuesto por bandas alargadas de pirita (Py) y esfalerita (Sp), con menores cantidades de galena (Gn).

SM-42-12

Descripción macroscópica

Cuerpo de sulfuros masivos, conformado por pirita, galena y esfalerita de color marrón oscuro, presentando esta última formas regulares. Se observa además una zona muy oxidada de color ocre, conformada en gran parte por pirrotina. En sectores, se aprecian parches blanquecinos que parecen corresponder a aplitas con silicificación avanzada, cortadas por un *stockwork* de óxidos terrosos.

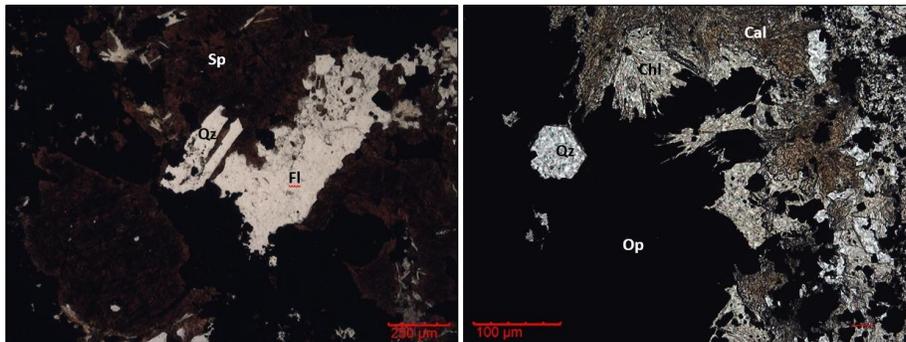
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Cuarzo	Mosaico, inclusiones en opacos, agregados		Anhedral a subhedral
Calcita	Vetillas, parches, rellenos en opacos	Acicular	Anhedral
Fluorita	Masiva, intersticial		Anhedral
Sericita	Pervasiva, parches		Anhedral
Circón	Diseminada		Subhedral
Apatito	Diseminada		Subhedral
Clorita	Agregados	Acicular radial	Anhedral
Óxidos de Fe	Parches		-
Pirita	Masiva, intercrecimiento con Gn, agregados		Anhedral
Esfalerita	Masiva	Enferma	Anhedral
Galena	Intersticial, intercrecimiento	Botrioidal	Anhedral
Arsenopirita	Diseminada, inclusiones		Subhedral
Pirrotina	Inclusiones en Py-Sp-Po		Anhedral
Magnetita	Diseminada		Anhedral
Calcopirita	Inclusiones y exsoluciones		Anhedral
Marcasita	Diseminada		Subhedral

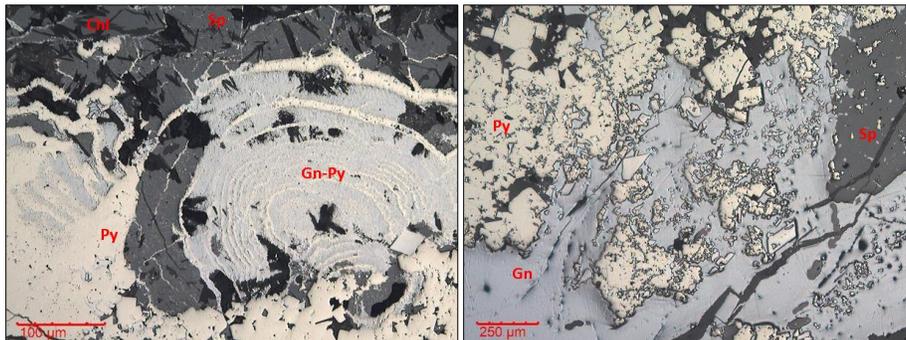
Roca ígnea cuyas características primarias han sido completamente obliteradas por una alteración fílica (cuarzo-sericita-pirita) pervasiva. Sobreimpuesto, se observa un sistema de vetillas, rellenos y diseminaciones conformado por fluorita, calcita, esfalerita, cuarzo, pirita, galena y clorita, que se

encuentran relacionados con un mismo evento, pero con temporalidades distintas y muchas veces difíciles de distinguir. Sin embargo, a grandes rasgos se identifica un vetilleo inicial de calcita muy fina con algunos opacos, cortado por la fase principal que incluye la fluorita y los otros minerales ya mencionados (calcita acicular), y atravesado, a su vez, por vetillas multidireccionales de calcita que cortan a la mena.

La zona de sulfuros masivos está compuesta principalmente por pirita, esfalerita y galena, con menores cantidades de arsenopirita, calcopirita y pirrotina, estas dos últimas principalmente como inclusiones y exsoluciones dentro de la esfalerita. La pirita y la esfalerita se encuentran en asociación cercana, apareciendo ambas como masas de gran tamaño con inclusiones de una en otra, y de otros minerales como galena, cuarzo, calcopirita y pirrotina (más que todo en la esfalerita). Por su parte, la galena se encuentra tanto en inclusiones como en rellenos intercristalinos, y en intercrecimientos botrioidales y bandeados con la pirita. Por último, se presenta magnetita relíctica diseminada junto con pirita, marcasita y poca arsenopirita, en la roca caja. Por último, se observan varias vetillas de óxidos de Fe.



Izq. Esfalerita (Sp) en asociación estrecha con fluorita (Fl) y cuarzo (Qz). Der. Minerales opacos (Op) de textura masiva, en asociación con clorita (Chl) acicular, calcita (Cal) terrosa y cuarzo (Qz).



Izq. Intercrecimientos botrioidales entre pirita (Py) y galena (Gn), en cercanía de esfalerita (Sp) atravesada por mineral acicular (Chl). Der. Galena (Gn) masiva con textura intersticial entre cristales de pirita (Py), con esfalerita (Sp) asociada.

SM-43-1

Descripción macroscópica

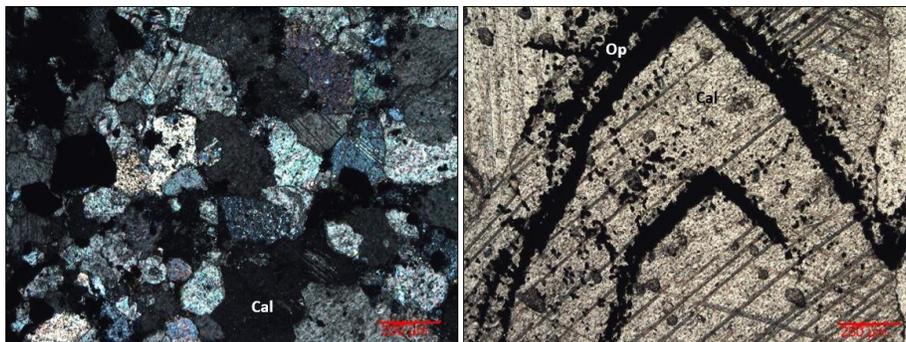
Brecha matriz soportada conformada por una matriz de carbonatos de color blanco y gris medio a oscuro, que embebe fragmentos de cuerpos de sulfuros masivos, conformados principalmente por calcopirita, pirita y galena. Los carbonatos pueden mostrar desarrollos drusiformes en algunas cavidades, y además se observan minerales de color negro con bordes de oxidación que parecen venir con la matriz porque rellenan espacios entre los cristales de calcopirita de los clastos. Se hallan

además vetillas tardías de calcita de aproximadamente 2 mm, cortando a las demás generaciones de calcita.

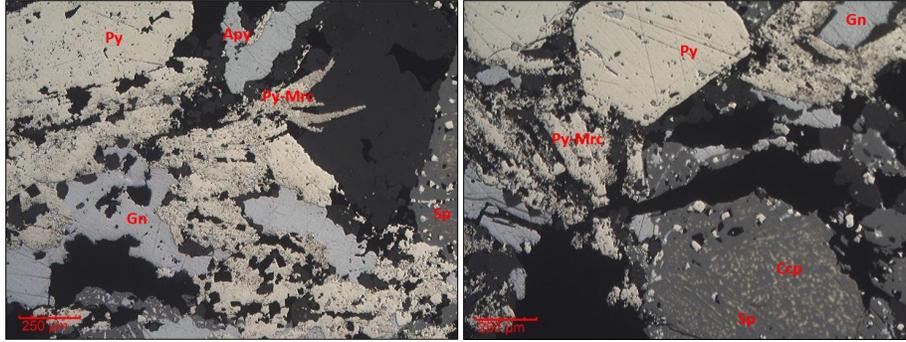
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Calcita	Masiva, agregados, bandillas	Zonación	Anhedral a subhedral
Calcedonia	Agregados, rellenos		Anhedral
Cuarzo	Agregados, rellenos		Anhedral
Barita	Agregados semi-radiales		Subhedral
Minerales de arcilla	Rellenos		-
Sericita	Rellenos		-
Óxidos de Fe	Parches		-
Pirita arseniosa	Agregados masivos		Anhedral a subhedral
Marcasita	Agregados		Anhedral
Galena	Masiva	Intersticial	Anhedral
Esfalerita	Diseminada	Enferma	Anhedral
Calcopirita	Exsoluciones en Sp		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Py		Anhedral

La roca corresponde a un mármol con mineralización de pirita y esfalerita, el cual es cortado por una vena de calcita masiva y zonada, con rellenos de minerales de arcilla-sericita hacia los contactos con la roca encajonante, y algunos fragmentos líticos de rocas silicificadas embebidos. Cabe destacar la presencia de pequeños opacos dentro de la vena, que denotan los bordes de crecimiento de la calcita. El sector rico en sulfuros está conformado principalmente por pirita, marcasita, esfalerita y galena, con menores proporciones de calcopirita. La pirita más fina y la marcasita se encuentran en agregados masivos de cristales finos, los cuales predominan en la roca y rodean, cortan y brechan a los otros sulfuros. La esfalerita, la pirita gruesa y la galena aparecen en cristales de gran tamaño diseminados, esta primera con un gran número de inclusiones de pirita y galena, y muchas exsoluciones de calcopirita.



Izq. Apariencia general de la roca encajonante de la vena, la cual corresponde a un mármol compuesto por cristales de calcita (Cal) con formas poligonales. Der. Cristales masivos de calcita (Cal) de la vena, con zonación denotada por los intercrecimientos con minerales opacos (Op) muy finos.



Izq. Pirita (Py) y marcasita (Mrc) de grano fino que ocupan intersticios de los otros sulfuros. Véanse además galena (Gn) y esfalerita (Sp). Der. Esfalerita (Sp) con múltiples inclusiones/exsoluciones de calcopirita (Ccp), asociada con pirita (Py) y galena (Gn), y rodeada por pirita-marcasita (Py-Mrc).

SM-43-2

Descripción macroscópica

Aplita con avanzada silicificación, cortada por abundantes vetillas de calcopirita y pirita, sulfuros que pueden hallarse también a manera de agregados y como cristales individuales diseminados en la roca. Hacia uno de los extremos, la aplita es atravesada por una vena de carbonato que produce brechamiento. Adicionalmente, se aprecia vetilla continua de carbonato con fluorita.

SM-43-3

Descripción macroscópica

Aplita con silicificación que le otorga un color gris claro, cortada por vetillas de carbonato de color blanco y rosado (¿manganocalcita?), y otras posiblemente de sulfuros que se ven negras. Se presenta pirita en agregados diseminados indistintamente en la roca, y óxidos terrosos que conforman parches producto de oxidación.

SM-43-4

Descripción macroscópica

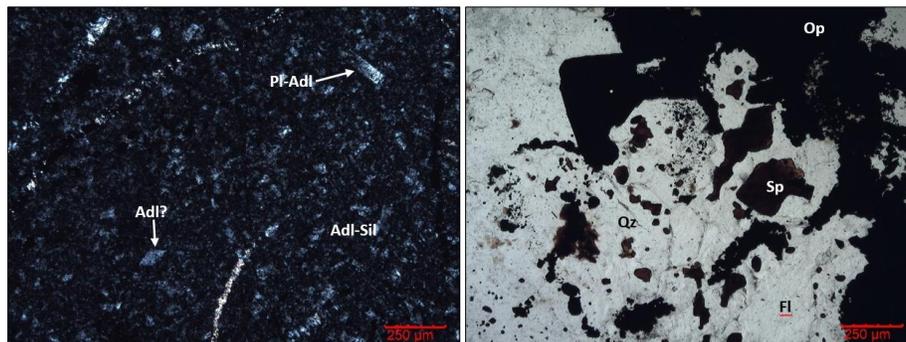
Aplita silicificada, cortada por un entramado de vetillas y rellenos de sulfuros de grano muy fino (pirita-calcopirita-arsenopirita) asociados con cristales euhedrales de adularia e irregulares de fluorita. Cortando, aparece una vetilla rectilínea de esfalerita con cuarzo y carbonato, este primero muy lechoso.

Descripción microscópica

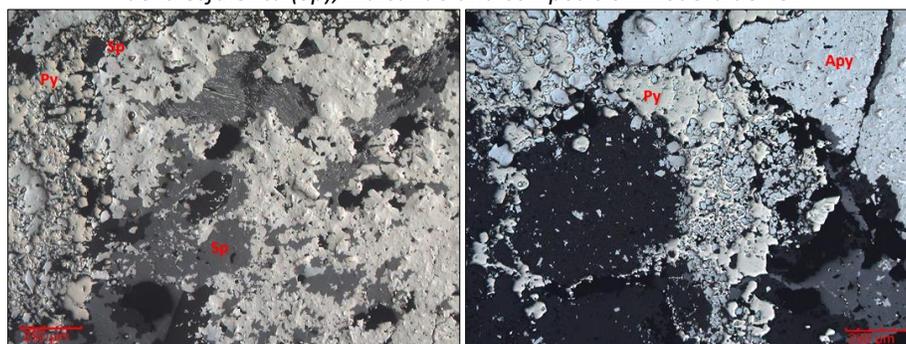
MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Adularia	Pseudomorfos, pervasiva		Euhedral a anhedral
Circón			Subhedral
Titanita			Subhedral
Sílice	Pervasiva		-
Moscovita	Agregados, vetillas		Subhedral a anhedral
Clorita	Agregados, vetillas		Subhedral a anhedral
Sericita	Agregados, vetillas		Anhedral
Carbonato	Parches, agregados, vetillas		Anhedral
Cuarzo	Vetillas		Subhedral

Fluorita	Vetillas		Anhedral
Arsenopirita	Agregados masivos, reemplazamiento (?) de Sp		Subhedral a anhedral
Esfalerita	Masiva		Anhedral
Pirita	Vetillas, diseminada, intersticial		Subhedral
Calcopirita	Exsoluciones en Sp		Anhedral
Galena	Inclusiones en Sp y Apy		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Apy		Anhedral

Roca de textura microporfirítica de grano muy fino, conformada por pseudomorfos de microfenocristales de plagioclasa en adularia, rodeados por una matriz criptocristalina de este feldespato, cuya composición parece haber sido andesítica. Sobreimpuesto, se aprecia una alteración de adularia-cuarzo pervasiva de intensidad muy fuerte distribuida en la matriz de la roca, a la cual se sobreimpone un vetilleo de fluorita y cuarzo que se asocia con la mineralización semi-masiva, y parcialmente con rellenos, parches y halos discontinuos de sericita-moscovita-clorita-carbonato. La mena está compuesta por esfalerita, arsenopirita, y esfalerita, y menores cantidades de galena, calcopirita y pirrotina, y se relacionada estrechamente con cristales adularia, cuarzo y fluorita. La esfalerita se presenta como grandes masas con inclusiones de galena, pirita y exsoluciones de calcopirita; y la arsenopirita, por su parte, compone agregados cristalinos masivos en cuyos intersticios cristaliza esfalerita. La pirrotina, calcopirita y galena componen inclusiones en pirita, esfalerita y arsenopirita.



Izq. Textura general de la roca, conformada por una matriz criptocristalina en la cual nadan pseudomorfos de fenocristales de plagioclasa (Pl) en adularia (Adl). Por su aspecto, es muy posible que la matriz se componga de adularia y sílice (Sil). Der. Sulfuros relacionados con fluorita (Fl) y cuarzo (Qz). Nótese el color de la esfalerita (Sp), indicando una composición moderada de Fe.



Izq. Agregados masivos de arsenopirita (Apy), asociados con pirita (Py) y esfalerita (Sp), esta última también en rellenos intersticiales. Der. Pirita (Py) intersticial en arsenopirita (Apy).

SM-43-5**Descripción macroscópica**

Mármol de grano fino a medio cortado por vetillas de carbonato de color blanquecino-beige, discontinuas, y otras de color oscuro con algunos sulfuros (pirita-arsenopirita), los cuales también se encuentran diseminados indistintamente en la roca. Hacia un extremo, se presenta parte del skarn retrógrado conformado por epidota y clorita, en donde aparece también un agregado de óxidos terrosos que parecen estar reemplazando a la pirita.

SM-43-6**Descripción macroscópica**

Mármol de grano muy fino a fino, cortado por venas de carbonato-cuarzo, grises y blancas, brechadas; y en contacto con zona rica sulfuros, la cual se compone principalmente de pirita, calcopirita, esfalerita y posibles sulfosales de plata (cristales rojizos). La roca exhibe una gran variedad de tonos de gris, que reflejan los diferentes grados de recristalización, y tiene además rellenos puntuales de cuarzo y carbonatos lechosos.

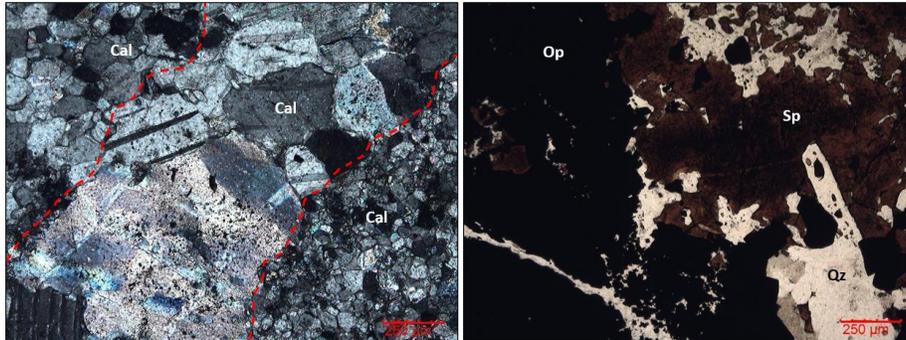
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Calcita	Vetillas, mosaico, rellenos		Anhedral a subhedral
Cuarzo	Agregados, empalizada		Subhedral a euhedral
Sericita	Agregados		Anhedral
Clorita	Agregados	Radial	Subhedral
Minerales de arcilla			
Esfalerita	Masiva		Anhedral
Pirita	Masiva, fracturas, agregados		Anhedral
Arsenopirita	Agregados, diseminada		Subhedral a euhedral
Calcopirita	Exsoluciones en Sp		Anhedral
Galena	Diseminada	Intersticial	Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Py		Anhedral
Tetraedrita-tenantita	Inclusiones en Sp		Anhedral

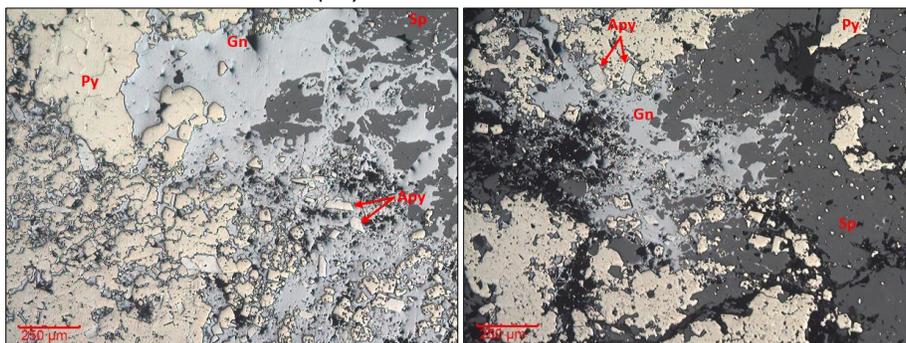
Mármol bandeado conformado por cantidades variables de calcita y cuarzo, ambos con texturas indicativas de recristalización estática, el cual se encuentra en contacto con un cuerpo de sulfuros masivos. La zona de los sulfuros muestra una mineralogía contrastante, estando conformada por esfalerita, arsenopirita y pirita en cercana asociación con cuarzo y masas de sericita y clorita. Cortando, se observan vetillas de calcita de al menos dos generaciones: una compuesta por cristales poligonales de grano medio y la otra por agregados de cristales finos con aspecto terroso. En la interfase entre ambas litologías, se aprecia un relleno de calcita en cristales muy anhedrales con cuarzo, asociado en parte con esfalerita y pirita.

El sulfuro masivo, por su parte, está conformado principalmente por pirita y esfalerita, con menores cantidades de arsenopirita, calcopirita, galena y pirrotina. La pirita y la esfalerita muestran texturas masivas, abarcando la mayoría de la sección e incluyendo minerales como pirrotina, galena y calcopirita; la arsenopirita, también se encuentra en inclusiones dentro de la galena y en agregados.

Por su parte, la galena libre se encuentra en grandes cristales que parecen rellenar intersticios de la arsenopirita y pirita, e incluso parece brecharla; y también compone aparentes reemplazamientos de esfalerita. Adicionalmente, la esfalerita puede mostrar fracturas rellenas de pirita, y rellenar sus intersticios.



Izq. Vena de calcita (Cal) dividiendo al sector de grano fino del mármol, del de grano más grueso. Nótese la forma poligonal de la calcita (Cal), por la recristalización estática durante el metamorfismo térmico. Der. Mineralización masiva en el mármol, conformada por esfalerita (Sp) marrón, minerales opacos (Op) y cuarzo (Qz) en cristales tabulares.



Izq. Galena (Gn) tardía de textura intersticial entre pirita (Py) y arsenopirita (Apy), la cual se intercrece con la esfalerita (Sp). Der. Principales sulfuros de la muestra. Pirita (Py) asociada con arsenopirita (Apy), galena (Gn) y esfalerita (Sp), estas últimas dos mostrando intercrecimientos.

SM-43-7 A

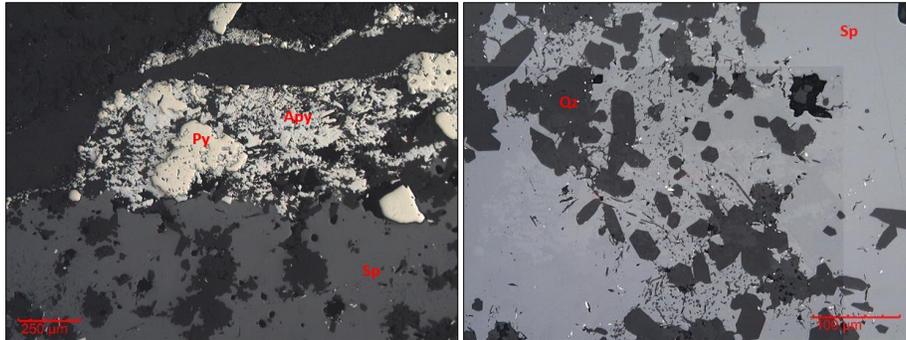
Descripción macroscópica

Contacto entre sulfuro masivo de pirita con menores proporciones de esfalerita de color marrón rojizo, y una caliza silicificada con mineralización abundante de esfalerita y menor pirita. Cortando ambas litologías, se aprecian vetillas principalmente rectilíneas, aunque también sinuosas e incluso anastomosadas, con espesores inferiores a 5 mm, conformadas por carbonato.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Esfalerita	Masiva		Anhedral
Pirita	Diseminada		Subhedral a euhedral
Arsenopirita	Agregados		Subhedral a euhedral
Galena	Inclusiones en Sp		Anhedral
Calcopirita	Inclusiones en Sp		Anhedral

Caliza silicificada con masas de esfalerita superpuestas, acompañadas por pirita y arsenopirita diseminada y en agregados, respectivamente. Adicionalmente, se aprecian abundantes inclusiones euédrales de cuarzo en la esfalerita, y de pequeñas de galena y calcopirita. Cortando, se aprecia una vetilla continua y ligeramente sinuosa de carbonato.



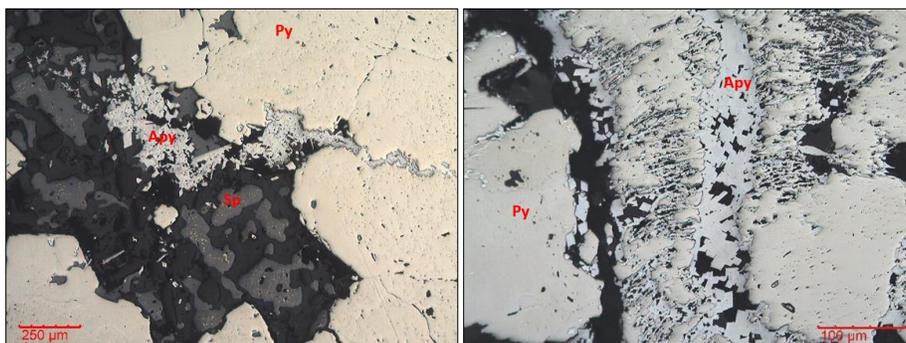
Izq. Pirita (Py) asociada con esfalerita (Sp), con rellenos de arsenopirita (Apy). Der. Inclusiones de cuarzo (Qz) en cristales de esfalerita (Sp) con zonación.

SM-43-7 B

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Pirita	Masiva		Anhedral a subhedral
Esfalerita	Diseminada, intersticial	Enferma	Anhedral
Arsenopirita	Agregados		Subhedral a euhedral
Pirrotina	Inclusiones en Py		Anhedral
Calcopirita	Exsoluciones en Sp		Anhedral

Sulfuro masivo compuesto primordialmente por pirita y esfalerita, con menores cantidades de arsenopirita, pirrotina y calcopirita, el cual es atravesado por una vetilla rectilínea de carbonato. La esfalerita exhibe formas redondeadas irregulares y cuneiformes. La pirita, por su parte, se muestra masiva y es parcialmente cortada por los agregados de arsenopirita; del mismo modo, muestra inclusiones erráticas de calcopirita y pirrotina.



Izq. Rellenos de arsenopirita (Apy) en los cristales de pirita (Py) y esfalerita en asociación, con textura enferma. Der. Vetillas de arsenopirita (Apy) ramificadas en las bandas de reemplazamiento de pirita (Py).

SM-43-8**Descripción macroscópica**

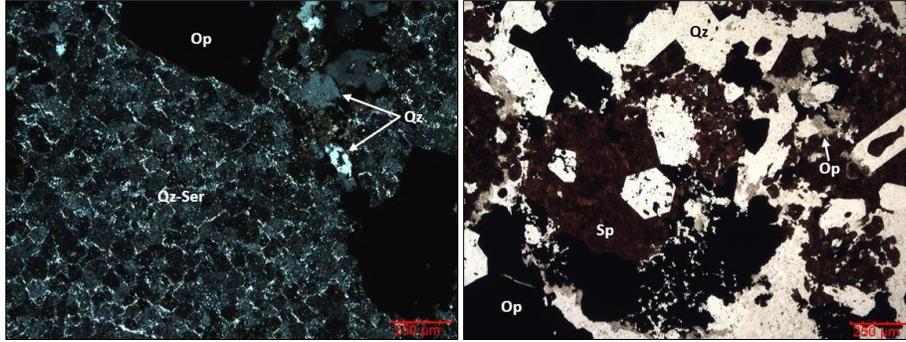
Zona con abundante pirita, calcopirita, esfalerita y galena, con oxidación incipiente. Presenta textura bandeada, apareciendo los sulfuros concentrados en las bandas de mayor grosor, y las de menor grosor muestran tamaño de grano mucho más fino y apariencia maciza. Se aprecian además algunos rellenos de cuarzo entre las bandas ricas en sulfuros y óxidos de Fe en fracturas.

Descripción microscópica

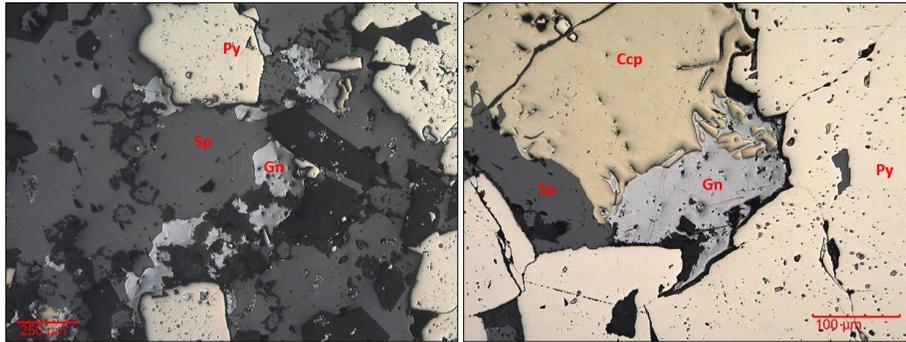
MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Cuarzo	Pervasiva		Anhedral a euhedral
Sericita-moscovita	Pervasiva, halo		Anhedral
Turmalina	Inclusiones en Qz		Subhedral
Calcita	Vetillas, rellenos		Anhedral
Clorita	Vetillas discontinuas, agregados		Anhedral
Óxidos de Fe	Vetillas, parches		-
Pirita arseniosa	Agregados masivos, oquerosa		Subhedral a anhedral
Esfalerita	Masiva, relleno	Intersticial	Anhedral
Galena	Relleno	Intersticial	Anhedral
Calcopirita			Anhedral
Arsenopirita	Inclusiones en Py		Subhedral
Pirrotina	Inclusiones en Sp		Anhedral

Roca con alteración cuarzo-sericítica pervasiva que obliteró completamente las características primarias, con bandeamiento denotado por diferencias porcentuales en sericita, cuarzo y minerales opacos. Asimismo, se aprecia una mineralización semi-masiva y bandeada de opacos y esfalerita muy rica en Fe (marmatita), que se sobreimpone a la roca y, en sectores, parece reemplazarla. Cortando, se encuentran vetillas discontinuas de cuarzo-sulfuros y otras continuas y algo sinuosas de calcita, opacos y un poco de clorita, con halos discontinuos de sericita.

La mineralización se compone primordialmente de pirita, esfalerita y galena, con menores cantidades de calcopirita y pirrotina. La pirita se dispone en agregados masivos, en cuyas oquedades precipitan la esfalerita y la galena, generando texturas de relleno. Asimismo, la galena y la esfalerita pueden presentarse a manera de intercrecimientos dentro de masas de carbonatos oxidados, asociados con cristales de pirita más localizados. Por su parte, la pirrotina, arsenopirita y calcopirita se hallan como inclusiones dentro de las fases ya mencionadas.



Izq. Textura general de la roca, obliterada completamente por una alteración cuarzo-sericítica (Qz-Ser) pervasiva. Véanse además minerales opacos (Op) diseminados, en asociación con un cuarzo más limpio. Der. Esfalerita (Sp) y opacos (Op) en asociación cercana con cuarzo (Qz) y con rellenos de calcita (Cal).



Izq. Pirita (Py), galena (Gn) y esfalerita (Sp) asociadas. Der. Galena (Gn) intercrecida con calcopirita (Ccp), en asociación con pirita (Py) y esfalerita (Sp).

SM-43-9

Descripción macroscópica

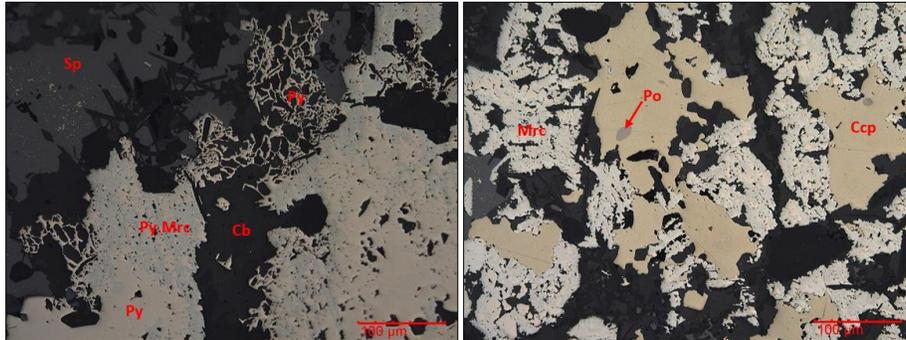
Cuerpo de sulfuros masivos, principalmente de calcopirita, pirita, esfalerita y galena, con carbonatos de grano fino asociados. Cortando, se aprecia venilleo de carbonatos blancos, con desarrollos drusiformes y sulfuros de grano muy fino relacionados. Se observan algunos óxidos de Fe tiñendo los carbonatos.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Esfalerita	Masiva, oquerosa	Enferma	Anhedral
Pirita	Diseminada, masiva, vetilleo		Anhedral a subhedral
Arsenopirita	Diseminada, inclusiones en Py		Anhedral a euhedral
Calcopirita	Diseminada, exsoluciones en Sp		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Sp y Py		Anhedral
Marcasita	Reemplazamiento de Py		Anhedral a subhedral

El sulfuro masivo muestra bandeamiento composicional, conformado casi totalmente por esfalerita intercalada con bandas de pirita, esta primera con gran cantidad de inclusiones de pirrotina; el cual

también es cortado por un grupo de venas de carbonato con esfalerita, calcopirita, pirita, arsenopirita y pirrotina. Cortando a ambas entidades, se aprecian vetillas continuas de otra generación de carbonato, asociadas a pirita oquerosa con desarrollos dendríticos. Afectando a la pirita masiva del sulfuro masivo y reemplazando totalmente cristales previamente existentes en la vena (¿de pirita también?) se aprecian agregados de marcasita-pirita.



Izq. Cristales de pirita (Py) reemplazados parcialmente por masas de marcasita-pirita (Mrc-Py), y cortada por vetilla de carbonato (Cb) con pirita dendrítica (Py). En cercanía, esfalerita (Sp) enferma con mineral acicular. Der. Calcopirita (Ccp) rodeada por masas de marcasita (Mrc), y con inclusiones de pirrotina (Po), asociada con la vena de carbonato.

SM-43-10

Descripción macroscópica

Aplita silicificada de color gris claro a gris oscuro con abundantes vetillas discontinuas de calcopirita, arsenopirita y esfalerita marrón muy oscuro. En sectores se aprecia una estructura concéntrica con bordes de calcopirita-arsenopirita, seguido de una capa con escasos sulfuros y un núcleo con predominancia de esfalerita. Asimismo, se observa un relleno de cuarzo con escasa calcopirita asociada. Diseminados en toda la muestra se hallan pequeños clústeres de calcopirita, esfalerita y arsenopirita. En algunas fracturas se alojan óxidos de Fe terrosos.

SM-43-11

Descripción macroscópica

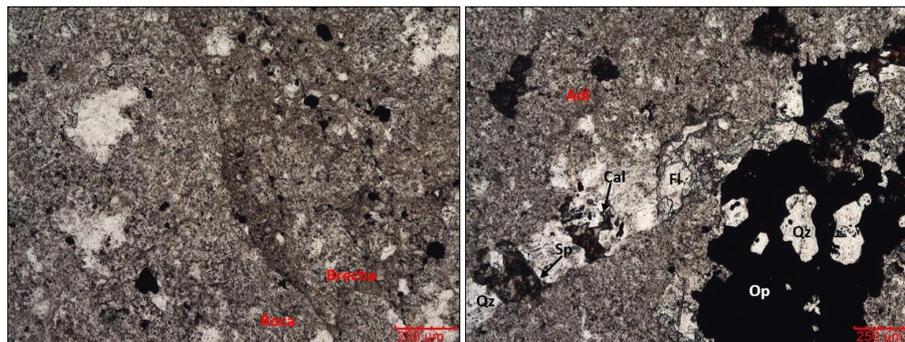
Aplita con silicificación pervasiva que le otorga un color blanquecino-beige, cortada por vetillas sinuosas y de espesores variables inferiores a 1 cm, conformadas principalmente por pirita. La pirita también se presenta diseminada a manera de clústeres en la roca, en algunas ocasiones rodeando los fenocristales de cuarzo y con formas poligonales algo regulares. En algunos sectores se observa algo de cizallamiento en la roca (textura brechada), oxidación de los clústeres de sulfuros y quemaduras generadas por disolución de éstos.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Cuarzo	Pervasiva, vetillas, agregados		Anhedral a subhedral
Apatito	Diseminada		Euhedral
Plagioclasa (?)			Anhedral
Carbonato	Parches, vetillas		Anhedral
Fluorita	Vetillas		Anhedral

Óxidos de Fe	Parches, vetillas		Anhedral
Líticos			Redondeada a subangular
Matriz	Microcristalina		-
Sericita	Parches, agregados, pervasiva leve		-
Opacos	Vetillas, diseminada, clusters, relíctica		Anhedral a subhedra

Roca cuyas características primarias han sido obliteradas por la alteración adularia-cuarzo-sericita pervasiva, a la cual se superpone una zona de cizalla donde se aprecian fragmentos de distintos tamaños embebidos en una matriz muy molida conformada por cuarzo y sericita. Cortando a la roca, se aprecian vetillas de cuarzo-fluorita-carbonato-esfalerita-opacos y parches redondeados de carbonato, cuarzo, fluorita, esfalerita y opacos, ambas estructuras muy oxidadas. Por su parte, en la brecha se observan vetillas sinuosas y continuas de opacos, que aprovechan las zonas más permeables para desarrollarse.



Izq. Contacto entre roca ígnea con alteración hidrotermal y zona de brecha. Der. Agregado de minerales opacos (Op) y cuarzo (Qz), cortado por vetilla de esfalerita (Sp), calcita (Cal), fluorita (Fl) y cuarzo (Qz).

SM-43-12

Descripción macroscópica

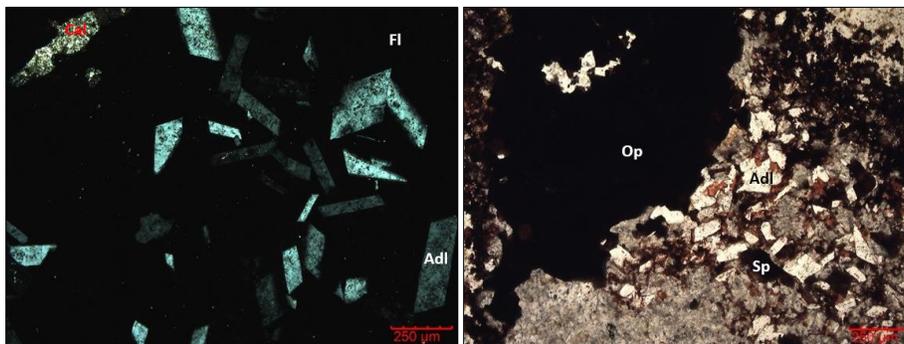
Aplita con silicificación pervasiva, con *stockwork* de óxidos terrosos y estructuras redondeadas conformadas por fluorita-adularia-calcita-opacos, algunas de ellas con texturas concéntricas y bandeadas. En sectores se aprecian agregados de sulfuros que presentan halos blancos (¿sericita?). La mineralización se presenta a manera de vetillas discontinuas y ramificadas, compuestas principalmente por arsenopirita (cortes rómbicos), calcopirita y esfalerita caramelo. La roca muestra abundantes óxidos de Fe en agregados diseminados.

Descripción microscópica

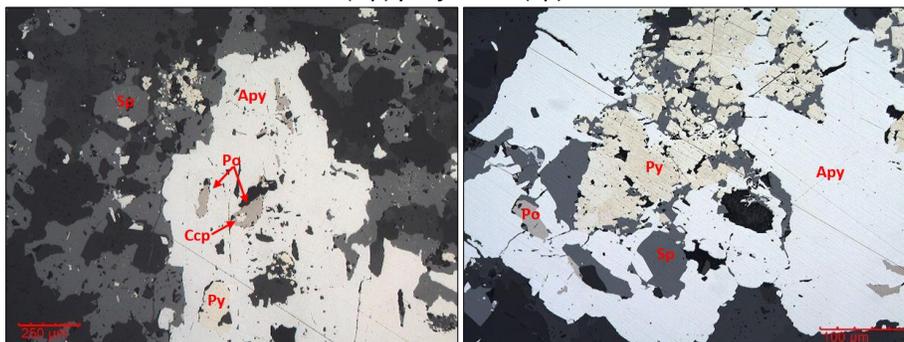
MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Adularia	Pervasiva, pseudomorfos, inclusiones en Fl		Subhedra a euhedra
Cuarzo	Pervasiva		-
Carbonato	Rellenos, parches, vetillas		Anhedra
Clorita	Agregados		Anhedra
Esfalerita	Diseminada		Anhedra

Fluorita	Rellenos		Anhedral
Óxidos de hierro	Vetillas		-
Arsenopirita	Intercrecimiento con Sp		Anhedral a subhedral
Pirrotina	Inclusiones en Apy y Sp		Anhedral
Pirita	Inclusiones en Apy y Sp		Anhedral
Calcopirita	Inclusiones en Apy y Sp		Anhedral
Galena	Intercrecimiento con Py		Anhedral

Roca de textura microporfírica de grano muy fino relíctica, conformada por pseudomorfos de microfenocristales euhedrales a subhedrales de plagioclasa rodeados por una matriz criptocrystalina, cuya composición parece haber sido andesítica. Sobreimpuesta, tiene una alteración hidrotermal muy fuerte de distribución pervasiva, compuesta por adularia-fluorita-cuarzo, que afecta a los fenocristales y a la matriz, haciéndola recrystalizar a una masa compuesta por pequeños cristales anhedrales. Diseminados, se encuentran parches redondeados e irregulares de carbonato y adularia (euhedral o anhedral), en asociación cercana con los arsenopirita, esferita y pirita, y puntual con fluorita. Como último evento, se aprecia una fuerte oxidación supérgena representada por vetillas y parches de óxidos de Fe.



Izq. Fluorita (Fl) masiva con inclusiones euhedrales de adularia (Adl), y cortada por vetilla discontinua de calcita (Cal). Der. Agregado de adularia (Adl) en cristales euhedrales rómbicos y tabulares, minerales opacos (Op) y esferita (Sp).



Izq. Asociación del sulfuro masivo, conformada por arsenopirita (Apy) masiva, esferita (Sp) y pirita (Py), con inclusiones de pirrotina (Po) y calcopirita (Ccp). Der. Esferita (Sp) muy asociada con pirita (Py) y pirrotina (Po), dentro de arsenopirita (Apy).

SM-43-13 A

Descripción macroscópica

Roca de textura masiva conformada principalmente por pirita, calcopirita, esfalerita y pirrotina, asociadas con cristales de fluorita de gran tamaño y cuarzo. Hacia uno de los extremos del núcleo se aprecian remanentes de lo que parece corresponden a la aplita, y aparecen muchos óxidos terrosos a lo largo de toda la muestra, posible producto de alteración de los sulfuros.

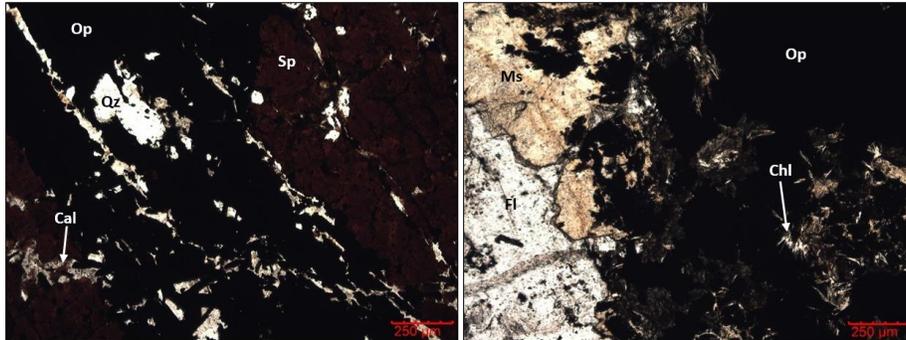
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Calcita	Vetillas, masiva, agregados, flameante		Anhedral
Esfalerita	Semi-masiva, diseminada, bandas, masiva	Enferma	Anhedral
Cuarzo	Diseminada, inclusiones en opacos, bandas		Anhedral a subhedral
Clorita	Agregados	Acicular radial	Euhedral
Moscovita	Diseminada, masas, agregados masivos		Anhedral a euhedral
Sericita	Rellenos, agregados		Anhedral
Óxidos de Fe	Vetillas, parches		Anhedral
Pirita	Masiva		Anhedral
Calcopirita	Diseminada, exsoluciones en Sp		Anhedral
Marcasita	Masiva, reemplazam.		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Py		Anhedral
Arsenopirita	Diseminada		Anhedral
Galena	Diseminada		Anhedral

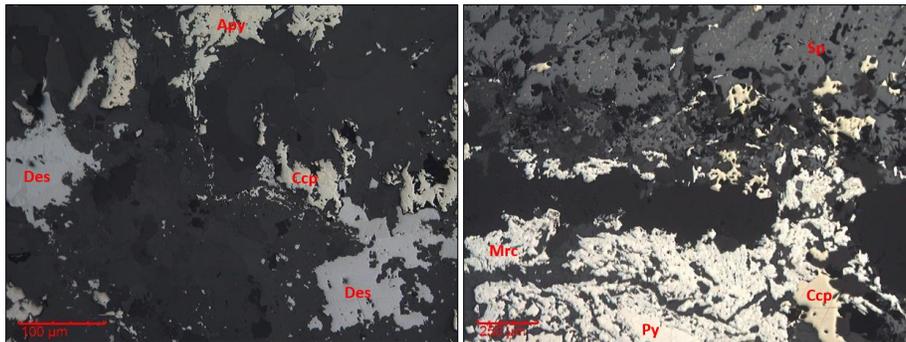
Roca con acentuado bandeamiento composicional y textural, conformada por distintos minerales con relaciones complejas entre sí. *Grosso modo*, se distinguen las siguientes bandas: 1) calcita flameante y terrosa, con escasos cristales de arsenopirita, cuyo tamaño de grano disminuye notoriamente hacia el contacto con la siguiente banda; 2) se trata de una de las dos zonas mineralizadas de la muestra, cuya estructura es acuñada y se conforma casi completamente por opacos y esfalerita, con menores proporciones de cuarzo y calcita; 3) banda delgada, sinuosa y discontinua de cuarzo mosaico con sericita, con mineralización superpuesta y calcita en parches; 4) banda muy rica en calcita microcristalina con agregados locales en empalizada, relacionada con escasa esfalerita y opacos (pirita y arsenopirita) diseminados, y rellenos locales de sericita y cuarzo hacia el contacto con la otra zona; 5) principal sector mineralizado de la roca, que conforma aproximadamente el 70% de la muestra y se compone mayoritariamente por sulfuros y fluorita, con menores concentraciones de cuarzo, clorita y moscovita aciculares, y rellenos masivos de moscovita, parches y vetillas de calcita.

La zona 5 está compuesta primordialmente por pirita y marcasita, con menores proporciones de esfalerita, galena, calcopirita, pirrotina y una sulfosal. La pirita aparece de forma masiva en la muestra, abarcando muchas inclusiones de otras fases como pirrotina, esfalerita y calcopirita, y es cortada y rodeada por masas de marcasita que parecen producto de reemplazamientos tardíos. Por

su parte, la galena, arsenopirita, calcopirita y la sulfosal se encuentran diseminados en la muestra, en asociación con otros sulfuros o con agregados de fluorita. La esfalerita, en cambio, es menos recurrente que la pirita, pero también conforma cristales de gran tamaño con muchas inclusiones de calcopirita, cuarzo, pirrotina y la sulfosal, y muestra fracturas rellenas por marcasita y fluorita.



Izq. Sulfuro masivo desarrollado en la banda 2, conformado por esfalerita (Sp) rojiza y minerales opacos (Op), con rellenos e inclusiones de cuarzo (Qz) y calcita (Cal). Der. Asociación principal de la mineralización masiva, conformada por fluorita (Fl), masas de moscovita (Ms), clorita (Chl) acicular, calcita (Cal) y opacos (Op).



Izq. Sulfosal (Des) en asociación con calcopirita (Ccp), y en cercanía con agregado de arsenopirita (Apy). Nótese el pleocroísmo marcado de esta fase cristalina. Der. Asociación predominante en la roca, conformada por esfalerita (Sp), calcopirita (Ccp) y pirita (Py), con marcasita (Mrc) rodeando los cristales.

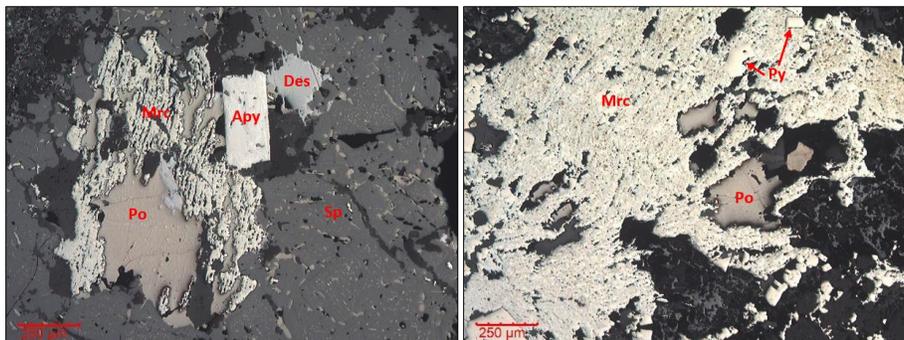
SM-43-13 B

Descripción microscópica

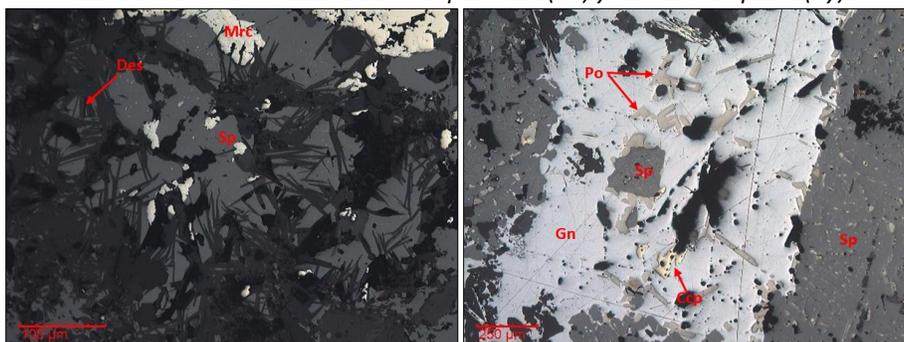
MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Esfalerita	Masiva		Anhedral
Pirita	Masiva		Anhedral
Marcasita	Agregados, reemplazam.	Ojo de pájaro	Anhedral
Galena	Masiva		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Sp	Relíctica	Anhedral
Arsenopirita			Subhedral
Calcopirita	Diseminada		Anhedral
Sulfosal	Agregados		Anhedral

Sulfuro masivo conformado principalmente por esfalerita, con menores cantidades de pirita, galena, pirrotina, calcopirita, marcasita y una sulfosal. La esfalerita tiene textura masiva y aparece englobando a todas las otras fases, donde la galena se intercrece con pirrotina y la pirita muestra

bandas de reemplazamiento de marcasita. Por su parte, los grandes cristales de pirrotina exhiben reemplazamiento pseudomórfico por agregados masivos de marcasita de grano fino con textura ojo de pájaro. La sulfosal es escasa y se encuentra en asociación estrecha con la esfalerita y la pirrotina.



Izq. Sulfosal (Des) en asociación con esfalerita (Sp) muy rica en inclusiones, arsenopirita (Apy) y pirrotina (Po), esta última reemplazada parcialmente por marcasita (Mrc). Der. Agregados masivos de marcasita (Mrc) embebiendo relictos inalterados de pirrotina (Po) y cristales de pirita (Py).



Izq. Esfalerita (Sp) cortada por agujas de mineral desconocido (Des) de disposición radial. Der. Cristales masivos de galena (Gn) asociados con esfalerita (Sp), con inclusiones abundantes de pirrotina (Po), esfalerita (Sp) y calcopirita (Ccp).

SM-43-14 A

Descripción macroscópica

Contacto entre skarn bandeado de color beige-verdoso, y zona rica en sulfuros y óxidos. Se compone principalmente de piritita, esfalerita, pirrotina, calcopirita y galena en bandas intercaladas y asociadas con cuarzo en cristales transparentes. Abundancia de óxidos terrosos.

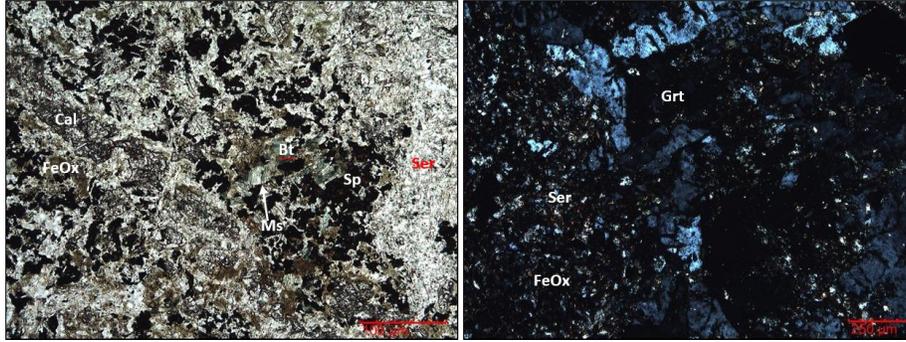
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Calcita	Agregados masivos, vetillas, rellenos		Anhedral
Cuarzo	Agregados, inclusiones		Anhedral a subhedral
Fluorita	Masiva		Anhedral
Sericita	Agregados masivos		Anhedral
Clorita	Agregados masivos, acicular radial		Anhedral a euhedral

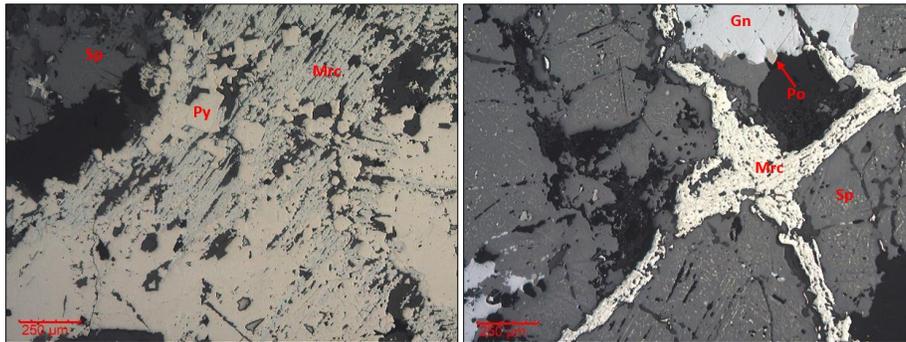
Biotita verde	Diseminada		Subhedral
Moscovita	Diseminada	Tabular radial	Subhedral
Granate	Agregados, relíctica		Anhedral
Circón	Diseminada		Subhedral
Apatito	Diseminada		Euhedral
Desconocido	Vetillas		Anhedral
Óxidos de hierro	Agregados, parches, vetillas		-
Pirita	Masiva		Anhedral a subhedral
Esfalerita	Masiva	Enferma	Anhedral
Galena	Intercrecimiento con Sp		Anhedral
Marcasita	Reemplazamiento		Anhedral a subhedral
Pirrotina	Inclusiones en Gn y Sp		Anhedral
Calcopirita	Exsoluciones en Sp		Anhedral
Arsenopirita	Diseminada		Anhedral

Roca con bandeamiento composicional difuso denotado por interdigitaciones irregulares de zonas con distintas cantidades de minerales micáceos (clorita-moscovita-sericita-biotita verde), calcita y cuarzo, con otras de sulfuros masivos, fluorita y cuarzo. De este modo, se pueden definir los siguientes sectores: 1) corresponde a una de las esquinas de la sección y se compone principalmente por finos cristales de cuarzo, agregados de granate con moderada alteración, cristales subhedrales diseminados en moscovita, biotita verde diseminada, masas de clorita, circón muy fino y esfalerita interpenetrada con clorita acicular; con moderada oxidación (especialmente hacia el borde de la banda) y cortada por vetillas tardías de calcita. Hacia un sector de esta banda, se aprecian cristales de moscovita con distribución radial. 2) Esta zona muestra color verde en muestra de mano, y se compone en gran parte por una mezcla de sericita y clorita, que reemplaza totalmente la roca previa (apatito y circón diseminados indican un posible protolito ígneo), y se relaciona con cantidades variables de cuarzo y calcita. 3) Parece corresponder a una zona transicional entre varios de los ensambles de alteración, en la que se aprecian variaciones porcentuales marcadas en los contenidos de calcita, cuarzo y clorita-sericita. Allí, se remarca la presencia de fantasmas de fenocristales completamente reemplazados. 4) Sulfuro masivo compuesto principalmente por cristales masivos de esfalerita roja, opacos y fluorita, con rellenos de calcita y cuarzo, vetillas de calcita y desarrollos dentríticos de sericita-clorita. Entre el sulfuro masivo y el skarn, se aprecian una serie de vetillas de calcita paralelas al contacto.

Por su parte, el sulfuro masivo está conformado principalmente por pirita, esfalerita y marcasita, con menores cantidades de arsenopirita, galena, calcopirita y pirrotina, esta última restringida a inclusiones en los otros sulfuros y a locales intercrecimientos con la galena. La pirita y la esfalerita se encuentra en agregados masivos que ocupan la mayor parte de la muestra, y exhiben múltiples inclusiones de galena, pirrotina, calcopirita y arsenopirita. La arsenopirita, galena y calcopirita se encuentran diseminadas en la roca y como inclusiones en pirita-esfalerita y entre sí (pirrotina y pirita en galena). Por último, la marcasita muestra textura de reemplazamiento y se ubica comúnmente hacia los bordes de la pirita de grano más grueso, creciendo a expensas de ésta, y se asocia con una pirita de grano más fino.



Izq. Agregado de moscovita (Ms) asociado con biotita verde (Bt) y esfalerita (Sp), rodeados por masas de sericita (Ser). Sobreimpuesto, se aprecia una vetilla de calcita (Cal) y parches de óxidos de Fe (FeOx). Der. Agregado de granate (Grt) con maclado polisintético pobremente desarrollado, con superposición de óxidos de Fe (FeOx) y sericita (Ser).



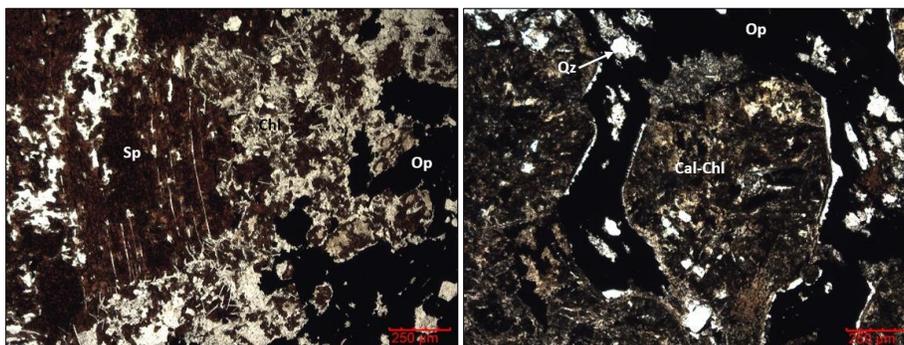
Izq. Marcasita (Mrc) rodeando a cristales de pirita (Py), los cuales están asociados con esfalerita (Sp). Der. Esfalerita (Sp) enferma asociada con galena (Gn), cortada por vetillas entrecruzadas de marcasita (Mrc). Véanse pequeñas inclusiones de pirrotina (Po) en la galena.

SM-43-14 B

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Calcita	Agregados, bandas, pervasiva, parches, reemplazamiento		Anhedral
Clorita	Agregados	Acicular radial	Euhedral
Biotita verde	Diseminada, agregados		Euhedral a anhedral
Esfalerita	Masiva	Enferma	Anhedral
Cuarzo	Agregados, inclusiones en Sp, intersticial		Anhedral a euhedral
Moscovita	Intersticial		Anhedral a subhedral
Turmalina	Diseminada, agregados		Anhedral
Fluorita	Masiva		Anhedral
Tremolita-actinolita	Diseminada		Subhedral a euhedral
Opacos	Masiva, diseminada, intersticial		Anhedral a euhedral
Óxidos de Fe	Parches, intersticial		-

Roca con bandeamiento composicional muy marcado, con avanzada retrogradación a minerales como clorita, calcita, biotita verde, entre otros. *Grosso modo*, las bandas que conforman a la roca son: 1) mármoles inequigranulares con rellenos de saussurita y sobreimposición de óxidos de Fe, los cuales pueden mostrar ligera deformación de sus maclas y una foliación incipiente, concordante con el bandeamiento; 2) roca desconocida con sobreimposición pervasiva de carbonato microcristalino de aspecto muy terroso, con agregados de cuarzo y una mayor cantidad de esfalerita y opacos diseminados, y vetillas y lentes de calcita; 3) zona rica en esfalerita y opacos, asociados con calcita, clorita acicular y cuarzo, minerales que muchas veces engloban “fragmentos” de las otras bandas; 4) aparente granatita con fuerte retrogradación a clorita, calcita y biotita verde, con algunos óxidos superpuestos y opacos intersticiales entre los pseudomorfos de los granate. Asimismo, se aprecian sectores con desarrollo de opacos masivos, asociados con calcita, fluorita y cuarzo.



Izq. Agregados de clorita (Chl) acicular, intercrecida con esfalerita (Sp) y minerales opacos (Op). Der. Granates (Grt) con fuerte retrogradación a calcita (Cal) y clorita (Chl), con desarrollo de cuarzo (Qz) y opacos (Op) intersticiales.

SM-43-16

Descripción macroscópica

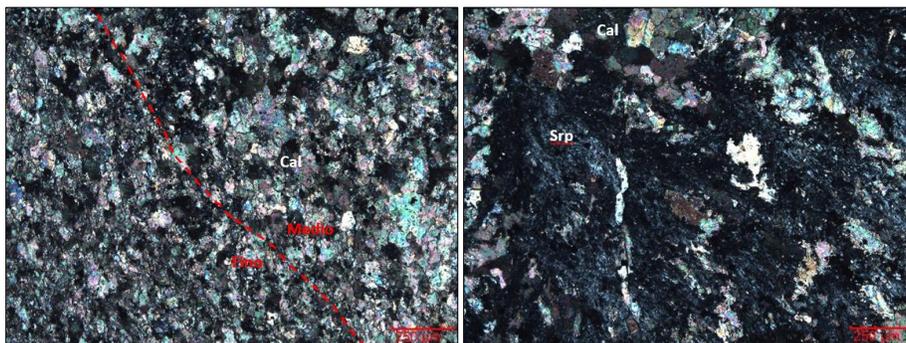
Caliza de color variable entre blanco y gris medio cortada por diversas vetillas multidireccionales de carbonato-cuarzo-clorita, con recristalización y silicificación por parches. Se observan sulfuros diseminados de grano muy fino, pirita y arsenopirita, preferencialmente localizadas en bandas verdosas conformadas principalmente por cuarzo, bordeando las vetillas de carbonato y diseminados en las zonas de color gris medio. Hay presencia adicional de agregados de minerales de arcilla y óxidos terrosos puntuales.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Calcita	Vetillas, agregados, poligonal		Anhedral
Serpentina (?)	Agregados, radial		Anhedral
Cuarzo	Agregados	Ameboide	Anhedral
Minerales de arcilla	Agregados		Anhedral

Mármol bandeado compuesto principalmente por bandas de calcita y serpentina en distintas cantidades, cortado por vetillas multidireccionales, continuas y sinuosas de calcita y minerales de

arcilla. Asimismo, se aprecian agregados de cuarzo con textura ameboidal diseminados, y agregados, vetillas y diseminaciones de opacos (pirita-arsenopirita).



Izq. Banda de mármol de grano medio a fino, compuesta por agregados poligonales de calcita (Cal). Nótese agregados de serpentina (Srp) y minerales opacos (Op) diseminados. Der. Zona con abundante serpentina (Srp) desarrollada en agregados masivos.

SM-43-17

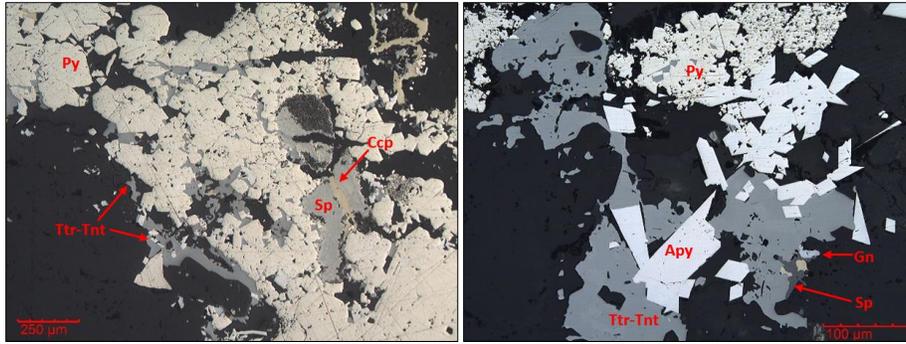
Descripción macroscópica

Mármol bandeado, de color gris claro y gris medio, de apariencia maciza y bandas muy delgadas y acuñaadas de sulfuros de grano muy fino. Cortando, se presenta una vena conformada primordialmente por carbonato blanco, con pirita y calcopirita euhedrales de grano fino a medio, y aparentes fragmentos líticos de color gris oscuro con sulfuros diseminados de tamaño muy fino (arsenopirita). Asimismo, se encuentran agregados de epidota en los líticos y fluorita verde diseminada.

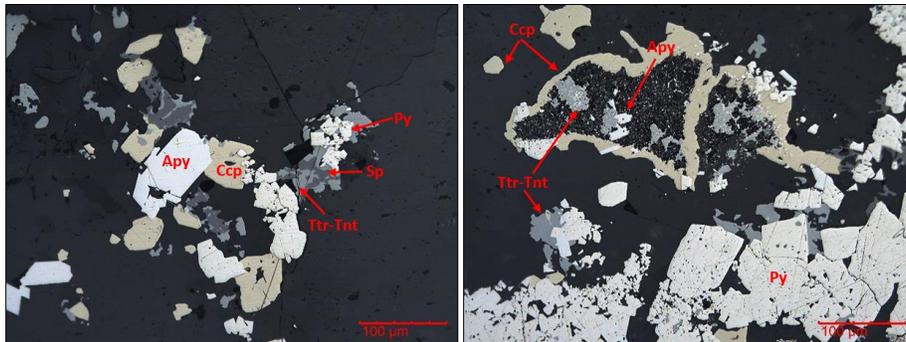
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Pirita	Masiva		Anhedral
Arsenopirita	Agregados		Euhedral
Esfalerita	Diseminada		Anhedral
Calcopirita	Intersticial, inclusiones		Anhedral
Tetraedrita-tenantita	Intersticial	Enferma	Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Py		Anhedral
Galena	Diseminada		Anhedral

Vena de carbonato de grano grueso, con mineralización abundante de pirita y arsenopirita, predominantes, y menos calcopirita, esfalerita y tetraedrita-tenantita. La pirita, arsenopirita, esfalerita y calcopirita conforman un evento temprano, encontrándose a manera de agregados masivos de cristales grueso, agregados de cristales finos y euhedrales, en inclusiones con textura enferma y diseminados o en inclusiones, respectivamente. Posteriormente, se forman agregados de pirita de grano mucho más fino, calcopirita y tetraedrita-tenantita de textura intersticial entre la pirita fina y en fracturas de la gruesa.



Izq. Tetraedrita-tenantita (Ttr-Tnt) intersticial entre cristales de pirita (Py), en asociación con calcopirita (Ccp). La pirita, por su parte, se relaciona con cristales de esfalerita (Sp) con textura enferma, donde las exsoluciones de calcopirita son en extremo abundantes. Der. Principal asociación de la roca, conformada por tetraedrita-tenantita (Ttr-Tnt), esfalerita (Sp), arsenopirita (Apy), pirita (Py) y galena (Gn). Véase la textura intersticial en la tetraedrita-tenantita, dentro de los cristales de pirita.



Izq. Intercrecimientos de esfalerita (Sp) y tetraedrita-tenantita (Ttr-Tnt), en contacto con calcopirita (Ccp), arsenopirita (Apy) y pirita (Py). Der. Textura coronaria en calcopirita (Ccp), rodeando cristales de pirita (Py), arsenopirita (Apy) y tetraedrita-tenantita (Ttr-Tnt) con textura enferma.

SM-43-18

Descripción macroscópica

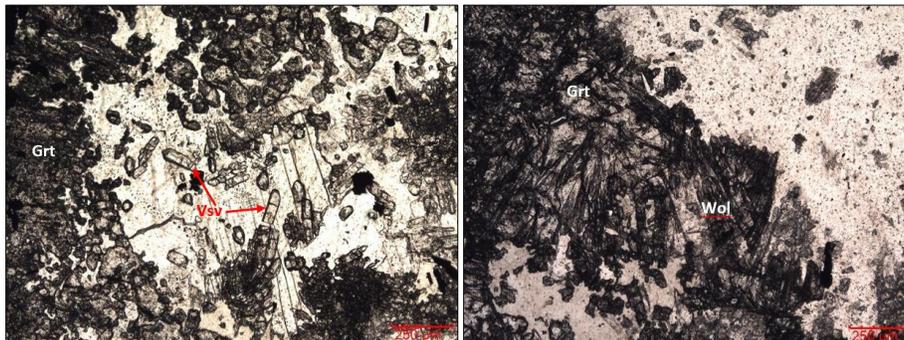
Exoskarn muy bandedo. Siguiendo la orientación de la muestra, se inicia con un sector de color beige verdoso, donde se presenta abundante granate, agregados de clorita, pequeños rellenos de fluorita y sulfuros muy finos diseminados. Enseguida, viene una zona con abundante fluorita, sulfuros muy finos (arsenopirita), vetillas de carbonato discontinuas y clorita que embebe "fragmentos" de la roca y le da una apariencia brechada. Por último, se aprecian cristales redondeados de carbonato y otros regulares de granate. Cortando longitudinalmente a la muestra, se observa una zona deformada, con la formación de pequeños pliegues. También hay rellenos irregulares de cuarzo y carbonato.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Granate	Agregados	Zonación	Anhedral a subhedral
Vesuvianita	Agregados		Euhedral
Wollastonita	Agregados fibrosos		Euhedral
Calcita	Parches, pervasiva, intersticial, vetillas		Anhedral

Serpentina	Rellenos, agregados		Anhedral
Cuarzo	Rellenos, microcristalina		Anhedral
Moscovita	Agregados radiales	Abanico	Anhedral
Opacos	Vetillas, diseminada		Euhedral a anhedral

Skarn bandeado conformado por la asociación prógrada de granate, wollastonita, vesuvianita y calcita, con retrogradación moderada a calcita, serpentina y cuarzo. *Grosso modo*, en la roca se reconocen al menos tres bandas características: 1) zona con mayor contenido de granate, vesuvianita y wollastonita, parcialmente reemplazados por calcita, serpentina, cuarzo microcristalino y, en menor medida, moscovita, conformando pseudomorfos tabulares y vetillas restringidas a los cristales alterados. 2) Banda con reemplazamiento pervasivo del granate por agregados microcristalinos de carbonato de aspecto muy terroso, abundancia de parches de serpentina, reemplazamiento fuerte de vesuvianita-wollastonita por masas de calcita de relieve muy ondulante y rellenos locales de cuarzo. Lo más representativo de este sector, es la presencia de agregados de una gran cantidad de pseudomorfos de fibrillas orientadas de wollastonita reemplazadas totalmente por calcita. 3) En contraste con las otras bandas, en esta el grano es mucho más fino y la proporción de pseudomorfos de granate, vesuvianita y wollastonita es menor, predominando calcita, serpentina, cuarzo microcristalino y moscovita. Los opacos se distribuyen diseminados y en vetillas en todas las bandas, en asociación cercana con serpentina. Por último, se aprecia un evento tardío de vetillas y rellenos de calcita masiva-intersticial, que cortan a toda la sucesión mencionada.



Izq. Cristales tabulares de vesuvianita (Vsv) asociada con granate (Grt), con calcita (Cal) intersticial. Der. Wollastonita (Wol) superpuesta a cristales de granate (Grt).

SM-43-19

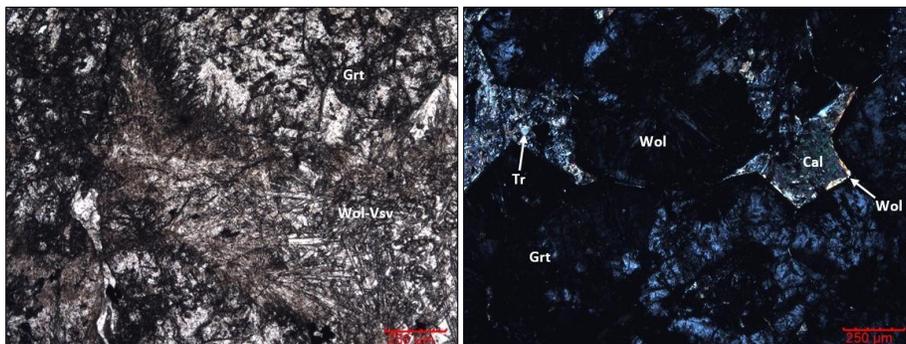
Descripción macroscópica

Exoskarn con variaciones muy marcadas de color entre verdoso, beige, marrón, gris claro y blanco, con vetilleo multidireccional de carbonato, sin mineralización asociada. Las variaciones de color están dadas por presentar distintas concentraciones de epidota, granate, wollastonita, calcita, sericita, minerales de arcilla y posibles óxidos terrosos. Se observan escasos sulfuros diseminados indistintamente, de grano muy fino.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Granate	Agregados	Zonación	Subhedral a euhedral
Wollastonita	Agregados radiales	Acicular	Euhedral
Vesuvianita	Diseminada		Euhedral
Calcita	Poligonal		Anhedral
Cuarzo	Masas		Anhedral
Epidota	Agregados, parches		Anhedral
Calcita	Pervasiva, vetillas, intersticial		Anhedral
Biotita verde (?)	Diseminada		Subhedral
Moscovita	Reemplazamiento, diseminada		Subhedral
Titanita	Diseminada		Anhedral
Cuarzo	Rellenos, vetillas		Anhedral
Opacos			

Skarn conformado principalmente por granate, wollastonita, vesuvianita, calcita y cuarzo como minerales prógrados, y epidota, calcita, cuarzo, biotita verde y moscovita en reemplazamientos moderados, relacionados con la fase retrógrada. La roca exhibe una sectorización muy denotada por: 1) una zona rica en los minerales calcisilicatados (wollastonita-vesuvianita-granate) reemplazados por agregados grosgranulares de epidota-moscovita-biotita verde, y 2) otra con preponderancia de calcita y cuarzo, con parches espaciados de epidota y moscovita. Cortando, se aprecian vetillas crustiformes con ligero cizallamiento y zonación textural, conformadas por cristales de cuarzo y calcita con texturas en empalizada y masiva en los bordes, y bandeada, semi-masiva y microcristalina en el centro. Adicionalmente, la mena está dominada por minerales opacos (arsenopirita y algo de piritita), que se encuentran diseminados en asociación con la paragénesis retrógrada, y en vetillas tardías junto con calcita y cuarzo.



Izq. Agregados masivos de granate (Grt) intercrecidos con wollastonita (Wol) y vesuvianita (Vsv). Der. Calcita (Cal) y moscovita (Ms) intersticiales entre granates (Grt) y agregados radiales de wollastonita (Wol). Nótese además rellenos de calcita y tremolita (Tr).

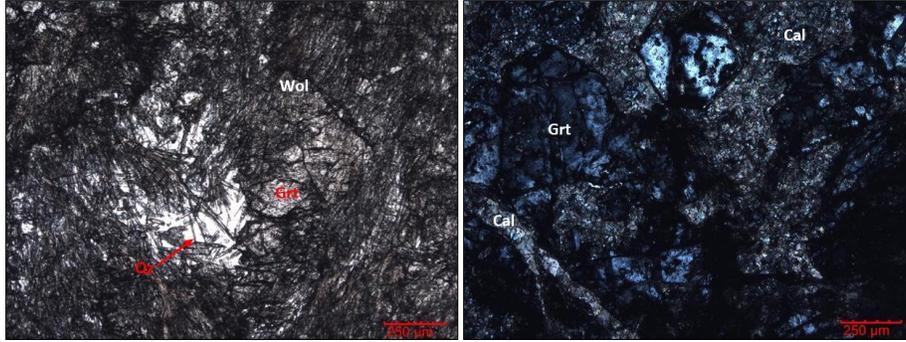
SM-43-20**Descripción macroscópica**

Exsokarn con bandeamiento de varios colores. Se observan parches de color gris medio de grano mucho más fino, con escasos sulfuros muy finos diseminados; otros de color verde oscuro, con mucha clorita y sílice; y otros redondeados con abundante carbonato. Cortando, se aprecia una vetilla de carbonato con escasa piritita y desarrollo de un halo de color gris verdoso oscuro, no continuo.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Granate			Subhedral a euhedral
Wollastonita	Acicular radial		Euhedral
Vesuvianita	Acicular radial		Euhedral
Piroxeno	Inclusiones en granate		Anhedral
Calcita	Intersticial, vetillas, reemplazamiento		Anhedral
Carbonato	Reemplazamiento		Anhedral
Biotita verde	Diseminada		Subhedral
Epidota	Reemplazamiento Grt		Anhedral
Sílice-cuarzo	Rellenos y vetillas	Ameboidal	Anhedral
Cuarzo	Rellenos		Anhedral
Esfalerita	Masiva	Enferma	Anhedral
Piritita	Masiva	Simplectítica (?)	Anhedral
Arsenopiritita	Agregados, intersticial		Euhedral a anhedral
Calcopiritita	Exsoluciones en Sp		Anhedral
Sulfosal	Inclusiones en Sp		Anhedral a subhedral
Magnetita			Anhedral
Proustita-pirargirita	Inclusiones en Sp		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Sp-Ccp-Apy		Anhedral

Skarn conformado principalmente por granate, calcita, vesuvianita y wollastonita como minerales primarios, cuya distribución no es homogénea en la roca y se concentran en agregados en ciertos sectores. Éstos presentan avanzado reemplazamiento por parte de carbonatos de grano muy fino, los cuales generan una alteración pervasiva que oblitera la mayoría de sus características, dejando zonas inalteradas. Sobreimpuesto, se observan además parches de un carbonato en agregados irregulares de relieve ondulante muy marcado y vetillas continuas e irregulares de calcita-cuarzo microcristalino-cuarzo. Los minerales opacos son muy escasos, y se localizan diseminados en la roca y en vetillas discontinuas.



Izq. Agregados fibrosos de wollastonita (Wol) sobrepuestos a los cristales de granate (Grt) y cuarzo (Qz).
Der. Granates (Grt) idiomórficos con rellenos de calcita (Cal), cortado por vetillas tardías de este mismo carbonato.

SM-43-21

Descripción macroscópica

Exoskarn conformado por intercalaciones de bandas de color gris claro, verde oscuro, beige y verde pálido. Su mineralogía es muy variada y se compone de: bandas de carbonato-granate-piroxeno (?) de grano fino a muy fino, zonas cloríticas, sectores ricos en epidota con feldespatos blancos (?) y una banda (¿vena?) de 3,5 cm de espesor, muy rica en cuarzo, carbonato, clorita, calcopirita, piritita y pirrotina.

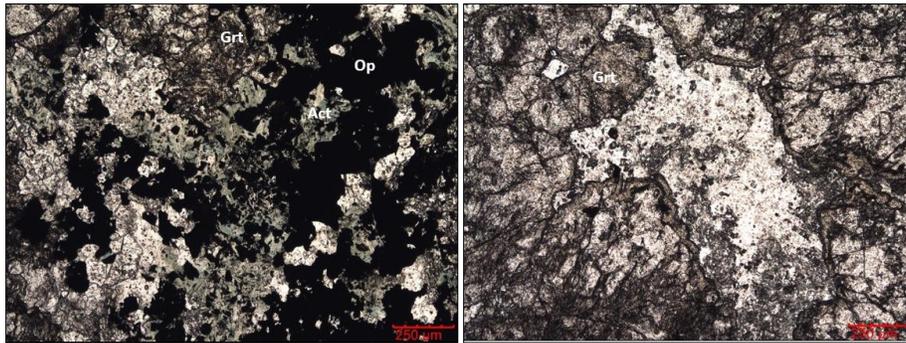
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Granate	Agregados		Euhedral a subhedral
Wollastonita	Agregados fibrosos		Euhedral
Calcita	Poligonal, intersticial		Anhedral
Cuarzo	Intersticial, poiquiloblástica		Anhedral
Tremolita	Ramilletes		Subhedral a euhedral
Epidota (?)	Diseminada		Anhedral
Actinolita	Agregados, vetillas	Intersticial	Subhedral
Calcita	Agregados, vetillas, reemplazamiento		Anhedral
Cuarzo	Intersticial, poiquiloblástica		Anhedral
Sulfuros (esfalerita-opacos)	Intercrecimiento con Act, diseminada		Anhedral
Clorita	Vetillas, agregados		Anhedral

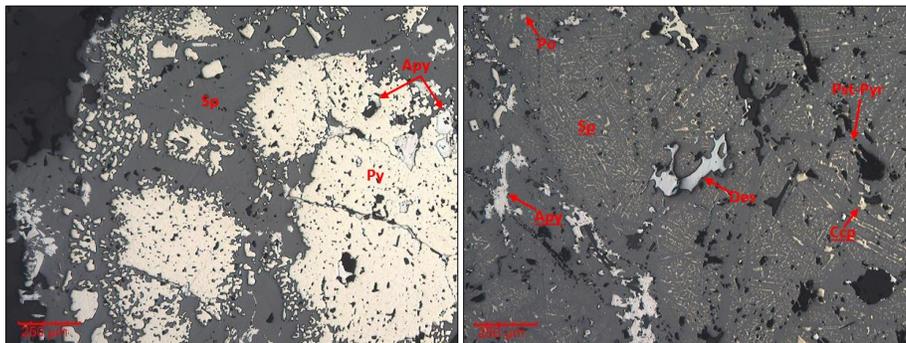
Skarn bandeado compuesto por granate, vesuvianita, wollastonita y calcita como minerales prógrados, y tremolita, actinolita, calcita, clorita y minerales de mena asociados con la etapa retrógrada. Según la mineralogía y sus proporciones, pueden definirse al menos cuatro bandas: 1) mármol compuesto mayoritariamente por calcita, asociada con cristales finos de granate poiquiloblásticos y ramilletes de tremolita. 2) Banda de espesor casi continuo, muy rica en sulfuros relacionados con actinolita, que intercepta un sector de la roca compuesto por calcita, tremolita y granates incoloros y euhedrales con inclusiones de tremolita. La actinolita y los sulfuros se

superponen en parte a las bandas 3 y 1. 3) Granatita compuesta predominantemente por granates zonados (incolores a ligeramente amarillos), asociados con wollastonita, calcita y tremolita, cuyos intersticios cristalinos están rellenos de calcita y cuarzo. 4) Banda compuesta casi exclusivamente por calcita y tremolita, con granates diseminados y parches de actinolita-esfalerita-opacos y calcita terrosa-esfalerita superpuestos. Cortando, se aprecian vetillas rectilíneas y continuas de calcita-clorita-actinolita-esfalerita-opacos.

La zona de sulfuros masivos está conformada principalmente por esfalerita, arsenopirita y pirita, con menores proporciones de calcopirita, sulfosales, magnetita y pirrotina, todas ellas muy relacionadas con la esfalerita, ya sea como inclusiones o exsoluciones. La pirita se encuentra en agregados con bordes de textura “sacaroide”, muy similar a una textura simplectítica desarrollada cuando está en contacto con la esfalerita. La esfalerita conforma cristales masivos con abundantes exsoluciones de calcopirita y muchas inclusiones de arsenopirita, sulfosales y pirita. La arsenopirita compone agregados oquerosos y esqueléticos diseminados en varios sectores de la roca, en asociación y ligeramente tardío a pirita y esfalerita. Por último, la magnetita se halla en cercana asociación con esfalerita y puede tener pequeñas inclusiones de sulfosales.



Izq. Masas de actinolita (Act) en cerca asociación con mineralización de sulfuros (Op), desarrolladas entre los cristales de granate (Grt). Der. Zonación de granates (Grt) marcada por la presencia de núcleos incolores y bordes amarillos.



Izq. Textura semejante a simplectítica, desarrollada entre pirita (Py) y esfalerita (Sp). También se aprecian cristales de arsenopirita (Apy) en asociación. Der. Cristal de sulfosal (Des) embebido por masas de esfalerita (Sp) con abundantes exsoluciones lamelares de calcopirita (Ccp), pirrotina (Po) y proustita-pirargirita (Pst-Pyr), que no son continuas en toda la masa. Nótese además agregados de arsenopirita (Apy) incluidos en la esfalerita.

SM-58-1**Descripción macroscópica**

Mármol con diversos grados de recristalización, de color gris claro a gris verdoso (dependiendo del tamaño de grano), con vetillas y rellenos ovalados de carbonatos. En contacto, se encuentra un cuerpo de sulfuros masivos conformado principalmente por pirita y esfalerita de gran tamaño, que también son atravesados por vetillas de carbonato manchadas de óxidos. En determinados sectores, se observan zonas reemplazadas parcial y totalmente por serpentina (otorga un color verdoso y brillo graso).

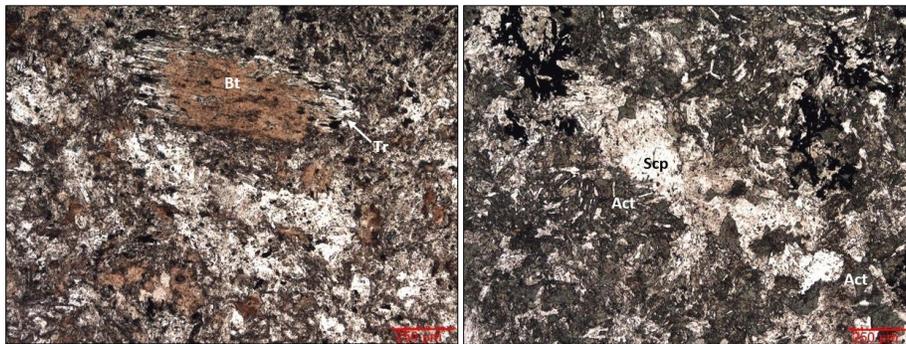
SM-58-2**Descripción macroscópica**

Se trata de una roca con parches y bandas de distintos colores, entre los que predominan marrón, verde oscuro y verde claro. Los sectores marrones son los predominantes y parecen productos de alteración potásica (biotita hidrotermal) pervasiva que ha borrado completamente las características texturales originales. Sobreimpuesto se aprecian sectores cloritizados y vetillas muy delgadas y rectilíneas de carbonato-actinolita, algunas de las cuales muestran halos de clorita. Cortando la roca se observa una vena brechada de calcita, que arranca y embebe muchos clastos angulares del encajonante; y presenta bandas puntuales ricas en pirita. En el sector inferior de la muestra, su textura difiere un poco del superior y su color es marrón claro con parches blancos por la presencia de carbonatos-anfíbol (?). A pesar de que no puede establecerse con certeza el tipo de roca, algunos agregados de clorita parecen pseudomorfos de ferromagnesianos, definiendo una textura microporfírica relíctica. En toda la muestra se aprecian agregados diseminados de sulfuros, pirita principalmente.

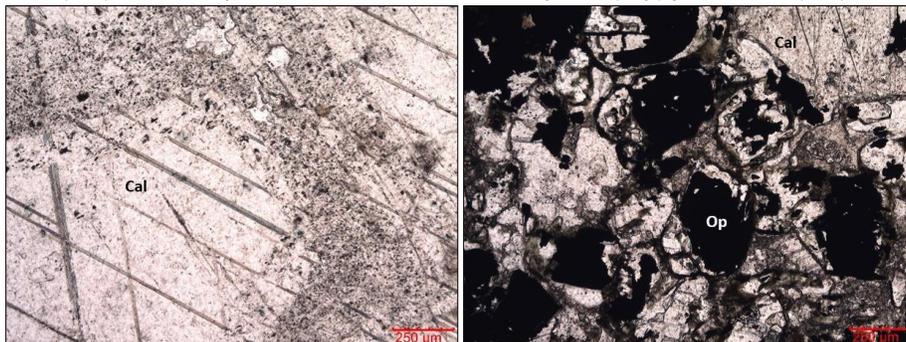
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Plagioclasa			Subhedral
Cuarzo			Anhedral
Apatito	Diseminada		Subhedral
Biotita hidrot.	Reemplazamiento, vetillas, agregados, diseminada		Subhedral
Tremolita	Agregados, vetillas		Subhedral
Actinolita	Agregados, vetillas		Anhedral a subhedral
Calcita	Venas, vetillas, parches	Zonada	Anhedral a euhedral
Anfíbol	Vetillas, reemplazamiento, agregados		Subhedral
Sericita	Relleno, reemplazamiento, agregados		Anhedral
Clorita	Remplazamiento, vetillas		Anhedral
Moscovita	Reemplazamiento		Subhedral
Opacos	Vetillas, diseminada, agregados		Anhedral
Esfalerita	Diseminada		Anhedral
Cuarzo	Venas		Anhedral
Titanita	Diseminada, parches		Anhedral

Roca de textura holocristalina finogranular, conformada por cristales tabulares de plagioclasa, anhedrales de cuarzo y subhedrales de apatito, que definen una composición tonalítica. Sobreimpuestos, se aprecian distintos procesos hidrotermales que obliteran moderada a fuertemente las características primarias. El primero de ellos, corresponde a una alteración potásica de biotita secundaria, distribuida en toda la roca a modo de parches y diseminaciones de intensidad moderada; ésta parece estar relacionada únicamente con moscovita, pero no es clara la asociación porque localmente parece un reemplazamiento. Posteriormente, se produjo una alteración calcisilicatada de tremolita, calcita, cuarzo y opacos, distribuida principalmente en agregados (psuedomorfos rómbicos y tabulares), parches, vetillas y coronas alrededor de los cristales más grandes de biotita. Enseguida, se generó otra alteración calcisilicatada en vetillas, halos y, menos frecuentemente, diseminaciones, conformada por la asociación actinolita-opacos-calcita-cuarzo-escapolita. Por último, se genera una vena brechada de calcita, que embebe varios clastos de la roca, y se asocia con cuarzo y minerales opacos; esta estructura es continua y muestra algunas vetillas satélites que cortan a toda la asociación previamente descrita.



Izq. Alteración potásica de biotita secundaria (Bt), distribuida a modo de agregados y parches de intensidad moderada. Rodeando algunos cristales de esta mica, se presenta tremolita (Tr). Der. Parches de actinolita (Act), cortados por vetillas rectilíneas de escapolita (Scp) y actinolita (Act).



Izq. Zonación en los cristales de calcita (Cal) de la vena brechada. Der. Distribución de los minerales opacos (Op) en vena, muchas veces formando coronas alrededor de los cristales de calcita (Cal).

SM-58-3

Descripción macroscópica

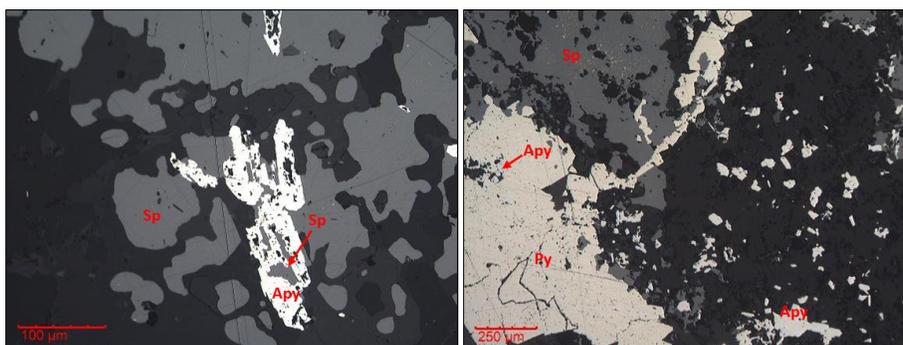
Caliza de color blanco y verdoso, dependiendo de la cantidad de clorita-epidota, con recristalización moderada que produce cristales de grano medio, en contacto con cuerpo de sulfuros y óxidos masivos, conformados principalmente por pirita, esfalerita marrón oscura y pirrotina, esta última moderadamente oxidada. Los sulfuros se disponen en bandas (o cuerpos irregulares), ricas en pirita y bandas ricas en esfalerita-pirrotina, y en ocasiones, desarrollan bandas intermedias con

abundante fluorita con clorita. Como evento tardío se presentan vetillas delgadas de carbonatos que cortan a los sulfuros y a la caliza.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Pirita	Masiva		Euhedral a anhedral
Esfalerita	Masiva, intersticial	Enferma	Anhedral
Arsenopirita	Agregados, diseminada	Esqueletal	Subhedral a anhedral
Calcopirita	Diseminada, inclusiones		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones		Anhedral

Sulfuro masivo compuesto predominantemente por esfalerita y pirita, con menores cantidades de arsenopirita, calcopirita y pirrotina. La pirita se presenta en agregados masivos de gran tamaño, donde sus cristales son euhedrales a anhedrales y muestran variedad de inclusiones (arsenopirita, esfalerita, pirrotina y calcopirita). Por su parte, la esfalerita conforma masas grandes con textura oquerosa y enferma, y un gran número de inclusiones de pirrotina, calcopirita y arsenopirita. La arsenopirita aparece en agregados y como cristales individuales diseminados e incluidos en pirita y esfalerita; también con textura esqueletal e intercrecimientos con esfalerita.



Izq. Cristales esqueletales de arsenopirita (Apy) asociados con esfalerita (Sp). Der. Pirita (Py) asociada con esfalerita (Sp) enferma, con rellenos de arsenopirita (Apy) en agregados.

SM-58-4

Descripción macroscópica

Pirita masiva, junto con parches de esfalerita y pirrotina muy oxidada en roca con alteración pervasiva, de la que no se reconocen sus características originales. El principal mineral de alteración es clorita, especialmente abundante en las zonas más ricas en sulfuros, pero presente en toda la muestra. Además, se encuentran rellenos de cuarzo ligeramente lechoso, concentrados en el sector opuesto a los sulfuros. Cortando, se observa un entramado de vetillas satélites que parten de una vena de aproximadamente 1 cm, conformada por un mineral duro y de color rosado (¿feldespato?).

SM-58-5

Descripción macroscópica

Roca de color predominantemente verde, con distintas tonalidades debidas a las concentraciones de clorita y epidota, con parches de oxidación en muchos sectores y pequeños sulfuros diseminados.

En contacto se aprecia un cuerpo de pirita y esfalerita masivas, con muchas oquedades intercrystalinas. Cortando aparecen vetillas muy oxidadas de un mineral rosado de gran dureza, que además desarrolla planos de exfoliación, muy similar a un feldespató.

SM-58-6

Descripción macroscópica

Posiblemente se trate de la aplita con silicificación pervasiva, porque en sectores se conserva la textura sacaroide de grano muy fino; además presenta mucho cuarzo con formas de listones, que parece ser de origen hidrotermal. La roca está en contacto con cuerpos ricos en esfalerita y pirrotina, con algo de pirita, fluorita y cuarzo. Asimismo, estos cuerpos están en contacto con zonas conformadas enteramente por esfalerita. Cortando, se presentan vetillas muy delgadas y discontinuas de pirita. Como evento tardío se presenta oxidación de la pirrotina y posiblemente parte de los sulfuros muy finos que se hallan diseminados en la roca.

SM-58-7

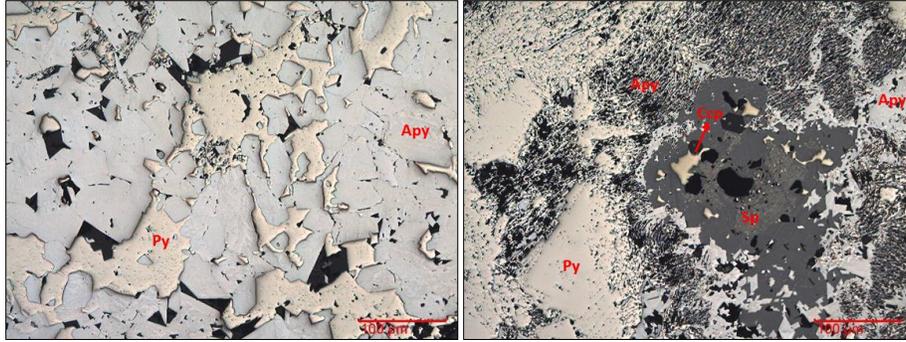
Descripción macroscópica

Roca indiferenciada muy rica en sulfuros, conformada primordialmente por esfalerita caramelo, pirita, arsenopirita y calcopirita, cortados por vetillas de cuarzo lechoso con algunos cristales de cuarzo hialino. Puntualmente se aprecian aparentes relictos de la roca, que parece ser la aplita.

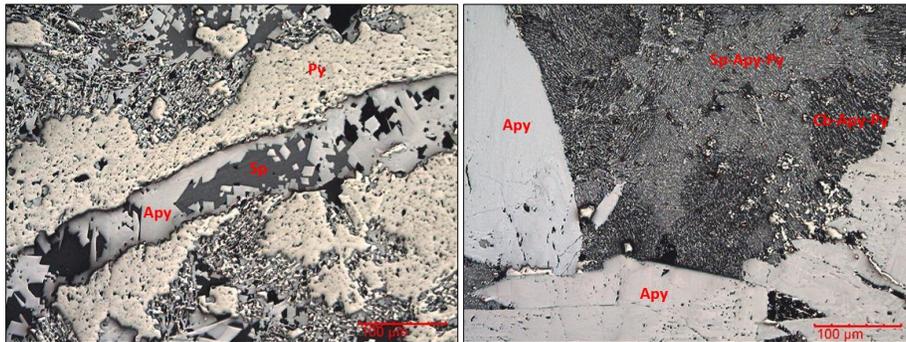
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Esfalerita	Masiva, vetillas	Enferma local	Anhedral
Arsenopirita	Agregada, masiva, vetillas	Intersticial, intercrecimiento	Subhedral a anhedral
Pirita	Masiva, diseminada		Anhedral a euhedral
Calcopirita	Diseminada, exsoluciones		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Apy		Anhedral
Galena	Inclusiones en Apy		Anhedral

Sulfuro masivo conformado por esfalerita, arsenopirita y pirita, con menores cantidades de calcopirita y trazas de pirrotina y galena, en cercana asociación con distintas generaciones de carbonatos. Estos sulfuros muestran complejas relaciones entre sí, apareciendo intercrecimientos de arsenopirita-pirita, esfalerita-arsenopirita-calcopirita y esfalerita-arsenopirita-pirita-carbonato. Asimismo, se aprecia una vetilla rectilínea y continua de arsenopirita y esfalerita. Las distintas generaciones de esfalerita se distinguen porque la más abundante (la masiva) no muestra siempre textura enferma y puede desarrollar zonación, y la de las vetillas tiene textura enferma. En rellenos se aprecia un carbonato blanco, que parece posterior a la mayoría de la mineralización y se asocia únicamente con escasa calcopirita y arsenopirita.



Der. Masas de pirita (Py) desarrolladas en los espacios intercristalinos de la arsenopirita (Apy). Der. Intercrecimientos complejos entre esfalerita (Sp), arsenopirita (Apy), pirita (Py) y calcopirita (Ccp).



Izq. Vetilla de arsenopirita (Apy) y esfalerita (Sp), cortando agregados de pirita (Py). Der. Intercrecimiento de esfalerita-arsenopirita-pirita (Sp-Apy-Py) y carbonato-arsenopirita-pirita (Cb-Apy-Py), bordeados por cristales muy gruesos de arsenopirita.

SM-58-8

Descripción macroscópica

Muestra muy similar a la SM-58-7, conformada por esfalerita, pirita, calcopirita y pirrotina, con remanentes puntuales de una roca fuertemente silicificada y una vena de cuarzo lechoso y carbonato. En este caso, la esfalerita aparece en dos generaciones: una de grano grueso de color caramelo al centro y bordes marrones oscuros, y otra de color marrón oscuro que se asocia con pirrotina. Puntualmente, entre los sulfuros pueden aparecer rellenos de cuarzo lechoso, y es muy común la oxidación en la roca.

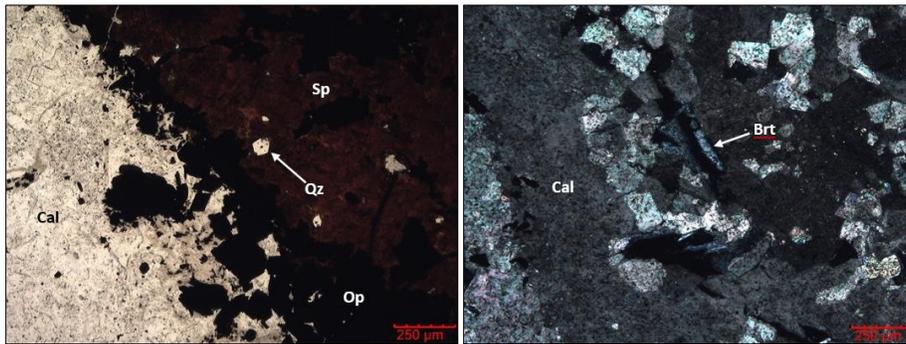
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Calcita	Masiva, mosaico, agregados		Anhedral a euhedral
Cuarzo	Inclusiones en Sp y Op		Subhedral
Minerales de arcilla	Rellenos, agregados		Anhedral
Barita	Agregados		Subhedral
Pirita	Masiva		Anhedral
Esfalerita	Masiva	Enferma	Anhedral
Arsenopirita	Diseminada, inclusiones en Py, masiva	Esqueletal, maclado simple	Euhedral a anhedral
Calcopirita	Exsoluciones en Sp		Anhedral

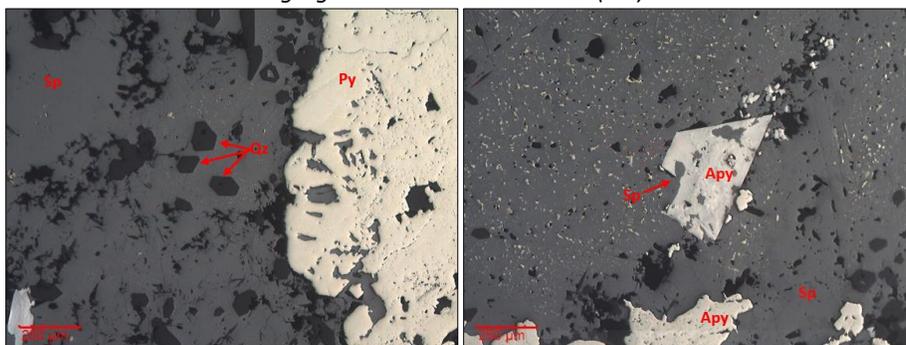
Pirrotina	Inclusiones en Sp y Py		Anhedral
Marcasita	Inclusiones en Sp		Anhedral

Muestra conformada por dos partes: la primera, corresponde a un sulfuro masivo compuesto principalmente por esfalerita y minerales opacos (pirita y menos arsenopirita), con recurrentes inclusiones de cuarzo. La otra está representada por una vena de calcita (masiva y en mosaico), que exhibe rellenos locales de barita, minerales de arcilla y agregados de calcita terrosa en asociación con minerales opacos (arsenopirita). Asimismo, en la estructura son muy comunes las inclusiones euhedrales de calcita rómbica, dentro de la masiva.

El sulfuro masivo se compone principalmente de esfalerita y pirita, con menores cantidades de arsenopirita, pirrotina y calcopirita, estas dos últimas como exsoluciones e inclusiones en pirita y esfalerita. La pirita conforma agregados masivos y presenta inclusiones de arsenopirita, pirrotina y esfalerita. Por su parte, la esfalerita se presenta en masas de gran tamaño con abundantes inclusiones de calcopirita, marcasita, pirrotina, arsenopirita y cuarzo. La arsenopirita se encuentra diseminada en asociación con pirita y esfalerita, y como inclusiones en éstas.



Izq. Contacto entre vena de calcita (Cal) y sulfuro masivo con abundante esfalerita (Sp) y minerales opacos (Op). Véanse inclusiones euhedrales de cuarzo (Qz) en la esfalerita. Der. Dos generaciones de calcita (Cal) que componen la vena, una en cristales rómbicos y en mosaico, y otra masiva. Asimismo, se aprecian agregados tabulares de barita (Brt).



Izq. Esfalerita (Sp) y pirita (Py) de textura masiva, en asociación mutua, esta primera con abundantes inclusiones euhedrales de cuarzo (Qz). Der. Inclusión subhedral de arsenopirita (Apy) en esfalerita (Sp), con "bahías de corrosión" y rellenos de esfalerita.

SM-58-9

Descripción macroscópica

Brecha clastosoportada polimíctica, conformada por fragmentos de mármoles, venas de calcita y rocas argilizadas, en una matriz de carbonato con textura granular; también se aprecian algunos

líticos reemplazados totalmente por pirita, así como pequeños cristales de pirita diseminados en la matriz. Atravesando esta roca aparecen venas de calcita en bloque, que embeben algunos líticos y los alteran en gran medida a illita. Esta estructura es compleja y se compone de varios eventos con diferentes formas y tamaños en sus cristales, algunos de ellos presentan también cuarzo y están fuertemente oxidados. En algunas cavidades se forman geodas de cristales de calcita, y se observan muchas pátinas de hidróxidos de Fe.

SM-58-10

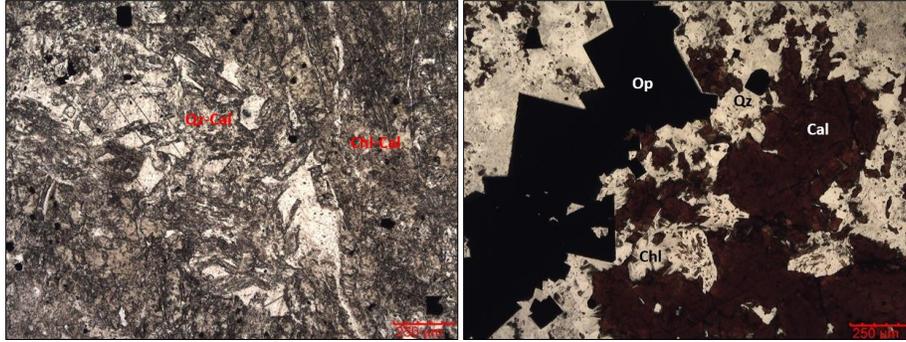
Descripción macroscópica

Caliza recristalizada de color beige con pequeños agregados de calcita blanquecinos, cortada por vetillas de calcita gris-blanca con finos cristales de pirita asociados y halo de illita (?). En contacto se aprecia cuerpo de sulfuros masivos, principalmente pirita y esfalerita, con menores cantidades de arsenopirita y calcopirita. En la interfaz se encuentra un sector muy rico en clorita-illita con abundantes óxidos en los bordes.

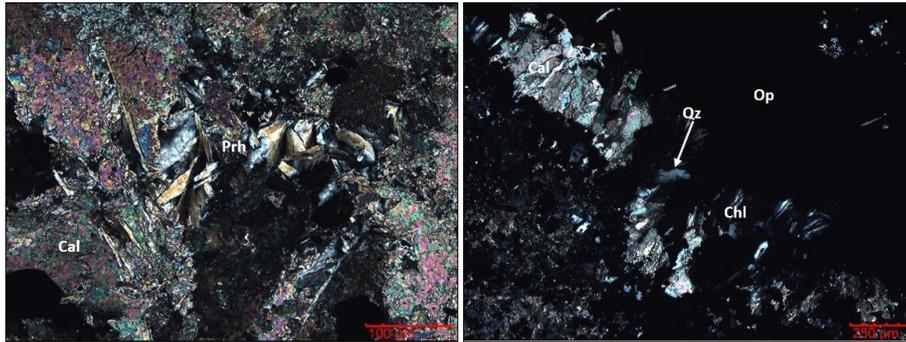
Descripción macroscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Granate	Relíctica		Anhedral
Calcita	Poligonal		Anhedral
Wollastonita	Acicular		Anhedral
Vesuvianita	Relíctica		Anhedral
Cuarzo	Mosaico, agregados		Anhedral
Calcita	Vetillas, reemplazamiento		Anhedral
Tremolita	Diseminada	Acicular	Subhedral
Clorita	Agregados, lentes	Radial	Subhedral
Epidota	Diseminada		Anhedral
Esfalerita	Masiva, diseminada		Anhedral
Opacos	Vetillas, masiva, diseminada		Subhedral a euhedral
Fluorita	Diseminada, rellenos		Anhedral
Adularia	Agregados		Anhedral
Prehnita	Agregados radiales		Subhedral

Skarn bandeado conformado principalmente por granate, wollastonita y calcita, dispuestos en zonas con distintas proporciones y grados de reemplazamiento por parte de una asociación retrógrada. De este modo, se distinguen los siguientes sectores en la roca: 1) mármol de granate-wollastonita-vesuvianita-cuarzo-(tremolita-serpentina), que se caracteriza por los contactos poligonales entre los cristales de calcita; localmente los cristales se aprecian elongados en una dirección preferencial. 2) Granatita constituida por fantasmas de granate reemplazados totalmente por calcita terrosa y clorita radial, rellenos intercristalinos de cuarzo mosaico y agregados de adularia con opacos diseminados. 3) Sector dominado por sulfuros masivos, en asociación cercana con cuarzo, clorita y epidota, con rellenos de calcita. En cercanía del contacto entre 1 y 2, aparece una vetilla continua e irregular de calcita-cuarzo-opacos (pirita)-prehnita, con estructuras satélites más finas. Del mismo modo, se hallan lentejones y vetillas de calcita de escasa continuidad y otras de calcita-pirita continuas.



Izq. Pseudomorfos de granates y wollastonita, completamente reemplazados en calcita (Cal), clorita (Chl) y cuarzo (Qz). Der. Esfalerita (Sp) y minerales opacos (Op) en cercana asociación con clorita acicular (Chl) y cuarzo (Qz).



Izq. Vena de calcita (Cal) con tremolita radial (Tr). Der. Vetillas de calcita (Cal) en empalizada, clorita acicular radial (Chl), cuarzo (Qz) y opacos (Op).

SM-58-11

Descripción macroscópica

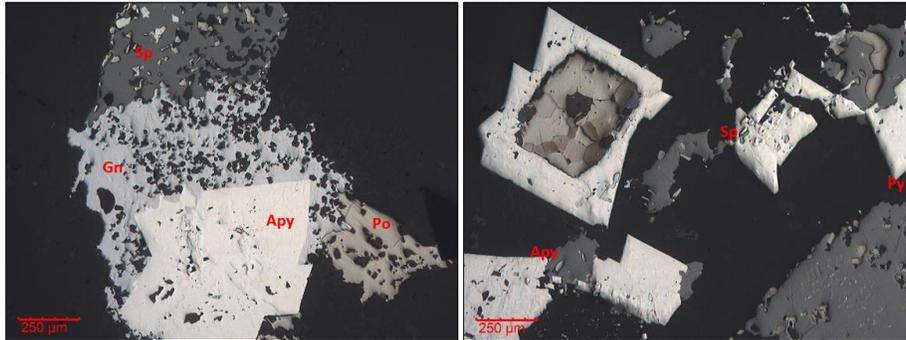
Cuerpo con abundantes sulfuros masivos, principalmente esfalerita, arsenopirita, galena, pirrotina, pirita y calcopirita, relacionados con grandes cristales de fluorita y cuarzo semi-hialino y lechoso. Se sobreimpone una oxidación incipiente a moderada.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Esfalerita	Masiva	Enferma, zonación	Anhedral
Pirita	Diseminada		Subhedral
Pirrotina	Diseminada, agregados	Oquerosa	Anhedral
Galena	Masiva	Oquerosa	Anhedral
Arsenopirita	Diseminada		Subhedral a euhedral
Calcopirita	Exsoluciones, inclusiones		Anhedral
Marcasita	Reemplazamiento		Anhedral

Agregados de sulfuros diseminados, compuesto mayoritariamente por esfalerita, galena, arsenopirita y pirrotina, y menores cantidades de pirita y calcopirita. Todos los sulfuros se presentan en estrecha asociación, presentándose intercrecimientos entre pirrotina y arsenopirita, entre

galena y esfalerita, y entre galena y arsenopirita. Adicionalmente, se presenta marcasita reemplazando a la pirrotina hacia los bordes.



Izq. Asociación primaria de la roca, compuesta por arsenopirita (Apy), esfalerita (Sp), galena (Gn) y pirrotina (Po) con textura oquerosa. Der. Agregados de arsenopirita (Apy) con núcleos de pirrotina (Po).

SM-58-12

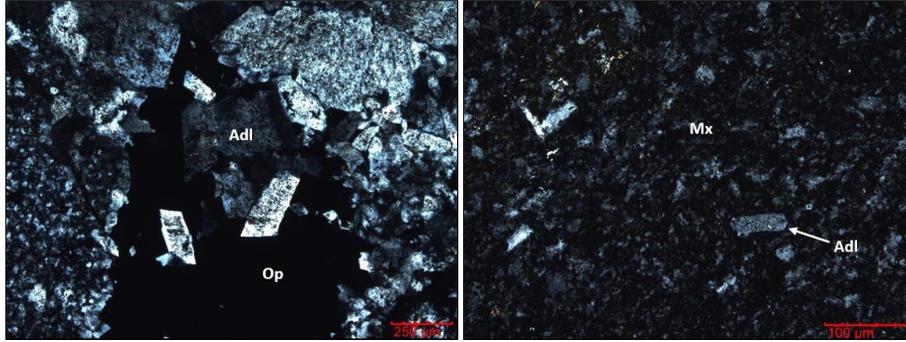
Descripción macroscópica

Aplita con alteración de adularia-cuarzo de dos colores principales, gris medio y blanco. Cortando se aprecian vetillas de dos familias principales, unas de óxidos y otras conformadas por esfalerita. En sectores de la muestra se observan abundantes sulfuros, principalmente arsenopirita, calcopirita, pirita y esfalerita, los cuales se hallan en agregados redondeados e irregulares, con aspecto esquelético.

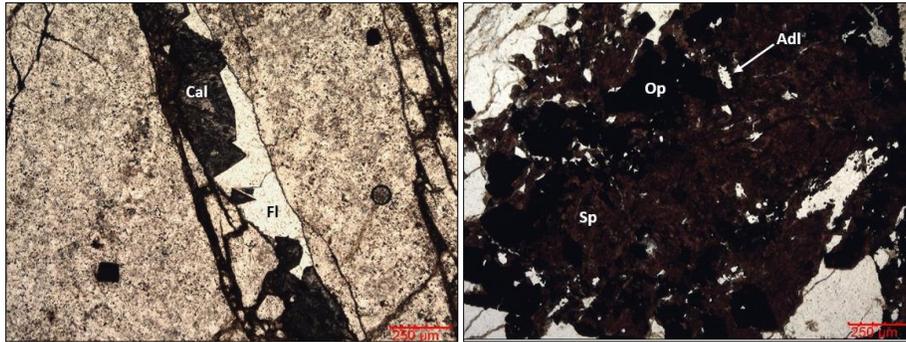
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Adularia	Agregados	Zonación	Euhedral a anhedral
Cuarzo	Inclusiones en opacos		Anhedral
Calcita	Vetillas, rellenos		Anhedral
Fluorita	Agregados, vetillas		Anhedral
Esfalerita	Masiva		Anhedral
Opacos	Masiva		Anhedral
Sericita	Rellenos, agregados		Anhedral
Óxidos de Fe	Parches, vetillas		Anhedral

Roca de textura microporfirírica relictica, denotada por pseudomorfos de pequeños microfenocristales tabulares reemplazados por adularia microcristalina, y rodeados por una matriz criptocristalina. Esta roca es afectada por un proceso de alteración hidrotermal pervasiva, conformada casi totalmente por adularia en asociación con opacos, esfalerita, calcita, cuarzo y fluorita. Cortando, aparecen vetillas anastomosadas y lenticulares de calcita con fluorita. Por último, se desarrollan parches y vetillas de óxidos de Fe.



Izq. Agregado de cristales euhedrales de adularia (Adl) asociados con minerales opacos (Op). Der. Microfenocristales pseudomórficos de plagioclasa reemplazados en adularia (Adl), rodeados por matriz microcristalina (Mx).



Izq. Vetillas de fluorita (Fl) y calcita (Cal) cortando a la roca. Der. Esfalerita (Sp) con inclusiones de adularia (Adl) y asociada con minerales opacos (Op).

SM-58-14

Descripción macroscópica

Aplita fuertemente silicificada, de color gris medio a gris claro, con parches de gran tamaño de pirita-calcopirita-arsenopirita-esfalerita, interconectados por vetillas irregulares y de diferentes espesores y morfología. Cortando se presentan vetillas menores a 1 mm de espesor, compuestas por calcita y pirita, las cuales son continuas y rectilíneas.

SM-58-15

Descripción macroscópica

Roca conformada por tres sectores. El primero es muy rico en pirita, aparente esfalerita y muchos óxidos terrosos. El segundo corresponde a la aplita con silicificación pervasiva y algunos sulfuros en clústeres diseminados y pequeñas vetillas discontinuas. El tercero es una vena de cuarzo lechoso muy fracturada, con abundante pirita, calcopirita y esfalerita en agregados. El primer y segundo sector se caracterizan también porque muestran muchas oquedades en los sulfuros, posiblemente por oxidación y lixiviación.

SM-58-16

Descripción macroscópica

Roca de color gris oscuro a muy oscuro, y gris medio en un sector, con fuerte silicificación y abundantes oquedades, algunas de ellas con formas irregulares, pero otras con formas tabulares que se asemejan en ocasiones a fenocristales. Asimismo, exhibe sulfuros diseminados, concentrados principalmente a manera de relleno de las oquedades ya mencionadas. Es difícil

establecer con certeza el tipo de roca, pero por las características observadas en el sector menos alterado, parece tratarse de la aplita.

SM-58-17

Descripción macroscópica

Contacto entre aplita (?) silicificada con sulfuros en oquedades y caliza con ligera recristalización, de grano fino, cortada por vetillas de cuarzo lechoso y calcita hialina. La caliza presenta además algunos parches de oxidación, y el sector oqueroso parece tener además de pirita y esfalerita.

SM-71-1

Descripción macroscópica

Caliza de color gris claro con ligero brechamiento ocasionado por la circulación de óxidos de Fe. Se aprecia una recristalización muy incipiente, formando cristales de calcita gris observables con la lupa. Además, es cortada por vetillas y venas de calcita blanca en bloque (espesores menores a 1,5 cm), y muestra relictos de pirita (aparentemente framboidal), que parece ser el producto que se está oxidando.

SM-71-2

Descripción macroscópica

Conglomerado conformado por clastos de calizas de tonalidades gris y gris verdoso, también hay unas beige muy alteradas, los cuales aparecen nadando en una matriz mayoritariamente calcárea, con bandas sinuosas de color negro (posiblemente lodolitas negras). Puntualmente, se hallan cristales cúbicos diseminados de pirita.

SM-71-3

Descripción macroscópica

Mármol (¿o exoskarn?) con alto grado de recristalización y neoformación de minerales (verdosos claros y otros morados), que posiblemente pueden deberse al metamorfismo térmico. Adicionalmente, se aprecian bandas ricas en esfalerita, que pueden presentar en ocasiones desarrollos dendríticos, pero normalmente se observan en agregados redondeados.

SM-71-4

Descripción macroscópica

Aplita silicificada de color gris medio con parches blanquecinos, con calcopirita y arsenopirita diseminadas y en fracturas (la calcopirita es de grano medio y la arsenopirita de grano muy fino). Puntualmente, presenta rellenos de carbonatos. En la parte inferior de la muestra, se observa una aparente brecha conformada por una matriz de carbonato blanco, y fragmentos líticos de aplitas y de agregados de sulfuros. En ambos sectores de la roca se observan muchas oquedades por lixiviación de los sulfuros, en ocasiones dejando remanentes de óxidos.

SM-71-5

Descripción macroscópica

Brecha con clastos de aplitas fuertemente silicificadas, de color gris claro a blanco, con rellenos de sulfuros (pirita) que al lixivarse o reemplazarse por óxidos, dejan oquedades vacías. La matriz está compuesta enteramente por calcita en bloque, semitraslúcida.

SM-71-6

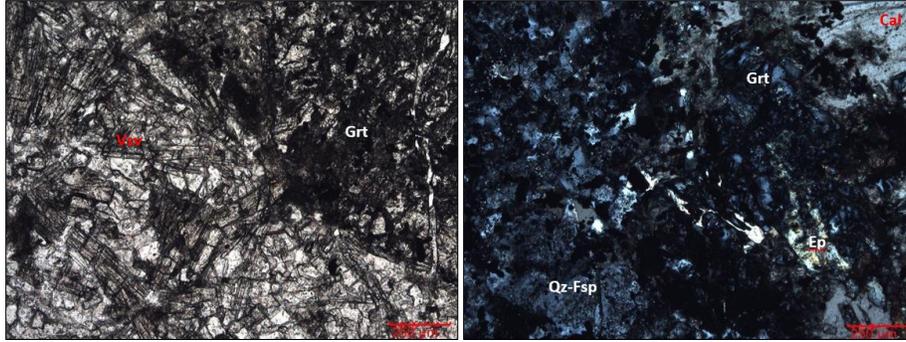
Descripción macroscópica

Exsokarn con bandeamiento muy denotado por bandas de colores gris claro, gris oscuro, verde claro, verde oscuro y una rica en sulfuros (pirita). Tales variaciones de color se deben a la mineralogía, siendo las bandas grises más ricas en carbonatos con algunos agregados de óxidos de Fe, y las verdosas ricas en clorita y epidota. Los sulfuros también se encuentran a manera de clústeres diseminados.

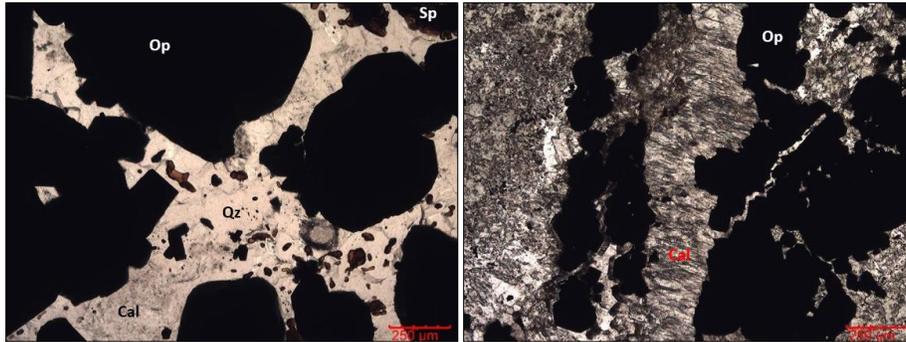
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Granate	Agregados, relíctica	Esqueletal	Subhedral
Vesuvianita	Agregados	Tabular	Subhedral
Plagioclasa			Anhedral
Cuarzo			Anhedral
Calcita	Poligonal		Anhedral
Circón	Diseminada		Subhedral
Calcita	Pervasiva, parches, rellenos, vetillas,		Anhedral
Cuarzo	Vetillas, agregados		Anhedral
Esfalerita	Vetillas, agregados		Anhedral
Opacos	Vetillas, rellenos, agregados, diseminada		Subhedral
Epidota	Agregados, parches		Anhedral
Sericita	Pervasiva, reemplazamiento		Anhedral
Clorita	Masiva, parches, agregados		Anhedral a subhedral

Skarn bandeado compuesto por una asociación primaria de granate, cuarzo, calcita, plagioclasa y vesuvianita, con sobreimposición de un proceso retrógrado conformado por calcita, clorita, epidota, sericita y los minerales de mena. Las bandas que componen la roca son: 1) Mármol de granate y vesuvianita, representado por una porción muy pequeña de la sección delgada, donde los cristales de calcita muestran formas poligonales. 2) Banda cuarzo-feldespática conformada por cristales anhedrales de cuarzo y plagioclasa, con parches de granates fuertemente retrogradados a calcita-clorita-epidota, vetillas de clorita-cuarzo-esfalerita-opacos y rellenos de calcita-cuarzo-opacos; asimismo, muestra superposición de calcita de grano fino de origen tardío. 3) Banda reemplazada pervasivamente por sericita-calcita-cuarzo microcristalino, con escasos relictos de granates alterados parcialmente a clorita, y vetillas de cuarzo-calcita. 4) Zona de la roca con mayor contenido de sulfuros, conformada por relictos de granate reemplazados pervasivamente por masas de clorita-calcita-sericita-epidota, con rellenos de opacos-calcita-cuarzo y clorita-epidota-cuarzo-opacos, y vetillas de calcita. En el contacto entre las bandas 3 y 4, se desarrollan parches de epidota locales.



Izq. Mármol con cristales euhedrales de vesuvianita (Vsv) y relictos de granate (Grt). Der. Banda cuarzo-feldespática (Qz-Fsp) asociada con xenocristales de granate (Grt) fuertemente reemplazados por epidota (Ep) y calcita (Ca).



Izq. Agregados de cuarzo (Qz) y calcita (Ca) relacionados con esfalerita (Sp) y opacos (Op). Der. Estructuras de calcita (Ca) en empalizada asociadas con mineralización (Op).

SM-71-7

Descripción macroscópica

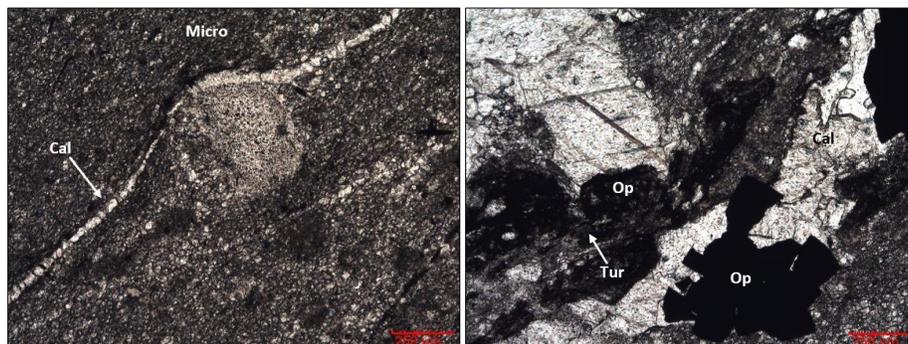
Caliza con recristalización incipiente, de grano fino, color gris medio con tinte marrón, cortada por abundantes vetillas multidireccionales de calcita de color blanco, algunas de ellas con halo delgado y discontinuo de un mineral negro de grano muy fino. Se observa pirita diseminada de grano muy fino. Hacia el extremo inferior de la muestra, se aprecia un cuerpo de sulfuros masivos (esfalerita-pirita-calcopirita), relacionado con una calcita muy similar a la de las vetillas.

Descripción microscópica

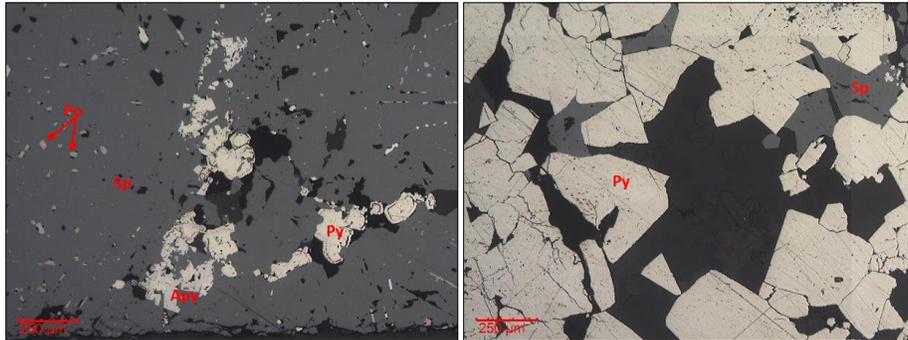
MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Calcita	Vetillas, poligonal		Anhedral
Cuarzo			Anhedral
Sericita	Agregados, recristalización		Anhedral
Turmalina			Anhedral
Esfalerita	Masiva	Enferma	Anhedral
Pirita arseniosa	Masiva, agregados, vetillas	Botrioidal	Euhedral a anhedral
Arsenopirita	Agregados, vetillas		Euhedral
Calcopirita	Inclusiones y exsoluciones en Sp		Anhedral
Galena	Inclusiones en Py		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Sp		Anhedral

Wackestone de peloides con recristalización moderada a microesparita, conformada por agregados poligonales de calcita que rodean organismos totalmente reemplazados por calcita microcristalina, y algunos granos de cuarzo y turmalina. Cortando, se aprecian dos familias de vetillas de calcita con morfologías continuas y sinuosas, y de minerales opacos. Asimismo, se observan algunos opacos diseminados en agregados o en cristales individuales.

La zona de sulfuros masivos está conformada principalmente por esfalerita con textura masiva y agregados de pirita, y menores cantidades de arsenopirita, calcopirita y pirrotina; la primera en agregados y vetillas, y las otras como inclusiones y exsoluciones en esfalerita y pirita. Por sus características, la pirita (euhedral, fracturada) parece ser el evento más antiguo y el de primer cese, porque la esfalerita y sus minerales asociados pueden hallarse cortándola. Por su parte, la arsenopirita parece ser tardía.



Izq. Roca con matriz recristalizada incipientemente a microesparita (Micro), rodeando posibles organismos y peloides. Cortando, se aprecian vetillas continuas de calcita (Cal). Der. Agregados de minerales opacos (Op) diseminados en la roca, superpuestos a las vetillas y a la microesparita. Véanse también masas de opacos de grano muy fino, que embeben algunos granos de turmalina (Tur).



Izq. Agregados de pirita (Py) con textura botrioidal, en asociación con arsenopirita (Apy) dentro de masas de esfalerita (Sp) enferma con inclusiones de pirrotina (Po). Der. Agregados de cristales euhedrales de pirita (Py), con rellenos intercristalinos de esfalerita (Sp).

SM-M-M2

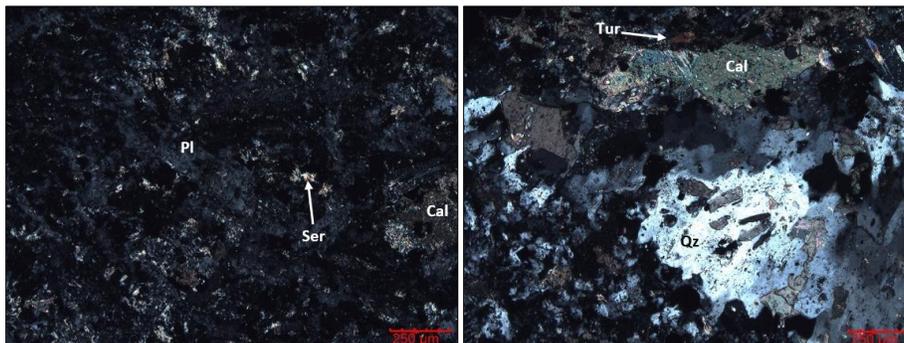
Descripción macroscópica

Aplita silicificada de color verde y textura sacaroide, con pirita y calcopirita diseminadas y en clústeres. Aparecen vetillas irregulares de calcita ligeramente brechadas.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Plagioclasa			Subhedral
Sericita-moscovita	Parches, halos reemplazamiento		Subhedral a anhedral
Carbonato	Parches, halos, reemplazamiento		Anhedral
Cuarzo	Diseminada		Anhedral
Epidota	Diseminada		Anhedral
Pirita	Diseminada		Subhedral
Turmalina	Diseminada		Euhedral
Calcita	Vetillas, parches		Anhedral
Óxidos de hierro	Parches, reemplazamiento		Anhedral

Roca de textura finogranular, conformada por plagioclasa y cuarzo 1 en cristales subhedrales y anhedrales, respectivamente, de aparente composición tonalítica, difícil de establecer con certeza por su grado de alteración. Tal alteración está conformada por sericita-carbonato-epidota-cuarzo 2, presenta intensidad moderada y distribución principal a manera de parches, halos rodeando vetillas de calcita-cuarzo 3 y selectiva sobre cristales de plagioclasa y pseudomorfos de minerales tabulares preexistentes (¿plagioclasa también?). Asociada con esta alteración, se observa pirita diseminada en cristales subhedrales. Cortando, aparecen vetillas de cuarzo, calcita y turmalina de dos generaciones: la más antigua desarrollando una estructura rectilínea y continua, con mayor espesor, predominancia de cuarzo sobre calcita y mejor desarrollo cristalino; y la otra, de mucho menor espesor y mayor abundancia de calcita con respecto al cuarzo.



Izq. Textura holocrystalina de la roca, conformada por cristales subhedrales de plagioclasa (Pl) ligeramente sericitizada (Ser). Nótese además los parches de calcita (Cal). Der. Vena de cuarzo (Qz), calcita (Cal) y turmalina (Tur) con variación textural entre masiva y mosaico.

AS-M-5

Descripción macroscópica

Roca con avanzada silicificación, de color gris claro a blanco, con escasa pirita diseminada y en vetillas, las cuales pueden tener halos grisáceos. Posee fenocristales de plagioclasa y cuarzo, que denotan una textura porfirítica.

SM-M-M3**Descripción macroscópica**

Roca muy silicificada con escasa arsenopirita diseminada y vetillas de fluorita. Puede poseer algo de malaquita en parches, óxidos de Fe y calcita en parches y vetillas.

SM-M-1**Descripción macroscópica**

Roca indiferenciada con alteración pervasiva de clorita-illita-calcita, con pirita y arsenopirita en clústeres y diseminada.

13-SM-M13**Descripción macroscópica**

Esfalerita masiva con algo de calcopirita y encajonante silicificado y cloritizado. Puede tener rellenos de calcita.

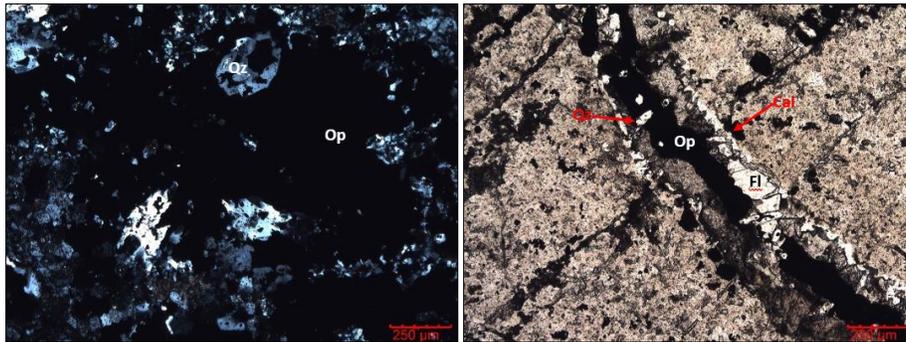
Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Plagioclasa	Pseudomórfica		Anhedral
Cuarzo			Anhedral
Líticos			Redondeada
Circón	Diseminada		Anhedral
Apatito	Diseminada		Euhedral
Carbonato	Vetillas		Anhedral
Adularia	Pervasiva		
Epidota			
Sílice-cuarzo	Pervasiva, recristalización		-
Clorita	Vetillas, rellenos, diseminada		Anhedral
Esfalerita	Diseminada, agregados, masiva, vetillas	Enferma	Anhedral
Sericita	Reemplazamiento		Anhedral
Fluorita	Vetillas		Anhedral
Pirita arseniosa	Masiva y diseminada, vetillas, reemplazamiento		Anhedral
Arsenopirita	Inclusiones en Sp, diseminada		Euhedral a anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Sp, reemplazamiento de Apy		Anhedral
Calcopirita	Exsoluciones en Sp		Anhedral
Marcasita	Agregados, reemplazamiento de Py		Anhedral

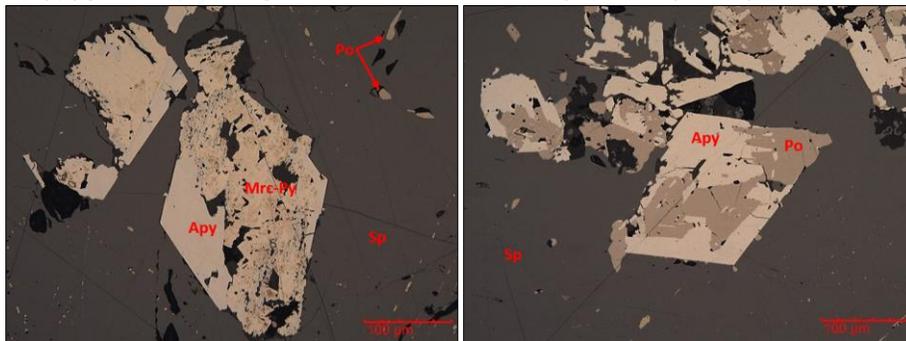
Roca de textura holocristalina, finogranular y equigranular, conformada enteramente por pseudomorfos de plagioclasa y cuarzo en cristales finos, indicando una composición tonalítica (?). La roca se divide en dos sectores: el primero, donde la textura granular es clara, muestra alteración pervasiva de adularia-cuarzo, incipiente de clorita y moderada en vetillas de carbonato-clorita-

cuarzo-fluorita-epidota, que se asocian con una mineralización de esfalerita y opacos. Por su parte, el otro sector parece corresponder a una vena y exhibe características muy contrastantes, siendo dominado por la presencia de adularia-sílice microcristalina parcialmente recrystalizada a cuarzo, y una mineralización mucho más abundante y masiva de esfalerita roja asociada con cuarzo, y con rellenos de carbonato-clorita (alteración propilítica).

Sulfuro masivo conformado mayoritariamente por esfalerita, con menores cantidades de pirita, arsenopirita, pirrotina y calcopirita. La esfalerita se presenta como masas cristalinas de gran tamaño, que embeben a los otros sulfuros. Se aprecian reemplazamientos parciales y pseudomórficos de arsenopirita por pirrotina, y vetillas tardías de carbonato con pirita de textura oquerosa. Adicionalmente, la esfalerita muestra un gran número de inclusiones de cuarzo.



Izq. Mineralización masiva (Op) relacionada con cuarzo (Qz). Der. Vetillas de cuarzo (Qz), calcita (Cal), opacos (Op) y fluorita (Fl) encajada en roca con alteración pervasiva y de aspecto terroso.



Izq. Cristales masivos de esfalerita (Sp) con inclusiones de pirrotina (Po) y arsenopirita (Apy), esta última reemplazada por pirita-marcasita (Py-Mrc). Der. Reemplazamiento pseudomórfico parcial de arsenopirita (Apy) por pirrotina (Po).

13-SM-M14 A

Descripción macroscópica

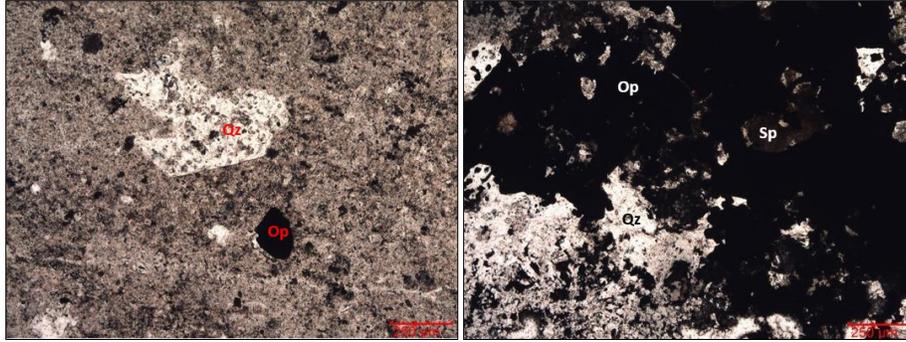
Roca volcánica (?) fuertemente silicificada, de color gris blanquecino, con bandeamiento muy marcado por horizontes de distintas tonalidades de gris. Estas rocas tienen mineralización de calcopirita-esfalerita-arsenopirita en agregados circulares. Algunos fragmentos corresponden a fragmentos de calcopirita-esfalerita-fluorita masivas.

Descripción microscópica

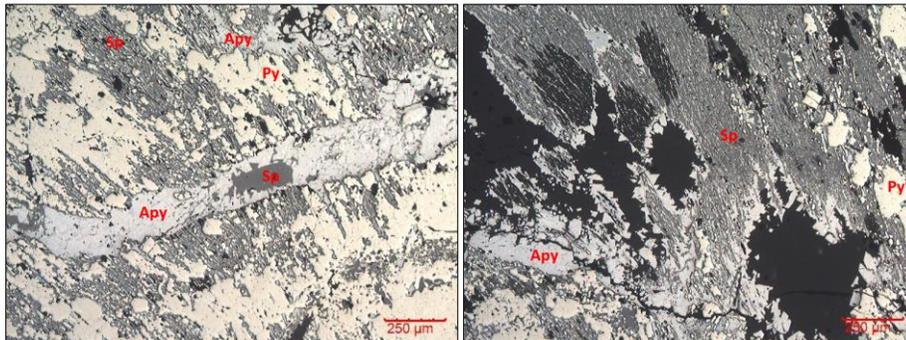
MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Plagioclasa	Microfenocristales		Subhedral a euhedral
Cuarzo beta	Fenocristales relícticos		Euhedral a anhedral
Cuarzo	Rellenos, agregados, vetillas, pervasiva		Anhedral a subhedral
Sílice	Matriz de bandas		-
Calcita	Parches		Anhedral
Sericita	Agregados, rellenos		Anhedral
Feldespato	Pervasiva, rellenos		Anhedral
Líticos			Redondeada
Óxidos de Fe	Vetillas		-
Pirita	Masiva		Anhedral a subhedral
Esfalerita	Masiva	Enferma	Anhedral
Arsenopirita	Agregados, vetillas		Subhedral a euhedral
Calcopirita	Intersticial, exsoluciones en Sp		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Py		Anhedral
Galena	Inclusiones en Sp		Anhedral
Marcasita	Agregados, reemplazam.	Ojo de pájaro	Anhedral
Tetraedrita-tenantita	Inclusiones en Sp y Py		Anhedral

Roca con bandeamiento muy marcado, conformada por pseudomorfos de cuarzo beta reemplazados en cuarzo policristalino y microfenocristales de plagioclasa, que definen una posible composición dacítica. Sobreimpuesto, se aprecia un fuerte proceso de alteración hidrotermal desarrollado a modo de bandas de dos tipos principales: las primeras son principalmente cuarzosas, y están conformadas por cristales de aspecto terroso y bordes difusos, con escasos microfenocristales tabulares de plagioclasa. Las otras, por su parte, presentan microfenocristales tabulares de plagioclasa embebidos en una matriz criptocristalina (¿sílice-adularia?). Entre las bandas, se embeben escasos fragmentos de rocas holocristalinas conformadas por plagioclasa (¿tonalitas?) y otros de cuarzo microcristalino. Asimismo, aparecen rellenos de cuarzo semi-masivo con sulfuros y de sericita con opacos. Por último, aparecen vetillas de óxidos cortando a toda la roca.

Los desarrollos de sulfuros masivos están conformados principalmente por pirita, esfalerita y arsenopirita, con menores cantidades de marcasita, calcopirita, pirrotina y galena. La pirita y la esfalerita son los principales minerales, y parecen ser también los más tempranos, porque son cortados por generaciones posteriores de arsenopirita. La marcasita, por su parte, conforma agregados de cristales anhedrales y aparentemente se trata de un reemplazamiento pseudomórfico de otro sulfuro (¿pirrotina?). La calcopirita, galena y tetraedrita-tenantita se localizan en oquedades de la pirita. Son muy comunes los intercrecimientos entre esfalerita, galena y arsenopirita.



Izq. Fenocristales de cuarzo beta (Qz) reemplazados en cuarzo alfa y rodeados por feldspatos de aspecto terroso. Der. Cuarzo (Qz) semi-masivo asociados con la mineralización de opacos (Op) y esfalerita (Sp).



Izq. Vetillo de arsenopirita con esfalerita, que atraviesa los intercrecimientos de esfalerita, pirita y arsenopirita. Der. Intercrecimientos de arsenopirita y esfalerita, con inclusiones irregulares de pirita.

13-SM-M14 B

Descripción macroscópica

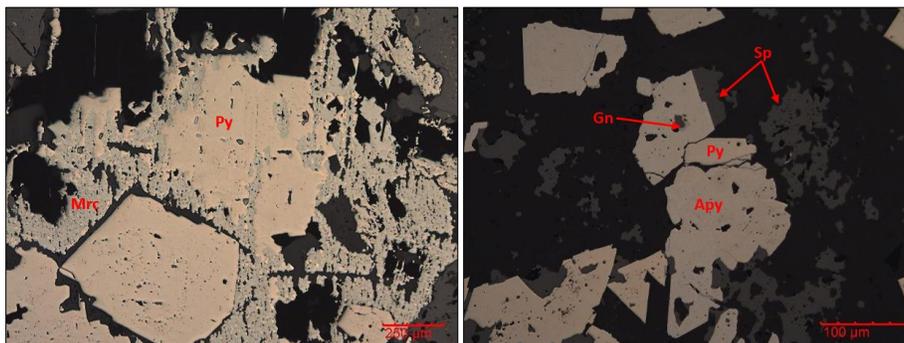
Agregado masivo de esfalerita, calcopirita, pirrotina, arsenopirita y cuarzo lechoso a hialino. Parece estar en una roca volcánica de grano muy fino.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Pirita	Masiva, vetillas en Sp		Subhedral a anhedral
Esfalerita	Masiva, rellenos en Py	Enferma	Anhedral
Arsenopirita	Diseminada		Euhedral a anhedral
Calcopirita	Diseminada, exsoluciones en Sp, inclusiones en Sp	Vetillas con Py en Sp	Anhedral
Marcasita	Reemplazamiento en agregados		Subhedral a anhedral
Galena	Diseminada		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Sp y Py		Anhedral

Sulfuro masivo conformado por pirita y esfalerita mayoritariamente, con arsenopirita, calcopirita y galena diseminadas, y pequeñas inclusiones de pirrotina. Adicional, se aprecia una gran cantidad de marcasita en agregados que rellenan intersticios de la pirita y la reemplazan parcialmente, dejando relictos inalterados nadando entre estas masas. Del mismo modo, se aprecian vetillas y rellenos de

fracturas de esfalerita en pirita y viceversa, por lo que se interpreta contemporaneidad, soportado también por la presencia de inclusiones de una en otra.



Izq. Reemplazamiento parcial y selectivo de pirita (Py) por marcasita (Mrc). Der. Arsenopirita (Apy) en asociación con esfalerita (Sp) y pirita (Py), y con inclusión de galena (Gn).

15-SM-M12

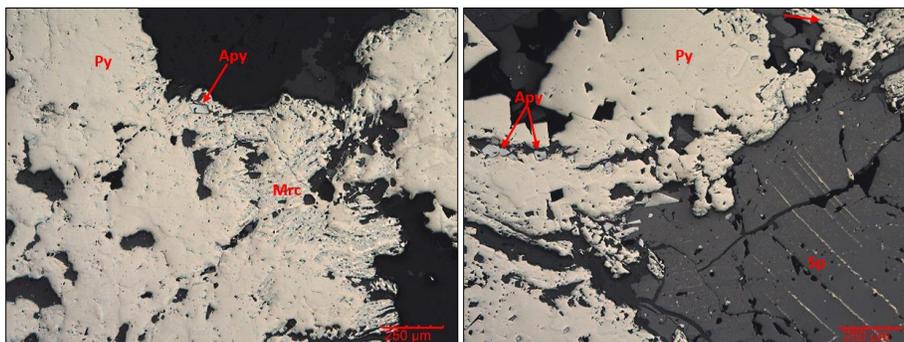
Descripción macroscópica

Sulfuros masivos compuesto por pirita y esfalerita asociadas con fluorita y cuarzo.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Esfalerita	Masiva	Enferma	Anhedral
Pirita	Masiva		Anhedral a subhedral
Calcopirita	Diseminada, exsoluciones en Ccp		Anhedral
Pirrotina	Inclusiones en Py		Anhedral
Arsenopirita	Agregados, diseminada		Subhedral
Marcasita	Reemplazamiento, agregados		Anhedral

Sulfuro masivo conformado principalmente por pirita y esfalerita, con menores proporciones de arsenopirita y calcopirita diseminadas, y pirrotina en inclusiones dentro de pirita. Sobreimpuesto a algunos cristales de pirita, se aprecian agregados alargados de marcasita. Cortando lo anteriormente mencionado, aparecen vetillas continuas de carbonato, y en rellenos se observa carbonato y cuarzo con esfalerita, calcopirita, pirita y arsenopirita.



Izq. Agregados masivos de pirita (Py) reemplazada por marcasita (Mrc), con arsenopirita (Apy) en inclusiones. Der. Esfalerita (Sp) enferma asociada con pirita (Py) y arsenopirita (Apy).

16-SM-199

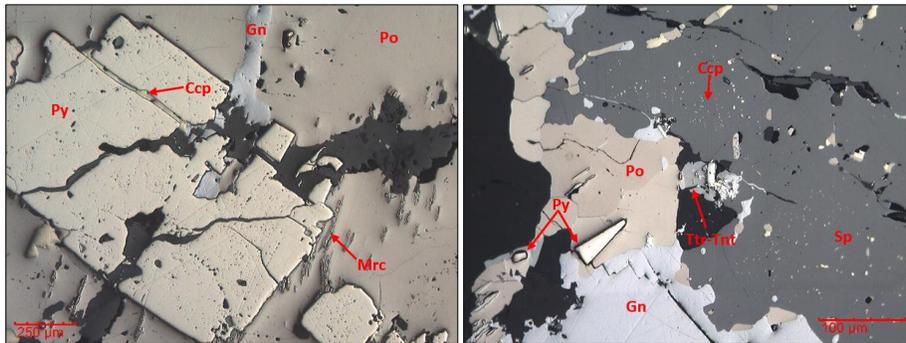
Descripción macroscópica

Pirrotina, galena, calcopirita, arsenopirita y cuarzo con textura masiva.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Pirrotina	Masiva		Anhedral
Galena	Masiva		Subhedral a anhedral
Esfalerita	Masiva	Enferma	Anhedral
Pirita	Oquerosa		Euhedral
Calcopirita			Anhedral
Tetraedrita-tenantita	Diseminada		Anhedral
Marcasita	Reemplazamiento		Anhedral
Arsenopirita	Inclusiones en Sp		Euhedral a anhedral
Carbonato	Intersticial		Anhedral

Cuerpo de sulfuros masivos, conformado principalmente por pirrotina, galena y esfalerita, con menores cantidades de pirita, calcopirita, tetraedrita-tenantita y marcasita. La esfalerita muestra gran cantidad de inclusiones de pirrotina, calcopirita y galena; y la pirrotina, por su parte, inclusiones más espaciadas de pirita, calcopirita, galena y esfalerita. Por otro lado, la marcasita se desarrolla en lamelas de reemplazamiento dentro de la pirrotina.



Izq. Pirita (Py), arsenopirita (Apy), calcopirita (Ccp) y pirrotina (Po). Véase además reemplazamiento incipiente de la pirrotina por marcasita (Mrc) y rellenos de calcopirita en la pirita. Der. Esfalerita (Sp) asociada con pirrotina (Po), tetraedrita-tenantita (Ttr-Tnt) y galena (Gn), con inclusiones de estas mismas fases y exsoluciones de calcopirita (Ccp).

16-SM-M10

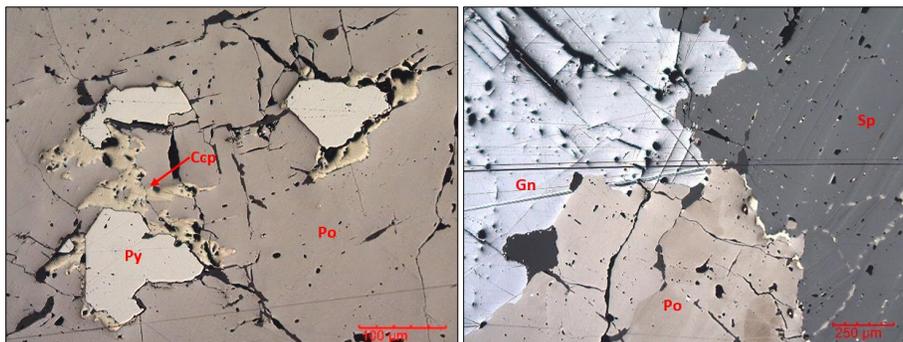
Descripción macroscópica

Sulfuro masivo conformado primordialmente por cristales de gran tamaño de pirrotina, galena, calcopirita, arsenopirita y fluorita. Asimismo, fueron encontradas inclusiones muy finas de cuarzo dentro de la esfalerita.

Descripción microscópica

MINERAL	TEXTURA GENERAL	TEXTURA ESPECÍFICA	FORMA
Esfalerita	Masiva, zonación	Enferma	Anhedral
Pirrotina	Masiva, exsoluciones en Sp		Anhedral
Galena	Masiva		Anhedral
Pirita	Inclusiones en Po		Subhedral a anhedral
Calcopirita	Diseminada, exsoluciones	Coronas en Py	Anhedral
Marcasita	Reemplazamiento de Po		Anhedral

Sulfuro masivo compuesto principalmente por esfalerita, pirrotina y galena de textura masiva, con inclusiones de pirita, calcopirita y exsoluciones de pirrotina en la esfalerita. Del mismo modo, se pueden observar inclusiones de galena en pirrotina y de calcopirita-pirrotina en esfalerita. La esfalerita presenta una zonación discreta, observable por inclusiones alargadas de pirrotina y por los cambios en la reflectancia. Por último, se aprecia un reemplazamiento muy incipiente de pirrotina por marcasita.



Izq. Pirita (Py) incluida en pirrotina (Po), y rodeada por la calcopirita (Ccp). Der. Asociación principal de la roca, constituida por pirrotina (Po), galena (Gn) y esfalerita (Sp).

12.2 Isótopos estables

Isótopos de carbono y oxígeno

Muestra	Procedencia	O _{VSMOW} (‰)	C _{VPDB} (‰)
42-1A	Vena en sulfuro masivo	17,39	-0,99
42-1B	Vena en sulfuro masivo	18,2	-2,57
42-2	Vena en roca ígnea silicificada	16,03	-2,15
42-3A	Mármol de grano fino	17,58	-0,49
42-3B	Relleno de calcita lechosa en roca ígnea	16	-1,29
42-4A	Matriz de brecha con clastos de mármol	17,33	-2,33
42-4B	Relleno de calcita grisácea en brecha	19,03	-0,85
42-5A	Relleno de calcita lechosa en sulfuro masivo	16,9	-2,1
42-5B	Vetilla de calcita en sulfuro masivo	18,13	-1,85
42-6	Vetilla de calcita lechosa en sulfuro masivo	21,05	-1,99
42-7A	Vena de calcita lechosa en brecha	19,91	-3,38
42-7B	Relleno de calcita en brecha	22,71	-3,07
42-8A	Matriz de brecha	13,87	-1,48

Muestra	Procedencia	O _{vsmow} (‰)	C _{vPDB} (‰)
42-8B	Mármol de grano fino	21,26	-3,61
42-9	Vena de calcita dentro de roca ígnea silicificada	16,05	-0,2
42-10	Vena de calcita dentro de roca ígnea silicificada	21,25	-3,49
43-1A	Relleno de calcita gris en sulfuro semi-masivo	18,34	-1,06
43-1B	Vena de calcita lechosa en sulfuro semi-masivo	18,34	-1,06
43-1C	Relleno de calcita lechosa en sulfuro semi-masivo	17,82	-0,2
43-1D	Vetillas tardías de calcita lechosa en sulfuro semi-masivo	18,13	-1,16
43-2	Vena de calcita lechosa en roca ígnea silicificada	18,44	-2,64
43-4	Relleno de calcita con esfalerita en roca ígnea silicificada	23,28	-4,56
43-5A	Relleno de calcita beige en mármol de grano medio	15,81	-2,14
43-5B	Mármol de grano fino a medio	16,72	-2,96
43-6A	Relleno de calcita lechosa en zona brecha dentro de mármol	16,73	-6,13
43-6B	Mármol de grano fino a medio	17,12	-7,82
43-6C	Mármol de grano fino	17,2	-7,99
43-7	Vena de calcita beige en sulfuro masivo	14,61	-1,01
43-9	Vena de calcita lechosa en sulfuro masivo	15,02	-0,61
43-15A	Mármol de grano medio a fino	14,63	-1,78
43-15B	Relleno de calcita lechosa en mármol	15,07	-0,93
43-15C	Mármol de grano fino	14,56	-1,33
43-15D	Mármol de grano medio	14,6	-1,13
43-16	Vena de calcita lechosa en mármol	18,6	-4,96
43-17A	Vena de calcita con sulfuros y sulfosales en mármol	17,6	-4,21
43-17B	Mármol de grano fino	15,82	-1,46
43-18	Rellenos de calcita lechosa en contacto mármol-exoskarn	14,81	-6,87
43-19	Vena de calcita en exoskarn	14,82	-3,25
43-20A	Vena de calcita en exoskarn	15,54	-5,17
43-20B	Exoskarn	17,37	-6,68
43-21A	Vena de calcita lechosa con sulfuros masivos	17	-0,37
43-21B	Mármol de grano fino	16,57	-2,59
58-2	Vena brechada de calcita blanca dentro de roca ígnea con alteración potásica	17,23	-6,48
71-1A	Matriz de brecha de calcita lechosa con clastos de caliza	20,47	-0,34
71-1B	Clasto de caliza en brecha hidráulica	19,46	0,65
71-3	Exoskarn	18,08	-4,88
71-5	Vetilla de calcita en aplita silicificada	17,07	-0,06
71-7A	Biomicrota de peloides	18,47	-3,21
71-7B	Vena de calcita lechosa en biomicrita	18,92	-3,43
71-7C	Vena de calcita lechosa en biomicrita, asociada con sulfuros masivos	17,22	-4,93

Isótopos de azufre

Muestra	Litología	Mineral	³⁴ S _{VCDT} (‰)
42-11-1	Sulfuro masivo en roca ígnea	Py	-0,8
42-12-1	Sulfuro masivo en roca ígnea	Py	-0,1
43-1-1	Brecha y sulfuro masivo	Py	-1,4
43-4-1	Sulfuro masivo en roca ígnea	Py	-2,6
43-4-2	Sulfuro masivo en roca ígnea	Apy	-1,0
43-4-3	Sulfuro masivo en roca ígnea	Sp	0,1
43-4-4	Sulfuro masivo en roca ígnea	Po	-0,3
43-6-1	Sulfuro masivo en mármol	Py	-1,3
43-6-2	Sulfuro masivo en mármol	Sp	-0,5
43-7-1	Sulfuro masivo en roca ígnea	Py	-0,7
43-7-2	Sulfuro masivo en roca ígnea	Sp	-1,7
43-8-1	Sulfuro masivo en roca ígnea	Py	0,0
43-8-2	Sulfuro masivo en roca ígnea	Sp	1,2
43-12-1	Sulfuro masivo en roca ígnea	Apy	-0,3
43-12-2	Sulfuro masivo en roca ígnea	Sp	0,2
43-13-1	Sulfuro masivo	Sp	0,5
43-14-1	Sulfuro masivo en exoskarn	Py	0,5
43-14-2	Sulfuro masivo en exoskarn	Mc	-0,4
43-17-1	Vena mineralizada	Py	-0,3
43-21-1	Relleno de sulfuros en exoskarn	Apy	-0,9
43-21-2	Relleno de sulfuros en exoskarn	Apy	-2,6
58-1-1	Sulfuro masivo en mármol	Py	0,2
58-7-1	Sulfuro masivo	Py	-1,1
58-7-2	Sulfuro masivo	Sp	-3,2
58-7-3	Sulfuro masivo	Sp	-2,6
58-8-1	Sulfuro masivo	Py	-1,0
71-7	Relleno de sulfuros en caliza	Py	-2,8
100-1-1	Sulfuro masivo	Py	-2,2
100-2-1	Sulfuro masivo	Po	-0,7
100-2-2	Sulfuro masivo	Gn	-1,4
100-3-1	Sulfuro masivo	Po	-0,2
100-3-2	Sulfuro masivo	Sp	-1,4

12.3 Química mineral

Microquímica en arsenopirita

Muestra	Asociación	S	S at.	Fe	Fe at.	As	As at.	Bi	Ni	Sb	Co	Total
Std-AsPy-1		19,25	32,44	34,76	33,63	47,07	33,94	0,05	0,01	0,00	0,05	101,19
Std-AsPy-2		19,02	32,27	34,07	33,19	47,57	34,54	0,00	0,00	0,01	0,03	100,71
Std-AsPy-3		18,97	32,14	34,33	33,40	47,52	34,46	0,00	0,02	0,02	0,05	100,90
Std-AsPy-4		19,06	32,31	34,30	33,38	47,29	34,31	0,01	0,02	0,03	0,03	100,75
42-6-1-1	Apy-Po-Py	20,19	33,78	34,77	33,41	45,80	32,81	0,00	0,00	0,03	0,05	100,84
42-6-1-2	Apy-Po-Py	20,35	34,30	34,31	33,21	45,02	32,49	0,08	0,04	0,04	0,02	99,86
42-6-2-1	Apy-Po-Py	20,52	34,06	35,15	33,50	45,68	32,44	0,00	0,00	0,03	0,03	101,41
42-6-2-2	Apy-Po-Py	20,73	34,83	34,80	33,56	43,96	31,61	0,00	0,02	0,02	0,05	99,58
42-6-3-1	Apy-Po-Py	20,87	34,91	34,91	33,53	44,08	31,56	0,00	0,00	0,02	0,03	99,91
42-6-4-1	Apy-Po-Py	20,28	34,03	34,94	33,66	44,98	32,31	0,00	0,02	0,01	0,03	100,26

Muestra	Asociación	S	S at.	Fe	Fe at.	As	As at.	Bi	Ni	Sb	Co	Total
42-6-4-2	Apy-Po-Py	21,24	35,69	34,92	33,70	42,54	30,60	0,00	0,02	0,03	0,04	98,79
42-6-7-1	Apy-Po-Py	46,70	63,01	44,70	34,63	4,10	2,37	0,00	0,01	0,00	0,04	95,54
42-6-9-1	Apy-Po-Py	19,77	33,33	34,64	33,54	45,89	33,12	0,00	0,00	0,03	0,06	100,40
42-6-11-1	Apy-Po-Py	21,44	35,45	35,30	33,52	43,85	31,03	0,00	0,00	0,03	0,06	100,68
M13-1-1	Apy-Po-Py	16,51	44,59	35,73	55,41	0,00	0,00	0,00	0,38	0,00	0,05	52,68
M13-1-2	Apy-Po-Py	16,51	44,52	35,83	55,48	0,00	0,00	0,00	0,30	0,02	0,03	52,70
M13-2-1	Apy-Po-Py	19,76	33,67	34,25	33,52	44,99	32,81	0,00	0,03	0,00	0,03	99,07
M13-2-2	Apy-Po-Py	20,06	34,10	34,08	33,26	44,87	32,64	0,00	0,14	0,01	0,02	99,17
M13-4-2	Apy-Po-Py	19,87	33,93	34,08	33,41	44,68	32,65	0,00	0,02	0,02	0,04	98,71
M13-4-1	Apy-Po-Py	19,70	33,89	33,83	33,41	44,41	32,70	0,00	0,03	0,02	0,04	98,04
M13-5-1	Apy-Po-Py	20,81	35,02	34,39	33,23	44,07	31,75	0,00	0,01	0,00	0,06	99,33
M13-6-1	Apy-Po-Py	19,70	33,54	34,03	33,27	45,54	33,19	0,00	0,00	0,00	0,02	99,29
M13-7-1	Apy-Po-Py	19,79	33,83	34,05	33,42	44,77	32,75	0,00	0,00	0,01	0,02	98,65
M14B-1-1	Apy-Po-Py	20,28	34,10	34,78	33,58	44,92	32,32	0,00	0,01	0,00	0,02	100,01
M14B-2-1	Apy-Po-Py	19,99	33,94	34,47	33,60	44,65	32,45	0,09	0,01	0,05	0,03	99,28
M14B-2-2	Apy-Po-Py	19,67	33,49	34,45	33,68	45,06	32,83	0,00	0,01	0,00	0,03	99,21
M14B-3-1	Apy-Po-Py	19,99	33,60	34,72	33,52	45,69	32,88	0,00	0,00	0,00	0,04	100,43
M14B-3-2	Apy-Po-Py	19,97	33,77	34,51	33,51	45,21	32,72	0,00	0,00	0,01	0,05	99,76
M14B-4-1	Apy-Po-Py	19,85	33,69	34,77	33,88	44,66	32,43	0,05	0,03	0,04	0,02	99,41
M14B-5-1	Apy-Po-Py	20,03	33,70	34,37	33,20	45,99	33,11	0,00	0,03	0,01	0,02	100,46
M14B-5-2	Apy-Po-Py	19,91	33,79	34,24	33,35	45,26	32,86	0,00	0,00	0,00	0,05	99,46
M14B-6-1	Apy-Po-Py	19,87	33,56	34,54	33,49	45,58	32,94	0,05	0,02	0,00	0,05	100,11
M14B-6-2	Apy-Po-Py	19,62	33,23	34,46	33,51	45,90	33,26	0,00	0,00	0,00	0,03	100,02
Std-AsPy-11		19,23	32,73	34,05	33,27	46,68	34,00	0,00	0,00	0,00	0,04	100,00
Std-AsPy-12		19,06	32,49	34,03	33,31	46,87	34,20	0,00	0,01	0,02	0,01	100,00
Std-AsPy-13		18,98	32,26	34,38	33,56	46,97	34,18	0,00	0,00	0,00	0,02	100,35
Std-AsPy-1		19,03	32,68	33,47	33,01	46,68	34,31	0,00	0,01	0,00	0,03	99,22
Std-AsPy-2		19,24	33,02	33,27	32,78	46,58	34,21	0,04	0,02	0,01	0,02	99,18
Std-AsPy-3		19,30	33,18	33,13	32,70	46,39	34,13	0,05	0,00	0,03	0,01	98,92
43-17-1-2	Py-Apy	21,33	35,77	34,42	33,13	43,34	31,10	0,00	0,00	0,16	0,03	99,28
43-17-3-2	Py-Apy	16,60	40,07	23,75	32,92	26,13	27,01	0,00	0,00	0,03	0,03	66,53
43-17-4-2	Py-Apy	21,56	36,25	34,43	33,24	42,38	30,50	0,00	0,00	0,17	0,05	98,58
43-17-6-3	Py-Apy	21,16	35,46	34,41	33,11	43,82	31,43	0,00	0,00	0,08	0,05	99,52
43-17-2-1	Py-Apy	21,34	35,79	33,80	32,56	44,08	31,65	0,00	0,00	0,20	0,02	99,44
43-17-2-2	Py-Apy	21,78	36,31	34,12	32,66	43,48	31,02	0,00	0,00	0,17	0,02	99,57
43-17-3-1	Py-Apy	21,30	35,94	33,91	32,86	43,18	31,20	0,10	0,00	1,04	0,04	99,57
43-17-4-1	Py-Apy	21,58	36,24	33,89	32,68	43,24	31,08	0,00	0,00	0,18	0,03	98,93
43-17-5-1	Py-Apy	24,96	73,55	7,28	12,31	11,21	14,14	0,15	0,00	6,67	0,00	50,25
43-17-6-1	Py-Apy	21,78	36,20	34,28	32,72	43,70	31,08	0,00	0,01	0,04	0,03	99,84
43-17-6-2	Py-Apy	2,87	20,85	10,39	43,28	11,55	35,86	0,00	0,00	0,04	0,01	24,86
43-17-7-1	Py-Apy	21,56	36,05	34,44	33,06	43,16	30,88	0,00	0,03	0,00	0,04	99,23
43-17-8-1	Py-Apy	21,10	35,32	34,80	33,44	43,62	31,24	0,04	0,03	0,49	0,04	100,12

Muestra	Asociación	S	S at.	Fe	Fe at.	As	As at.	Bi	Ni	Sb	Co	Total
43-17-9-1	Py-Apy	21,33	35,53	34,53	33,03	44,12	31,45	0,18	0,01	0,21	0,06	100,43
43-17-10-1	Py-Apy	21,10	36,70	33,44	33,39	40,18	29,91	0,03	0,00	0,19	0,02	94,96
43-21-2-1	Apy-Po-Py	21,04	35,25	35,02	33,69	43,32	31,06	0,00	0,00	0,03	0,05	99,47
43-21-3-1	Apy-Py vet	19,72	33,64	34,55	33,85	44,52	32,51	0,00	0,00	0,03	0,03	98,85
43-21-3-2	Apy-Py vet	21,03	35,38	34,78	33,59	43,09	31,03	0,00	0,00	0,00	0,00	98,90
43-21-3-3	Apy-Py vet	20,85	35,11	35,03	33,87	43,06	31,03	0,00	0,01	0,03	0,02	99,00
43-21-7-1	Apy-Po-Py	22,04	36,25	35,66	33,68	42,70	30,07	0,00	0,00	0,00	0,02	100,41
43-21-6-1	Apy-Po-Py	22,25	36,45	35,59	33,47	42,92	30,09	0,00	0,00	0,00	0,03	100,79
43-21-5-1	Apy-Po-Py	19,74	33,56	34,75	33,92	44,68	32,52	0,01	0,02	0,00	0,05	99,25
43-21-8-1	Apy-Po-Py	21,19	35,05	35,28	33,51	44,43	31,45	0,00	0,00	0,01	0,03	100,94
Line 1 4321-L1	Apy-Po-Py	37,41	52,20	39,10	31,32	27,60	16,48	0,00	0,01	0,01	0,05	104,18
Line 2 4321-L1	Apy-Po-Py	19,95	33,84	34,92	34,01	44,28	32,15	0,00	0,00	0,00	0,05	99,20
Line 3 4321-L1	Apy-Po-Py	18,90	32,43	34,39	33,89	45,84	33,67	0,00	0,00	0,03	0,05	99,21
Line 4 4321-L1	Apy-Po-Py	18,98	32,55	34,29	33,76	45,89	33,69	0,00	0,00	0,00	0,03	99,19
Line 5 4321-L1	Apy-Po-Py	18,77	32,36	34,34	33,98	45,65	33,67	0,00	0,01	0,02	0,03	98,82
Line 6 4321-L1	Apy-Po-Py	18,99	32,64	34,32	33,87	45,52	33,49	0,00	0,03	0,00	0,03	98,89
Line 7 4321-L1	Apy-Po-Py	18,87	32,46	34,27	33,85	45,76	33,69	0,00	0,02	0,00	0,02	98,95
Line 8 4321-L1	Apy-Po-Py	20,98	35,32	35,18	34,01	42,57	30,67	0,06	0,00	0,03	0,05	98,87
Line 9 4321-L1	Apy-Po-Py	20,22	34,30	34,91	34,00	43,65	31,69	0,01	0,01	0,02	0,00	98,81
Line 10 4321-L1	Apy-Po-Py	20,13	34,05	34,79	33,80	44,39	32,15	0,00	0,02	0,00	0,04	99,36
Std-AsPy-11		18,43	31,84	34,59	34,32	45,75	33,84	0,00	0,00	0,00	0,06	98,83
Std-AsPy-12		18,41	31,87	34,43	34,22	45,77	33,91	0,00	0,00	0,02	0,02	98,64
Std-AsPy-13		18,47	31,92	34,52	34,25	45,76	33,83	0,00	0,00	0,04	0,05	98,84
Std-AsPy-111		19,18	32,58	33,96	33,12	47,17	34,29	0,00	0,00	0,00	0,04	100,34
Std-AsPy-112		19,00	32,28	34,03	33,21	47,44	34,51	0,00	0,01	0,02	0,05	100,55
Std-AsPy-113		18,94	32,31	34,02	33,31	47,10	34,38	0,00	0,00	0,03	0,01	100,11
43-6-3-1	Apy-Po-Py	20,70	34,69	34,47	33,17	44,80	32,14	0,07	0,03	0,06	0,06	100,18
43-6-2-1	Apy-Po-Py	20,52	34,56	34,51	33,38	44,48	32,07	0,00	0,00	0,07	0,05	99,62
43-6-4-1	Apy-Po-Py	19,39	32,92	34,34	33,46	46,29	33,62	0,00	0,03	0,05	0,02	100,13
43-6-6-1	Apy-Po-Py	19,34	32,93	34,48	33,71	45,80	33,37	0,00	0,01	0,08	0,01	99,71
43-6-7-1	Apy-Po-Py	19,29	32,94	34,00	33,34	46,14	33,72	0,00	0,02	0,00	0,02	99,48
43-6-8-1	Apy-Po-Py	20,79	34,71	34,73	33,30	44,76	31,99	0,00	0,03	0,01	0,04	100,36
43-6-8-2	Apy-Po-Py	19,77	33,51	33,96	33,06	46,07	33,43	0,00	0,04	0,00	0,04	99,89
43-12-1-1	Apy-Po-Py	16,78	44,84	35,95	55,16	0,00	0,00	0,00	0,34	0,00	0,04	53,12
43-12-2-1	Apy-Po-Py	20,53	34,79	34,17	33,25	44,06	31,96	0,00	0,00	0,00	0,03	98,79
43-12-3-1	Apy-Po-Py	17,25	30,12	33,14	33,23	49,04	36,65	0,00	0,04	0,00	0,02	99,47
43-12-4-1	Apy-Po-Py	20,46	34,73	34,20	33,34	43,94	31,93	0,03	0,00	0,02	0,04	98,68
43-12-4-2	Apy-Po-Py	20,02	34,10	34,14	33,38	44,63	32,52	0,00	0,01	0,00	0,04	98,83
43-12-5-1	Apy-Po-Py	20,60	34,87	34,45	33,48	43,68	31,64	0,00	0,00	0,00	0,04	98,76
43-12-6-1	Apy-Po-Py	19,37	32,97	33,91	33,15	46,50	33,88	0,00	0,01	0,01	0,03	99,82
43-13B-5-1	Apy-Po-Py	19,36	32,73	34,43	33,42	46,78	33,84	0,00	0,03	0,04	0,06	100,71
43-13B-5-2	Apy-Po-Py	19,73	33,52	33,78	32,95	46,12	33,53	0,00	0,00	0,11	0,07	99,81

Muestra	Asociación	S	S at.	Fe	Fe at.	As	As at.	Bi	Ni	Sb	Co	Total
43-13B-5-3	Apy-Po-Py	20,02	33,77	34,08	33,00	46,02	33,22	0,00	0,03	0,06	0,07	100,29
43-13B-4-1	Apy-Po-Py	19,72	33,22	34,13	33,00	46,85	33,78	0,00	0,02	0,03	0,05	100,80
43-13B-4-2	Apy-Po-Py	20,39	34,25	34,80	33,57	44,77	32,19	0,00	0,00	0,04	0,04	100,04
43-13B-6-1	Apy-Po-Py	19,24	32,73	34,92	34,11	45,55	33,16	0,00	0,00	0,00	0,05	99,75
16-SM-199-2-1	Apy-Po	20,79	35,54	33,70	33,08	42,88	31,38	0,00	0,00	0,05	0,06	97,46
16-SM-199-2-2	Apy-Po	19,92	37,49	29,18	31,53	38,47	30,98	0,00	0,00	0,03	0,06	87,66
16-SM-199-3-1	Apy-Po	19,26	33,34	32,72	32,52	46,08	34,14	0,00	0,01	0,10	0,07	98,22
16-SM-199-5-1	Apy-Po	20,01	34,25	33,80	33,22	44,40	32,53	0,00	0,05	0,12	0,02	98,40
16-SM-199-5-2	Apy-Po	19,51	33,70	33,35	33,08	44,94	33,22	0,00	0,00	0,05	0,02	97,87
16-SM-199-2-3	Apy-Po	36,07	52,87	55,85	47,00	0,21	0,13	0,00	0,01	0,03	0,05	92,22
16-SM-199-5-3	Apy-Po	20,24	35,03	32,09	31,88	44,68	33,09	0,00	0,04	0,22	0,04	97,30
16-SM-199-311	Apy-Po	20,07	34,52	33,16	32,75	44,47	32,73	0,00	0,00	0,15	0,07	97,92
16-SM-199-2-11	Apy-Po	20,29	34,92	34,01	33,60	42,75	31,48	0,00	0,00	0,01	0,00	97,05
Std-AsPy-21		19,04	32,44	34,08	33,35	46,90	34,21	0,00	0,00	0,02	0,05	100,09
Std-AsPy-22		18,95	32,37	34,02	33,37	46,87	34,26	0,00	0,00	0,04	0,03	99,91
Std-AsPy-23		19,10	32,42	34,18	33,31	47,17	34,27	0,00	0,00	0,00	0,02	100,47
42-12-1-1	Apy-Py	19,44	32,98	34,07	33,19	46,60	33,83	0,04	0,16	0,03	0,06	100,41
Line 1 42-12-L1	Apy-Py	19,59	33,62	33,88	33,39	44,92	32,99	0,01	0,06	1,34	0,01	99,81
Line 2 42-12-L1	Apy-Py	19,91	34,18	33,86	33,38	44,14	32,44	0,00	0,13	1,44	0,01	99,49
Line 3 42-12-L1	Apy-Py	20,12	34,41	33,78	33,16	44,33	32,44	0,00	0,08	1,33	0,02	99,66
Line 4 42-12-L1	Apy-Py	20,94	35,72	34,06	33,36	42,35	30,92	0,00	0,14	2,13	0,06	99,67
Line 5 42-12-L1	Apy-Py	19,75	33,68	33,35	32,65	46,13	33,66	0,00	0,11	0,64	0,04	100,02
Line 6 42-12-L1	Apy-Py	17,97	31,10	32,86	32,66	48,92	36,24	0,00	0,14	0,34	0,02	100,25
Line 7 42-12-L1	Apy-Py	16,98	29,46	32,54	32,42	51,33	38,12	0,00	0,10	0,20	0,04	101,18
Line 8 42-12-L1	Apy-Py	19,67	33,19	33,62	32,57	47,42	34,24	0,00	0,11	0,09	0,04	100,96
Line 9 42-12-L1	Apy-Py	19,11	32,61	32,95	32,28	48,07	35,11	0,00	0,13	0,18	0,00	100,44
Line 10 42-12-L1	Apy-Py	38,89	61,81	35,29	32,21	8,79	5,98	0,00	0,06	0,07	0,03	83,14
42-12-2-2	Apy-Py	19,57	33,18	34,07	33,16	46,39	33,66	0,00	0,02	0,02	0,09	100,15
42-12-2-3	Apy-Py	19,75	33,49	34,10	33,20	45,90	33,31	0,00	0,02	0,00	0,04	99,81
42-12-2-1	Apy-Py	19,86	33,56	34,43	33,39	45,71	33,05	0,00	0,01	0,06	0,06	100,13
42-12-3-1	Apy-Py	20,22	33,99	34,80	33,59	45,06	32,42	0,00	0,00	0,06	0,03	100,18
42-12-3-2	Apy-Py	21,14	35,13	35,06	33,45	44,19	31,42	0,00	0,01	0,00	0,05	100,45
42-12-4-1	Apy-Py	19,11	32,43	33,99	33,13	47,41	34,44	0,00	0,01	0,01	0,04	100,58
42-12-5-1	Apy-Py	21,07	35,06	34,90	33,35	44,37	31,59	0,00	0,03	0,02	0,04	100,43
42-12-6-1	Apy-Py	20,00	33,55	34,72	33,43	46,01	33,02	0,04	0,00	0,06	0,06	100,89
58-7-1-2	Apy-Py	19,80	33,49	34,47	33,48	45,63	33,03	0,00	0,00	0,02	0,02	99,93
58-7-2-1	Apy-Py	19,93	33,65	34,61	33,57	45,35	32,78	0,00	0,00	0,05	0,00	99,94
58-7-3-1	Apy-Py	20,75	35,03	34,66	33,60	43,42	31,37	0,00	0,00	0,15	0,02	99,00
58-7-3-2	Apy-Py	21,12	35,71	34,85	33,83	42,10	30,46	0,00	0,00	1,21	0,04	99,32
58-7-4-1	Apy-Py	20,34	34,19	34,67	33,46	44,97	32,35	0,00	0,04	0,02	0,04	100,07
58-7-4-2	Apy-Py	19,39	32,88	34,18	33,28	46,64	33,85	0,00	0,00	0,01	0,03	100,26
58-7-5-1	Apy-Py	19,80	33,47	34,41	33,39	45,81	33,14	0,00	0,00	0,01	0,04	100,06

Muestra	Asociación	S	S at.	Fe	Fe at.	As	As at.	Bi	Ni	Sb	Co	Total
58-7-5-2	Apy-Py	20,18	33,72	35,18	33,76	45,47	32,52	0,00	0,01	0,00	0,03	100,86
58-7-6-1	Apy-Py	19,98	33,50	34,83	33,55	45,90	32,95	0,00	0,01	0,04	0,06	100,81
58-7-7-1	Apy-Py	20,43	34,46	34,45	33,36	44,58	32,18	0,00	0,06	0,02	0,03	99,56
M14-A-1-1	Apy-Py-Po	19,74	33,38	34,58	33,58	45,65	33,04	0,00	0,02	0,02	0,05	100,04
M14-A-1-2	Apy-Py-Po	19,95	33,70	34,39	33,37	45,53	32,93	0,00	0,02	0,03	0,04	99,95
M14-A-2-1	Apy-Py-Po	19,52	33,04	34,49	33,52	46,17	33,44	0,00	0,02	0,02	0,03	100,24
M14-A-3-1	Apy-Py-Po	19,46	33,03	34,40	33,52	46,05	33,45	0,00	0,00	0,00	0,03	99,94
M14-A-3-2	Apy-Py-Po	19,73	33,26	34,39	33,29	46,36	33,45	0,00	0,02	0,02	0,01	100,51
M14-A-4-1	Apy-Py	18,18	31,34	33,58	33,24	48,00	35,42	0,12	0,00	0,19	0,03	100,10
M14-A-4-2	Apy-Py	20,07	33,99	34,53	33,57	44,75	32,44	0,00	0,02	0,57	0,01	99,94
M14-A-4-3	Apy-Py	19,81	33,52	34,48	33,50	45,54	32,98	0,02	0,00	0,59	0,01	100,45
M14-A-4-4	Apy-Py	20,97	35,06	34,51	33,13	44,45	31,81	0,00	0,00	0,48	0,03	100,43
M14-A-5-1	Apy-Py-Po	19,85	33,39	34,62	33,44	46,05	33,16	0,03	0,00	0,00	0,03	100,58
M14-A-6-1	Apy-Py-Po	21,10	35,23	34,89	33,44	43,84	31,32	0,00	0,02	0,00	0,04	99,89
M14-A-7-1	Apy-Py-Po	19,37	32,93	34,31	33,49	46,14	33,57	0,03	0,01	0,05	0,03	99,93
M14-A-8-1	Apy-Py-Po	19,93	33,62	34,20	33,12	46,07	33,26	0,00	0,01	0,01	0,02	100,24
58-11-2-1	Apy-Py-Po	20,99	35,14	35,02	33,65	43,57	31,21	0,00	0,01	0,00	0,00	99,59
58-11-3-1	Apy-Py-Po	20,64	34,30	34,67	33,08	45,87	32,62	0,01	0,00	0,00	0,03	101,22
58-11-4-1	Apy-Py-Po	20,99	34,85	34,94	33,31	44,81	31,84	0,00	0,01	0,00	0,02	100,78
58-11-4-2	Apy-Py-Po	20,47	34,36	34,87	33,60	44,60	32,04	0,00	0,00	0,03	0,05	100,01
58-11-6-1	Apy-Py-Po	20,80	34,82	34,60	33,24	44,60	31,94	0,00	0,04	0,04	0,02	100,09
58-11-6-2	Apy-Py-Po	20,05	33,76	34,73	33,56	45,36	32,68	0,00	0,02	0,08	0,05	100,28
58-11-7-1	Apy-Py-Po	21,40	35,55	34,88	33,28	43,82	31,17	0,04	0,04	0,00	0,05	100,22
58-11-7-2	Apy-Py-Po	20,50	34,44	34,87	33,64	44,40	31,93	0,02	0,04	0,03	0,03	99,88
58-11-8-1	Apy-Py-Po	21,07	35,10	34,83	33,31	44,33	31,60	0,00	0,01	0,00	0,04	100,28
58-11-8-2	Apy-Py-Po	20,06	33,90	34,32	33,29	45,37	32,81	0,00	0,00	0,04	0,04	99,83
58-11-9-1	Apy-Py-Po	20,80	34,78	34,79	33,40	44,48	31,82	0,00	0,01	0,07	0,05	100,20
58-11-5-1	Apy-Py-Po	20,27	34,12	34,57	33,40	45,10	32,48	0,00	0,00	0,01	0,02	99,97
58-11-1-1	Apy-Py-Po	21,30	35,06	35,49	33,54	44,57	31,39	0,00	0,00	0,00	0,02	101,38
58-11-1-2	Apy-Py-Po	20,07	33,59	34,57	33,22	46,33	33,19	0,00	0,04	0,01	0,04	101,06
Std-AsPy-221		18,98	32,26	34,31	33,48	47,11	34,26	0,00	0,00	0,02	0,06	100,49
Std-AsPy-222		19,17	32,62	34,22	33,42	46,65	33,96	0,00	0,00	0,00	0,04	100,08
Std-AsPy-223		19,26	32,70	34,09	33,23	46,90	34,08	0,00	0,00	0,04	0,03	100,31

Microquímica en cobres grises

Muestra	S	Fe	As	Bi	Cu	Se	Sb	Zn	Ag	Pb	Te	Total
Std-Marc-1	50,43	45,29	0,03	0,00	0,03	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	95,79
Std-AsPy-2	19,04	34,37	46,36	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,17	0,00	99,96
Std-Estibina-3	26,56	0,00	0,91	0,00	0,00	0,00	71,14	0,00	0,00	0,09	0,00	98,70
Std-Sph-4	30,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	55,03	0,00	0,00	0,00	85,84
43-17-7-1	27,68	4,26	15,68	0,03	39,20	0,00	7,25	3,45	0,68	0,00	0,00	98,23
43-17-7-2	25,57	3,07	4,98	0,00	36,00	0,00	22,39	4,32	2,37	0,09	0,00	98,78

Muestra	S	Fe	As	Bi	Cu	Se	Sb	Zn	Ag	Pb	Te	Total
43-17-1-1	27,31	5,41	16,69	0,00	36,30	0,00	5,66	2,94	0,98	0,00	0,00	95,29
43-17-1-2	27,96	5,58	15,91	0,00	37,89	0,00	6,04	3,14	0,92	0,00	0,00	97,43
43-17-1-3	27,29	5,20	13,47	0,04	37,60	0,00	10,25	3,34	1,67	0,00	0,00	98,86
43-17-1-4	27,15	4,98	14,81	0,04	38,02	0,00	8,51	3,33	1,45	0,00	0,00	98,27
43-17-3-1	25,91	3,14	6,21	0,06	35,43	0,00	20,25	4,42	2,87	0,01	0,00	98,29
43-17-3-2	26,21	3,99	7,42	0,00	35,24	0,00	18,48	4,20	2,38	0,00	0,00	97,91
43-17-3-3	24,48	3,83	2,76	0,00	32,40	0,00	24,79	3,78	5,17	0,05	0,00	97,27
43-17-4-1	28,04	4,53	16,36	0,00	39,29	0,00	6,34	3,40	1,05	0,19	0,00	99,19
43-17-4-2	28,02	5,28	15,67	0,03	38,17	0,00	7,20	3,43	1,13	0,14	0,00	99,06
43-17-4-3	27,06	4,21	11,97	0,05	36,72	0,00	13,40	3,95	2,28	0,00	0,00	99,63
43-17-4-4	27,96	4,84	16,65	0,03	38,94	0,00	6,15	3,72	1,05	0,00	0,00	99,33
43-17-5-1	27,64	4,80	15,60	0,03	38,79	0,00	7,11	3,28	0,84	0,00	0,00	98,10
43-17-5-2	28,07	4,68	15,27	0,00	39,34	0,00	5,21	3,15	0,90	0,08	0,00	96,69
43-17-5-3	28,09	4,80	16,11	0,00	39,34	0,00	6,12	3,17	0,90	0,00	0,00	98,52
43-17-6-1	27,92	4,68	16,50	0,09	38,95	0,00	6,10	3,31	0,78	0,07	0,00	98,39
43-17-6-2	27,97	4,34	16,25	0,00	39,28	0,00	6,61	3,80	0,84	0,00	0,00	99,09
43-17-6-3	28,15	4,18	15,49	0,00	39,53	0,00	7,67	3,52	1,00	0,00	0,00	99,53
43-17-6-12	24,17	3,12	0,57	0,00	32,22	0,00	27,96	3,89	5,23	0,00	0,00	97,15
43-17-6-4	27,90	4,65	15,70	0,13	39,10	0,00	7,44	3,33	0,96	0,00	0,00	99,20
43-17-6-5	26,12	3,40	6,28	0,00	36,03	0,00	20,43	4,02	2,78	0,00	0,00	99,06
43-17-6-6	27,05	4,07	10,89	0,03	37,04	0,00	13,98	3,74	1,56	0,00	0,00	98,37
43-17-6-7	27,29	4,29	12,14	0,00	37,92	0,00	12,21	3,80	1,49	0,00	0,00	99,13
43-17-6-8	21,91	15,46	29,92	0,00	22,21	0,00	3,71	1,97	0,56	0,12	0,00	95,86
43-17-6-9	27,82	4,33	15,18	0,06	38,49	0,00	7,80	3,58	0,98	0,00	0,00	98,24
43-17-6-10	28,17	4,41	16,09	0,00	39,52	0,00	6,63	3,27	1,00	0,09	0,00	99,19
43-17-6-13	25,49	3,13	3,77	0,00	34,81	0,00	23,40	4,66	2,97	0,00	0,00	98,22
Line 1 43-17-7-L1	27,92	4,17	15,86	0,00	39,53	0,00	7,01	3,49	0,75	0,00	0,00	98,72
Line 2 43-17-7-L1	28,00	4,21	15,71	0,07	39,42	0,00	7,25	3,44	0,84	0,06	0,00	99,00
Line 3 43-17-7-L1	26,18	3,05	6,40	0,01	37,05	0,00	20,50	4,45	1,60	0,07	0,00	99,31
Line 4 43-17-7-L1	25,25	2,05	1,98	0,00	35,45	0,00	26,47	5,34	2,56	0,00	0,00	99,10
Line 5 43-17-7-L1	26,08	3,09	6,60	0,03	37,31	0,00	17,75	4,42	2,15	0,00	0,00	97,42
Line 6 43-17-7-L1	27,64	4,07	13,40	0,00	38,97	0,00	10,04	3,56	0,88	0,00	0,00	98,55
Line 7 43-17-7-L1	25,46	2,39	2,81	0,03	35,95	0,00	25,31	5,05	2,08	0,13	0,00	99,21
Line 8 43-17-7-L1	25,40	3,06	7,08	0,03	35,76	0,00	18,73	4,26	2,00	0,00	0,00	96,32
Line 9 43-17-7-L1	27,59	4,08	15,18	0,00	39,09	0,00	7,92	3,50	0,72	0,00	0,00	98,09
Line 10 43-17-7-L1	27,88	4,15	15,67	0,13	39,38	0,00	7,32	3,49	0,60	0,00	0,00	98,62
Line 1 43-17-7-L2	27,97	4,85	16,08	0,07	39,09	0,00	6,71	3,31	0,75	0,00	0,00	98,83
Line 2 43-17-7-L2	28,08	4,55	15,92	0,00	39,25	0,00	6,94	3,29	0,75	0,00	0,00	98,78
Line 3 43-17-7-L2	25,75	3,25	4,64	0,00	36,22	0,00	22,79	4,41	2,06	0,00	0,00	99,11
Line 4 43-17-7-L2	25,58	2,36	2,37	0,13	35,01	0,00	26,12	5,02	2,94	0,01	0,00	99,54
Line 5 43-17-7-L2	25,83	3,15	5,35	0,00	36,50	0,00	21,56	4,38	1,70	0,12	0,00	98,59
Line 6 43-17-7-L2	26,00	4,00	16,14	0,10	37,39	0,00	9,03	3,61	0,91	0,00	0,00	97,17

Muestra	S	Fe	As	Bi	Cu	Se	Sb	Zn	Ag	Pb	Te	Total
Line 7 43-17-7-L2	27,90	4,32	15,86	0,00	39,28	0,00	6,97	3,50	0,76	0,00	0,00	98,60
Line 8 43-17-7-L2	27,05	4,51	14,54	0,03	38,16	0,00	8,55	3,03	0,86	0,00	0,00	96,73
Line 9 43-17-7-L2	27,64	4,12	13,98	0,00	38,53	0,00	10,33	3,69	1,11	0,11	0,00	99,51
Line 10 43-17-7-L2	26,91	3,57	10,85	0,00	38,02	0,00	13,78	4,17	1,28	0,00	0,00	98,57
43-17-10-1	25,86	2,89	4,27	0,04	35,87	0,00	23,37	4,70	2,95	0,00	0,00	99,96
SM-199-1-1	23,12	5,54	0,00	0,00	20,18	0,01	27,35	0,75	23,10	0,04	0,00	100,09
SM-199-1-2	22,51	5,62	0,00	0,02	19,44	0,01	27,29	0,71	24,19	0,05	0,00	99,82
SM-199-7-1	22,22	5,49	0,33	0,00	19,52	0,00	26,58	1,68	23,40	0,00	0,00	99,21
SM-199-7-2	22,12	5,74	0,30	0,00	18,74	0,00	26,39	1,09	24,00	0,00	0,00	98,39
SM-199-7-3	22,49	5,43	0,34	0,00	19,55	0,00	26,40	0,90	23,47	0,00	0,00	98,60
SM-199-6-1	21,23	5,07	0,32	0,00	15,67	0,00	26,29	0,77	28,73	0,04	0,00	98,12
SM-199-6-2	20,56	5,64	0,35	0,00	14,04	0,00	26,04	0,71	30,73	0,02	0,00	98,08
SM-199-6-3	22,31	5,96	0,37	0,00	19,97	0,00	26,93	0,76	22,41	0,04	0,00	98,74
SM-199-6-4	19,89	5,29	0,28	0,00	13,91	0,00	22,92	1,01	25,50	0,01	0,00	88,81
SM-199-6-4B	4,29	1,28	0,04	0,00	0,65	0,01	1,07	0,07	0,92	0,00	0,00	8,31
SM-199-6-5	16,33	4,27	0,25	0,00	11,28	0,00	18,67	0,95	22,38	0,00	0,00	74,12
SM-199-4-1	20,92	6,44	0,29	0,00	14,55	0,00	26,05	0,70	30,47	0,14	0,00	99,56
SM-199-4-3	21,06	5,32	0,29	0,03	15,82	0,00	26,21	0,73	29,36	0,02	0,00	98,83
SM-199-3-2	21,90	6,08	0,32	0,00	16,79	0,00	25,67	0,84	27,67	0,05	0,00	99,31
SM-199-3-3	21,05	5,78	0,23	0,13	15,17	0,00	26,31	1,05	30,26	0,10	0,00	100,08
Std-AsPy-3	18,81	33,83	47,01	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	99,74
Std-Sph-5	31,47	0,01	0,04	0,14	0,00	0,02	0,00	68,08	0,00	0,00	0,00	99,76
Std-Marc-2	52,09	44,98	0,02	0,00	0,03	0,02	0,02	0,03	0,00	0,18	0,03	97,40
Std-Estib-4	28,39	0,02	0,85	0,00	0,00	0,00	71,55	0,01	0,00	0,00	0,00	100,82
42-6-3-1	21,42	4,58	0,87	0,00	20,78	0,09	25,84	3,29	23,65	0,00	0,00	100,51
42-6-5-1	22,57	0,69	1,69	0,00	25,43	0,00	25,64	6,77	16,94	0,00	0,00	99,74
42-6-5-2	22,65	0,78	2,74	0,00	25,71	0,00	24,22	6,89	16,91	0,09	0,00	100,00
42-6-6-1	21,79	6,53	0,32	0,00	21,00	0,00	27,06	1,90	23,36	0,00	0,00	101,96
42-6-6-2	21,57	6,51	0,42	0,00	22,02	0,01	26,98	1,84	22,19	0,00	0,00	101,53
42-6-7-1	20,72	5,86	0,39	0,00	18,53	0,18	26,11	0,99	25,91	2,51	0,00	101,18
42-6-8-1	22,40	1,98	1,98	0,07	25,78	0,00	24,63	6,41	16,76	0,06	0,00	100,04
42-6-10-1	22,02	6,31	1,20	0,00	23,42	0,21	26,28	0,58	20,75	0,00	0,00	100,77
42-6-10-2B	20,36	6,04	0,66	0,00	17,92	0,16	26,31	0,69	28,10	0,16	0,00	100,40
42-6-10-4	21,84	5,99	1,60	0,00	21,76	0,12	26,27	1,20	21,54	0,40	0,00	100,73
42-6-10-5	21,92	5,44	0,66	0,00	18,25	0,09	27,07	0,97	25,89	0,05	0,00	100,32
42-6-10-7	23,64	7,66	1,45	0,00	21,83	0,00	21,40	1,30	21,43	0,17	0,00	98,87
42-6-10-8	21,99	6,41	1,67	0,00	23,11	0,10	25,42	1,09	21,22	0,06	0,00	101,07
42-6-11-1	22,50	1,36	2,50	0,03	25,69	0,00	24,01	6,78	16,69	0,00	0,00	99,57
42-6-11-2	22,53	1,35	1,86	0,00	25,38	0,00	25,14	6,68	16,78	0,00	0,00	99,71
43-6-1-1	20,03	5,11	0,26	0,13	15,21	0,00	26,29	2,29	30,95	0,17	0,00	100,42
43-6-1-2	19,94	4,81	0,26	0,00	14,78	0,02	26,21	2,85	31,45	0,19	0,00	100,51
43-6-5-1	21,80	5,66	0,28	0,00	22,05	0,04	27,11	3,07	21,06	0,00	0,00	101,07

Muestra	S	Fe	As	Bi	Cu	Se	Sb	Zn	Ag	Pb	Te	Total
43-6-5-2	22,14	5,42	0,32	0,00	22,97	0,05	27,17	3,19	19,49	0,00	0,00	100,75
43-6-5-3	19,96	5,00	0,27	0,01	14,93	0,00	26,18	3,12	31,44	0,02	0,00	100,92
Std-AsPy-4	18,79	34,24	47,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,11	0,07	0,00	100,29
Std-AsPy-5	18,83	34,27	47,14	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,09	0,01	100,36

Microquímica en sulfosales de plomo

Muestra	S	Fe	As	Bi	Cu	Se	Sb	Zn	Ag	Pb	Te	Total
43-21-4-1	13,35	0,08	0,00	20,93	0,00	4,06	0,03	0,29	2,74	49,66	0,26	91,38
43-21-4-2	13,35	0,09	0,00	19,82	0,01	4,10	0,00	0,99	2,58	52,63	0,25	93,80
43-21-4-3	13,44	0,07	0,00	21,71	0,02	4,09	0,00	0,82	2,94	50,04	0,18	93,31
43-21-4-4	13,29	0,10	0,00	21,65	0,00	4,16	0,00	0,95	3,06	48,35	0,13	91,68
43-21-4-5	13,29	0,07	0,00	21,82	0,04	4,14	0,00	0,89	3,02	49,14	0,16	92,57
43-13B-1-1	15,75	0,47	0,00	17,02	0,75	4,01	10,04	0,27	1,75	45,43	0,00	95,49
43-13B-1-2	16,21	3,01	0,00	16,84	0,69	3,24	9,12	0,93	1,66	40,06	0,00	91,75
43-13B-2-1	15,64	0,99	0,00	17,19	0,76	4,03	10,31	0,82	1,53	43,63	0,00	94,90
43-13B-3-1	15,50	0,37	0,00	16,82	0,78	4,14	10,38	0,09	1,60	43,82	0,00	93,48
43-13B-3-2	10,02	0,10	0,00	0,00	0,06	6,23	0,00	0,86	1,22	81,46	0,05	100,00
43-13B-3-3	15,49	0,48	0,00	16,73	0,80	4,29	10,47	0,36	1,39	42,62	0,00	92,64
43-13B-3-4	10,03	0,08	0,00	0,00	0,00	6,20	0,00	1,13	1,19	81,07	0,05	99,74
43-13B-3-5	8,13	13,35	0,00	0,00	0,04	3,87	0,06	0,28	0,87	63,23	0,06	89,88
43-13B-4-1	15,61	1,74	0,00	17,49	0,76	4,32	10,30	0,00	1,96	40,73	0,00	92,92
43-13B-4-2	15,58	0,36	0,00	16,98	0,74	4,26	10,23	0,17	1,58	43,45	0,00	93,34
43-13B-4-3	15,46	0,28	0,00	16,40	0,79	4,12	10,30	0,02	1,61	43,06	0,00	92,05

Microquímica en granate

Muestra	CaO	MnO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Total
Std-Alm-1	4,15	0,58	38,84	0,00	23,18	10,44	0,06	21,31	98,55
Std-Alm-2	4,09	0,60	39,25	0,00	23,34	10,41	0,08	22,24	100,00
Std-Alm-3	4,13	0,62	39,18	0,00	23,16	10,36	0,10	22,08	99,63
43-20-1	36,89	0,19	37,81	0,00	8,52	0,14	0,45	14,65	98,64
43-20-2	35,90	0,16	39,28	0,00	9,60	0,11	0,11	13,46	98,62
43-20-3	37,09	0,35	41,72	0,00	6,61	0,03	0,07	16,81	102,68
43-20-4	36,55	0,19	39,28	0,00	9,33	0,21	0,38	13,66	99,59
43-20-5	36,69	0,16	39,41	0,00	9,77	0,08	0,05	13,42	99,59
43-20-6	36,12	0,19	40,49	0,00	11,34	0,07	0,06	12,18	100,45
Line 1 43-20-L1	35,57	0,25	39,93	0,00	11,14	0,08	0,17	12,59	99,72
Line 2 43-20-L1	35,75	0,25	40,12	0,00	9,08	0,10	0,32	14,00	99,63
Line 3 43-20-L1	35,76	0,19	39,74	0,00	10,14	0,10	0,08	13,20	99,21
Line 4 43-20-L1	35,71	0,24	39,86	0,00	9,42	0,07	0,13	13,89	99,32
Line 5 43-20-L1	34,74	0,25	38,28	0,01	9,27	0,10	0,19	13,34	96,18
Line 6 43-20-L1	35,59	0,27	39,67	0,00	9,47	0,09	0,14	13,86	99,09
Line 7 43-20-L1	35,67	0,25	39,49	0,00	9,64	0,11	0,29	13,70	99,16

Muestra	CaO	MnO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Total
Line 8 43-20-L1	35,69	0,21	39,66	0,00	10,51	0,10	0,30	12,83	99,29
Line 9 43-20-L1	35,63	0,20	39,69	0,00	11,45	0,10	0,29	12,28	99,65
Line 10 43-20-L1	35,42	0,21	39,65	0,04	13,50	0,10	0,32	10,52	99,76
43-20-8	35,79	0,25	39,70	0,00	9,31	0,09	0,17	13,97	99,29
43-20-9	35,60	0,19	40,12	0,00	12,98	0,13	0,63	11,05	100,70
43-20-10	36,49	0,24	40,09	0,00	10,42	0,10	0,16	13,24	100,74
43-20-11	36,52	0,19	39,97	0,00	10,21	0,08	0,21	13,21	100,38
43-20-12	36,62	0,17	38,22	0,00	11,03	0,05	0,00	12,96	99,04
43-20-13	36,76	0,18	38,10	0,00	9,43	0,09	0,10	14,04	98,70
43-20-14	36,60	0,18	38,38	0,00	10,11	0,11	0,13	13,64	99,15
43-20-15	36,55	0,16	38,22	0,00	10,13	0,10	0,20	13,54	98,90
43-20-16	36,67	0,16	38,41	0,00	9,51	0,09	0,04	14,35	99,23
43-20-17	36,71	0,15	38,79	0,00	10,29	0,06	0,05	13,99	100,04
Std-Alm-4	4,22	0,64	39,50	0,01	23,38	10,27	0,07	21,28	99,36
Std-Alm-5	4,19	0,63	41,98	0,01	23,45	10,24	0,04	21,40	101,94
Std-Alm-6	4,18	0,57	39,36	0,00	23,08	10,21	0,09	20,97	98,46

Microquímica en magnetita

Muestra	TiO ₂	FeO*	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	V ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	ZnO	Total
Std-Mag-1	0,07	92,62			0,07	0,37	0,05	0,14	0,06	0,12	0,04	93,65
Std-Mag-2	0,10	92,65			0,02	0,38	0,06	0,15	0,20	0,10	0,00	93,75
43-21-Mag	0,00	91,67	67,81	30,34	0,26	0,00	0,10	0,02	0,00	0,00	0,10	92,27
43-21-Mag-2	0,01	91,05	67,57	30,24	0,32	0,00	0,10	0,18	0,02	0,01	0,11	91,88
43-21-Mag-3	0,02	91,36	68,13	30,36	0,18	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,04	91,79
Std-Mag-5	0,09	92,61			0,01	0,34	0,07	0,16	0,22	0,09	0,00	93,65
Std-Mag-6	0,09	92,82			0,05	0,37	0,11	0,14	0,22	0,12	0,02	94,06

Std: mediciones en estándares

Line: análisis WDS lineales (borde-núcleo-borde)

Valores presentados en % en peso, a excepción de at. (% atómico).

12.4 Fechamientos ⁴⁰Ar/³⁹Ar

Muestra SM-58-12										
%	³⁶ Ar [fA]	³⁷ Ar [fA]	³⁸ Ar [fA]	³⁹ Ar [fA]	⁴⁰ Ar [fA]	40(r)/39(k)	Edad ± 2s Ma	⁴⁰ Ar(r) (%)	³⁹ Ar(k) (%)	
0,1 %	0,0643530	0,003085	0,108013	7,8433	112,414	11,88226	35,61 ± 0,22	82,90	0,18	
0,2 %	0,0837338	0,005384	0,220685	16,8103	228,621	12,11232	36,29 ± 0,11	89,06	0,39	
0,3 %	0,1263094	0,051850	0,421071	32,6868	437,943	12,24398	36,68 ± 0,07	91,39	0,76	
0,4 %	0,1340890	0,082605	0,686188	53,5811	702,471	12,36280	37,04 ± 0,05	94,30	1,25	
0,5 %	0,0493495	0,063008	0,455665	37,1490	475,318	12,39784	37,14 ± 0,06	96,90	0,87	
0,6 %	0,1369104	0,136442	1,005914	80,9774	1045,649	12,40761	37,17 ± 0,04	96,09	1,89	
0,7 %	0,0367422	0,079800	0,568606	47,2581	597,658	12,41410	37,19 ± 0,05	98,16	1,10	
0,8 %	0,0199176	0,033702	0,353744	29,2686	370,443	12,45299	37,30 ± 0,06	98,39	0,68	
0,9 %	0,0409375	0,073901	0,567476	46,9045	594,979	12,42386	37,22 ± 0,05	97,94	1,09	

%	36Ar [fA]	37Ar [fA]	38Ar [fA]	39Ar [fA]	40Ar [fA]	40(r)/39(k)	Edad ± 2s Ma	40Ar(r) (%)	39Ar(k) (%)
1,0 %	0,0278097	0,074397	0,491158	41,5456	525,595	12,45077	37,30 ± 0,05	98,42	0,97
1,2 %	0,0556580	0,158494	0,671647	54,9625	700,573	12,44368	37,28 ± 0,05	97,63	1,28
1,3 %	0,0248898	0,126227	0,518921	43,6719	551,264	12,45236	37,30 ± 0,05	98,65	1,02
1,4 %	0,0199565	0,129378	0,451123	37,7612	477,336	12,48282	37,39 ± 0,06	98,75	0,88
1,6 %	0,0696446	0,214214	0,628500	51,3918	661,287	12,46271	37,33 ± 0,05	96,85	1,20
1,8 %	0,0695726	0,185844	0,638887	52,3618	673,074	12,45730	37,32 ± 0,05	96,91	1,22
2,0 %	0,1416512	0,344493	0,840578	68,6129	898,336	12,47629	37,37 ± 0,04	95,29	1,60
2,2 %	0,3224909	0,837162	1,171986	92,0770	1245,975	12,48640	37,40 ± 0,04	92,27	2,15
2,4 %	0,3773821	3,111828	1,291440	100,9214	1375,257	12,51272	37,48 ± 0,04	91,82	2,35
2,6 %	0,4604097	0,875463	1,306192	100,8699	1400,929	12,52589	37,52 ± 0,04	90,19	2,35
2,8 %	0,9243435	0,659883	1,969775	146,4037	2113,597	12,55156	37,60 ± 0,04	86,94	3,42
3,0 %	0,4320407	0,241408	1,054174	78,7582	120,174	12,58483	37,70 ± 0,05	88,48	1,84
3,3 %	0,3142022	0,245916	0,712234	54,5431	780,036	12,58119	37,68 ± 0,06	87,97	1,27
3,6 %	0,1947673	0,126300	0,536261	40,5703	567,009	12,54234	37,57 ± 0,06	89,74	0,95
3,9 %	0,2085917	0,107153	0,610890	47,4470	657,261	12,53957	37,56 ± 0,06	90,52	1,11
4,2 %	0,4628983	0,246772	1,147113	86,3163	1221,440	12,54928	37,59 ± 0,05	88,68	2,01
4,6 %	0,2403343	0,099315	0,559909	41,9692	598,026	12,53909	37,56 ± 0,06	88,00	0,98
5,0 %	0,2807872	0,163278	0,602029	44,7143	644,236	12,53272	37,54 ± 0,06	86,99	1,04
5,5 %	0,2282612	0,121677	0,437061	32,0870	470,844	12,54980	37,59 ± 0,08	85,52	0,75
6,0 %	0,4195209	0,249457	0,888248	65,8115	954,416	12,59881	37,74 ± 0,05	86,87	1,54
6,5 %	0,0474527	0,036086	0,123285	8,4399	120,229	12,56651	37,64 ± 0,20	88,21	0,20
7,0 %	0,1222683	0,044987	0,268895	19,9936	287,608	12,55876	37,62 ± 0,10	87,30	0,47
7,5 %	0,0297775	0,014031	0,057233	4,4531	65,313	12,67006	37,95 ± 0,37	86,39	0,10
8,0 %	0,0163375	0,010250	0,047391	4,0701	56,279	12,62874	37,83 ± 0,39	91,33	0,09
8,5 %	0,0343629	0,002801	0,095532	7,4544	103,721	12,53712	37,55 ± 0,22	90,10	0,17
0,1 %	0,0470952	0,103520	0,163946	12,9568	171,027	11,96407	35,85 ± 0,28	90,63	0,30
0,2 %	0,1018978	0,609451	0,806105	66,8455	848,996	12,18369	36,51 ± 0,11	95,92	1,56
0,3 %	0,0487430	0,905038	0,894938	73,9253	925,908	12,30249	36,86 ± 0,06	98,21	1,72
0,4 %	0,0368327	0,857859	0,721940	61,1546	766,774	12,33548	36,96 ± 0,06	98,37	1,43
0,5 %	0,0379458	1,761738	1,343923	11,8512	1397,952	12,38523	37,10 ± 0,04	99,08	2,61
0,6 %	0,0406053	1,842121	1,748159	144,2772	1803,539	12,40681	37,17 ± 0,04	99,24	3,37
0,7 %	0,0376627	2,261767	2,006225	167,0017	2089,247	12,43574	37,25 ± 0,04	99,39	3,90
0,8 %	0,0163443	0,555639	0,775666	67,1356	840,027	12,43117	37,24 ± 0,04	99,34	1,57
0,9 %	0,0165948	0,839679	0,913788	76,4927	956,902	12,43779	37,26 ± 0,04	99,41	1,78
1,0 %	0,0163725	0,741246	0,716512	59,8640	749,852	12,43489	37,25 ± 0,05	99,26	1,40
1,2 %	0,0198557	0,984690	0,796311	66,8211	837,496	12,43457	37,25 ± 0,05	99,20	1,56
1,3 %	0,0260002	2,205561	1,261316	105,0016	1317,159	12,46282	37,33 ± 0,04	99,34	2,45
1,4 %	0,0227199	1,606700	0,916432	77,9427	978,197	12,45387	37,31 ± 0,04	99,22	1,82
1,6 %	0,0366482	3,256500	1,215009	98,9159	1245,090	12,46537	37,34 ± 0,04	99,02	2,31
1,8 %	0,0781843	5,061816	1,686403	40,1239	1773,549	12,47151	37,36 ± 0,05	98,52	3,27
2,0 %	0,0342504	1,217301	0,810097	66,6291	841,725	12,46066	37,33 ± 0,05	98,62	1,55
2,2 %	0,0444450	2,566450	0,934111	77,2780	978,679	12,47277	37,36 ± 0,06	98,47	1,80
2,4 %	0,0738093	3,555221	1,078916	87,7973	1119,469	12,46932	37,35 ± 0,07	97,78	2,05
2,6 %	0,3983689	6,322017	3,086697	48,7055	3243,792	12,50084	37,45 ± 0,12	95,83	5,80
2,8 %	0,2155301	3,074193	1,418479	113,4858	1490,144	12,48772	37,41 ± 0,14	95,09	2,65
3,0 %	0,1057914	2,918111	0,842074	67,9244	884,718	12,49999	37,44 ± 0,11	95,96	1,58
3,3 %	0,0800082	0,760599	0,649017	53,2221	691,473	12,48275	37,39 ± 0,11	96,07	1,24
3,6 %	0,0693718	0,891384	0,757406	61,6899	794,451	12,49762	37,44 ± 0,09	97,03	1,44

%	36Ar [fA]	37Ar [fA]	38Ar [fA]	39Ar [fA]	40Ar [fA]	40(r)/39(k)	Edad ± 2s Ma	40Ar(r) (%)	39Ar(k) (%)
3,9 %	0,0594228	3,173215	0,882417	71,8386	918,080	12,50344	37,45 ± 0,07	97,82	1,68
4,2 %	0,0486136	1,122317	0,715623	58,0092	741,938	12,50751	37,47 ± 0,07	97,78	1,35
4,6 %	0,0469685	0,801092	0,583787	48,4559	622,251	12,51413	37,49 ± 0,08	97,44	1,13
5,0 %	0,0799338	1,396130	0,826137	66,5849	860,433	12,51664	37,49 ± 0,09	96,85	1,55
5,5 %	0,0917958	5,122492	0,828504	67,4533	876,515	12,53960	37,56 ± 0,10	96,48	1,57
6,0 %	0,0683804	2,655573	0,561671	45,9246	598,625	12,53473	37,55 ± 0,11	96,15	1,07
6,5 %	0,0583675	5,107788	0,367650	28,9673	382,737	12,54532	37,58 ± 0,15	94,93	0,68
7,0 %	0,1227462	6,421232	0,800579	64,0170	843,252	12,53051	37,53 ± 0,14	95,11	1,49
7,5 %	0,0254973	0,126708	0,145396	11,9584	158,846	12,55931	37,62 ± 0,20	94,54	0,28
8,0 %	0,0244002	0,075044	0,121204	10,2704	136,645	12,49754	37,44 ± 0,22	93,92	0,24
8,5 %	0,0096860	0,065309	0,077326	6,3431	83,110	12,58453	37,69 ± 0,26	96,04	0,15
9,0 %	0,0206587	0,040018	0,071588	4,4249	61,653	12,34583	36,99 ± 0,47	88,60	0,10
9,5 %	0,0025279	0,019832	0,056875	3,9274	50,247	12,57623	37,67 ± 0,38	98,29	0,09
10,0 %	0,0041579	0,048181	0,047965	3,9320	50,468	12,47735	37,38 ± 0,39	97,20	0,09
10,5 %	0,0017896	0,032051	0,048726	2,9406	37,476	12,53943	37,56 ± 0,50	98,38	0,07
11,0 %	0,0118943	0,101739	0,085775	5,2488	69,048	12,38650	37,11 ± 0,32	94,15	0,12
0,1 %	0,0643530	0,0030849	0,108013	7,8433	112,414	11,88226	35,61 ± 0,22	82,90	0,47
0,2 %	0,0837338	0,0053836	0,220685	16,8103	228,621	12,11232	36,29 ± 0,11	89,06	1,00
0,3 %	0,1263094	0,0518496	0,421071	32,6868	437,943	12,24398	36,68 ± 0,07	91,39	1,95
0,4 %	0,1340890	0,0826052	0,686188	53,5811	702,471	12,36280	37,04 ± 0,05	94,30	3,19
0,5 %	0,0493495	0,0630077	0,455665	37,1490	475,318	12,39784	37,14 ± 0,06	96,90	2,21
0,6 %	0,1369104	0,1364423	1,005914	80,9774	045,649	12,40761	37,17 ± 0,04	96,09	4,82
0,7 %	0,0367422	0,0798000	0,568606	47,2581	597,658	12,41410	37,19 ± 0,05	98,16	2,81
0,8 %	0,0199176	0,0337024	0,353744	29,2686	370,443	12,45299	37,30 ± 0,06	98,39	1,74
0,9 %	0,0409375	0,0739005	0,567476	46,9045	594,979	12,42386	37,22 ± 0,05	97,94	2,79
1,0 %	0,0278097	0,0743970	0,491158	41,5456	525,595	12,45077	37,30 ± 0,05	98,42	2,47
1,2 %	0,0556580	0,1584937	0,671647	54,9625	700,573	12,44368	37,28 ± 0,05	97,63	3,27
1,3 %	0,0248898	0,1262270	0,518921	43,6719	551,264	12,45236	37,30 ± 0,05	98,65	2,60
1,4 %	0,0199565	0,1293782	0,451123	37,7612	477,336	12,48282	37,39 ± 0,06	98,75	2,25
1,6 %	0,0696446	0,2142138	0,628500	51,3918	661,287	12,46271	37,33 ± 0,05	96,85	3,06
1,8 %	0,0695726	0,1858437	0,638887	52,3618	673,074	12,45730	37,32 ± 0,05	96,91	3,12
2,0 %	0,1416512	0,3444932	0,840578	68,6129	898,336	12,47629	37,37 ± 0,04	95,29	4,08
2,2 %	0,3224909	0,8371619	1,171986	92,0770	245,975	12,48640	37,40 ± 0,04	92,27	5,48
2,4 %	0,3773821	3,1118277	1,291440	00,9214	1375,257	12,51272	37,48 ± 0,04	91,82	6,01
2,6 %	0,4604097	0,8754634	1,306192	00,8699	1400,929	12,52589	37,52 ± 0,04	90,19	6,01
2,8 %	0,9243435	0,6598832	1,969775	146,4037	2113,597	12,55156	37,60 ± 0,04	86,94	8,72
3,0 %	0,4320407	0,2414083	1,054174	78,7582	1120,174	12,58483	37,70 ± 0,05	88,48	4,69
3,3 %	0,3142022	0,2459164	0,712234	54,5431	780,036	12,58119	37,68 ± 0,06	87,97	3,25
3,6 %	0,1947673	0,1263000	0,536261	40,5703	567,009	12,54234	37,57 ± 0,06	89,74	2,42
3,9 %	0,2085917	0,1071532	0,610890	47,4470	657,261	12,53957	37,56 ± 0,06	90,52	2,82
4,2 %	0,4628983	0,2467722	1,147113	86,3163	1221,440	12,54928	37,59 ± 0,05	88,68	5,14
4,6 %	0,2403343	0,0993150	0,559909	41,9692	598,026	12,53909	37,56 ± 0,06	88,00	2,50
5,0 %	0,2807872	0,1632784	0,602029	44,7143	644,236	12,53272	37,54 ± 0,06	86,99	2,66
5,5 %	0,2282612	0,1216765	0,437061	32,0870	470,844	12,54980	37,59 ± 0,08	85,52	1,91
6,0 %	0,4195209	0,2494569	0,888248	65,8115	954,416	12,59881	37,74 ± 0,05	86,87	3,92
6,5 %	0,0474527	0,0360856	0,123285	8,4399	120,229	12,56651	37,64 ± 0,20	88,21	0,50
7,0 %	0,1222683	0,0449872	0,268895	19,9936	287,608	12,55876	37,62 ± 0,10	87,30	1,19
7,5 %	0,0297775	0,0140307	0,057233	4,4531	65,313	12,67006	37,95 ± 0,37	86,39	0,27

8,0 %	0,0163375	0,0102504	0,047391	4,0701	56,279	12,62874	37,83 ± 0,39	91,33	0,24
8,5 %	0,0343629	0,0028009	0,095532	7,4544	103,721	12,53712	37,55 ± 0,22	90,10	0,44

Muestra SM-43-12

%	36Ar [fA]	37Ar [fA]	38Ar [fA]	39Ar [fA]	40Ar [fA]	40(r)/39(k)	Edad ± 2s Ma	40Ar(r) (%)	39Ar(k) (%)
0,1 %	0,0470952	0,103520	0,163946	12,9568	171,027	11,96270	35,85 ± 0,28	90,63	0,50
0,2 %	0,1018978	0,609451	0,806105	66,8455	848,996	12,18229	36,51 ± 0,11	95,92	2,56
0,3 %	0,0487430	0,905038	0,894938	73,9253	925,908	12,30108	36,86 ± 0,06	98,21	2,84
0,4 %	0,0368327	0,857859	0,721940	61,1546	766,774	12,33406	36,96 ± 0,06	98,37	2,35
0,5 %	0,0379458	1,761738	1,343923	11,8512	1397,952	12,38380	37,10 ± 0,04	99,08	4,29
0,6 %	0,0406053	1,842121	1,748159	144,2772	1803,539	12,40539	37,17 ± 0,04	99,24	5,53
0,7 %	0,0376627	2,261767	2,006225	67,0017	2089,247	12,43431	37,25 ± 0,04	99,39	6,41
0,8 %	0,0163443	0,555639	0,775666	67,1356	840,027	12,42974	37,24 ± 0,04	99,34	2,57
0,9 %	0,0165948	0,839679	0,913788	76,4927	956,902	12,43636	37,26 ± 0,04	99,41	2,93
1,0 %	0,0163725	0,741246	0,716512	59,8640	749,852	12,43346	37,25 ± 0,05	99,26	2,30
1,2 %	0,0198557	0,984690	0,796311	66,8211	837,496	12,43314	37,25 ± 0,05	99,20	2,56
1,3 %	0,0260002	2,205561	1,261316	05,0016	1317,159	12,46138	37,33 ± 0,04	99,34	4,03
1,4 %	0,0227199	1,606700	0,916432	77,9427	978,197	12,45243	37,31 ± 0,04	99,22	2,99
1,6 %	0,0366482	3,256500	1,215009	98,9159	245,090	12,46393	37,34 ± 0,04	99,02	3,79
1,8 %	0,0781843	5,061816	1,686403	140,1239	1773,549	12,47008	37,36 ± 0,05	98,52	5,37
2,0 %	0,0342504	1,217301	0,810097	66,6291	841,725	12,45923	37,33 ± 0,05	98,62	2,56
2,2 %	0,0444450	2,566450	0,934111	77,2780	978,679	12,47133	37,36 ± 0,06	98,47	2,96
2,4 %	0,0738093	3,555221	1,078916	87,7973	1119,469	12,46789	37,35 ± 0,07	97,78	3,37
2,6 %	0,3983689	6,322017	3,086697	48,7055	3243,792	12,49940	37,45 ± 0,12	95,83	9,54
2,8 %	0,2155301	3,074193	1,418479	13,4858	1490,144	12,48629	37,41 ± 0,14	95,09	4,35
3,0 %	0,1057914	2,918111	0,842074	67,9244	884,718	12,49855	37,44 ± 0,11	95,96	2,61
3,3 %	0,0800082	0,760599	0,649017	53,2221	691,473	12,48131	37,39 ± 0,11	96,07	2,04
3,6 %	0,0693718	0,891384	0,757406	61,6899	794,451	12,49618	37,44 ± 0,09	97,03	2,37
3,9 %	0,0594228	3,173215	0,882417	71,8386	918,080	12,50200	37,45 ± 0,07	97,82	2,76
4,2 %	0,0486136	1,122317	0,715623	58,0092	741,938	12,50608	37,47 ± 0,07	97,78	2,22
4,6 %	0,0469685	0,801092	0,583787	48,4559	622,251	12,51269	37,49 ± 0,08	97,44	1,86
5,0 %	0,0799338	1,396130	0,826137	66,5849	860,433	12,51520	37,49 ± 0,09	96,85	2,55
5,5 %	0,0917958	5,122492	0,828504	67,4533	876,515	12,53816	37,56 ± 0,10	96,48	2,59
6,0 %	0,0683804	2,655573	0,561671	45,9246	598,625	12,53329	37,55 ± 0,11	96,15	1,76
6,5 %	0,0583675	5,107788	0,367650	28,9673	382,737	12,54388	37,58 ± 0,15	94,93	1,11
7,0 %	0,1227462	6,421232	0,800579	64,0170	843,252	12,52907	37,53 ± 0,14	95,11	2,46
7,5 %	0,0254973	0,126708	0,145396	11,9584	158,846	12,55786	37,62 ± 0,20	94,54	0,46
8,0 %	0,0244002	0,075044	0,121204	10,2704	136,645	12,49610	37,44 ± 0,22	93,92	0,39
8,5 %	0,0096860	0,065309	0,077326	6,3431	83,110	12,58309	37,69 ± 0,26	96,04	0,24
9,0 %	0,0206587	0,040018	0,071588	4,4249	61,653	12,34441	36,99 ± 0,47	88,60	0,17
9,5 %	0,0025279	0,019832	0,056875	3,9274	50,247	12,57478	37,67 ± 0,38	98,29	0,15
10,0 %	0,0041579	0,048181	0,047965	3,9320	50,468	12,47591	37,38 ± 0,39	97,20	0,15
10,5 %	0,0017896	0,032051	0,048726	2,9406	37,476	12,53799	37,56 ± 0,50	98,38	0,11
11,0 %	0,0118943	0,101739	0,085775	5,2488	69,048	12,38507	37,11 ± 0,32	94,15	0,20