

Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Geofísica
Posgrado en Ciencias de la Tierra



Estudio de la Paragénesis, Inclusiones Fluidas e Isotopía del Azufre del Skarn de Velardeña, Durango

TESIS

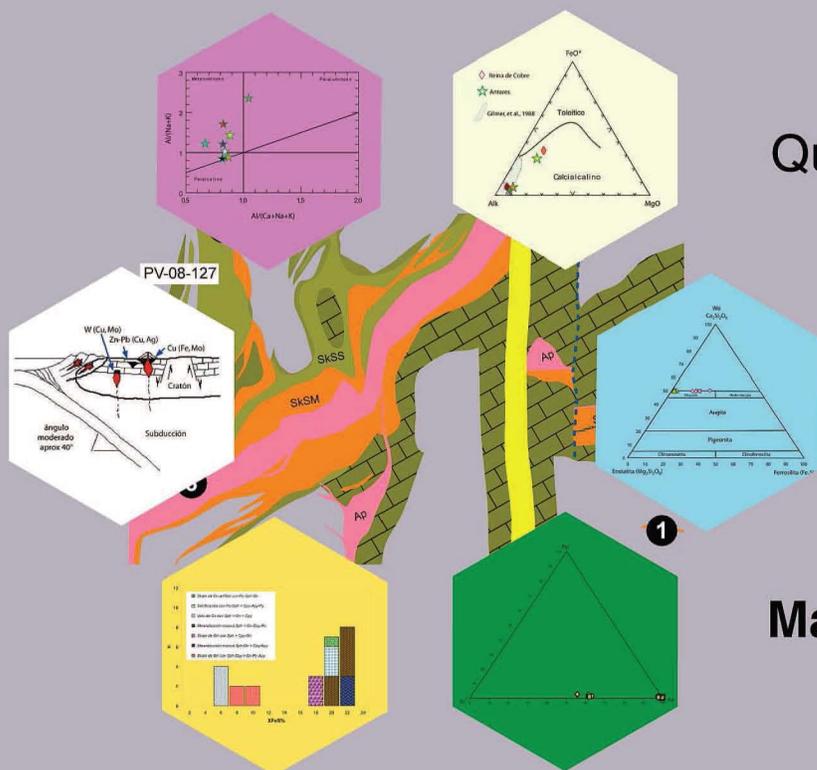
Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias
(yacimientos minerales)

PRESENTA:

Ma. Abigail Jiménez Franco

Director de Tesis: Dr. Carles Canet Miquel

Ciudad Universitaria, 2012





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Geofísica
Posgrado en Ciencias de la Tierra



*Estudio de la Paragénesis, Inclusiones
Fluidas e Isotopía del Azufre del Skarn
de Velardeña, Durango*

TESIS

Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias
(yacimientos minerales)

PRESENTA:

Ma. Abigail Jiménez Franco

Director de Tesis: Dr. Carles Canet Miquel

Ciudad Universitaria, 2012

*A mi padre Ing. David Ignacio Jiménez (+)
el mejor geólogo que he conocido y mi
inspiración.*

AGRADECIMIENTOS

En especial agradezco a mi asesor el Dr. Carles Canet Miquel, pues sin su dirección no habría sido posible la realización de esta tesis, por darme la confianza de colaborar con su grupo de trabajo, pero sobre todo por el apoyo que recibí siempre, por las lecciones y el tiempo invertido durante mis estudios de maestría.

¡Muchas gracias doctor!

A mi comité tutorial Dr. Antoni Campubri por sus atinadas observaciones y su enseñanzas dentro y fuera de las aulas que permitieron enriquecer este trabajo y en especial al Dr. Juan Carlos Mora Chaparro, por su asesoría y disposición durante el desarrollo de mi trabajo de investigación, así como por sus consejos, su entusiasmo, pero sobre todo por su gran apoyo en los momentos mas difíciles.

A mis sinodales: Dra. Pura Alfonso Abella, Dr. Eduardo González Partida, Dra. Teresa Piñi Puig y Dr. Martín Valencia Moreno, por la revisión y corrección del escrito final, por sus observaciones que enriquecieron de manera substancial cada apartado, por seguir de cerca el desarrollo del mismo, y en particular por el apoyo para la realización de los análisis de los estudios de geoquímica isotópica del azufre, inclusiones fluidas y difracción de rayos X, en los laboratorios de la *Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa-UPC* de España, en el Centro de Geociencias de Juriquilla y en el Instituto de Geología de la UNAM, respectivamente.

A la empresa EXPLORACIONES MINERAS PEÑOLES S.A. de C.V. (PEÑOLES), así como a los ingenieros: Javier García Fons, Santiago Olavide Tello y Edgar Escalante; por las facilidades otorgadas para el desarrollo en especial durante las visitas a campo y el acceso a la información del proyecto de Velardeña.

A cada uno de mis profesores, así como al personal administrativo del posgrado: Araceli Chaman, Graciela Solache y Laura Mendoza por su buena disposición y apoyo.

A todas las personas que me acompañaron durante mi paso por el posgrado: al Ing. Jesús Castro Mora, por su asesoría y los momentos compartidos, a Miguel, Alejandro, Gina, Manolo, Ivan, Monserrat, Azul y Valerie por su compañía desde que los conocí, porque forman parte de mi familia, por estar ahí cuando era necesario, su paciencia y los excelente momentos que siempre compartimos, por las interminables charlas y sobre todo por su cariño.

A Silvia Lovera y Delia Rodríguez Montiel por su ayuda para la presentación final de la tesis, así como a Alondra Gil, por todos los momentos compartidos y a todos los chicos de PRIFEN.

A mi familia: a mis hermanos Alma y Elias, los amo y estoy muy orgullosa de ustedes, a mi mamá que es una guerrera incansable, de quien admiro su valentía y de quien aprendí a siempre tratar de ser mejor, eres el mayor ejemplo de mi vida.

A mi alma Mater la Universidad Nacional Autónoma de México, que me formó como profesionista e inculco principios éticos y morales para conducirme en mi desarrollo profesional.

Índice del contenido

Página

Resumen	1
Abstract	3
<i>Introducción</i>	3
1. Geología del yacimiento	8
<i>1.1 Generalidades</i>	8
<i>1.2 Contexto geológico</i>	8
2. Metodología	14
3. Mineralogía y texturas	22
<i>3.1 Petrografía</i>	22
<i>3.2 Análisis de química mineral por microsonda electrónica</i>	29
<i>3.3 Difracción de rayos X y análisis SWIR</i>	35
<i>3.4 Secuencia Paragenética</i>	37
4. Geoquímica de los cuerpos intrusivos	46
<i>4.1 Fluorescencia de rayos X</i>	46
5. Inclusiones fluidas	52
<i>5.1 Petrografía de inclusiones fluidas y paragénesis</i>	52
<i>5.2 Microtermometría</i>	56
6. Geoquímica isotópica del azufre	66
<i>6.1 Geotermometría</i>	67
Discusión e interpretación de resultados	68
Skarns de Velardeña: evolución y modelo de depósito	74
Conclusiones y recomendaciones	76
Bibliografía	78

Resumen

El distrito minero de Velardeña se localiza en la porción noreste del estado de Durango a 95 km de Torreón, muy próximo a la ciudad de Cuencamé. Velardeña ha sido explotado desde el siglo XVI por su alto contenido de Pb-Zn-Ag. El yacimiento de Velardeña, al igual que la mayoría de los skarns de Pb-Zn-Ag en el norte de México, se encuentra en el borde de un elemento emergido según la paleogeografía del Mesozoico. El valor económico de este yacimiento persiste hasta el día de hoy, ya que actualmente se encuentran realizando trabajos de exploración con miras a la extracción de zinc principalmente.

Velardeña geológicamente se ubica en una cuenca Mesozoica en la intersección de tres provincias fisiográficas: (a) La Sierra Madre Oriental (subprovincia de las Sierras Transversas), (b) la Sierra Madre Occidental (subprovincia de las Sierras Altas), y (c) la Mesa Central. La secuencia calcárea sedimentaria que hospeda la mineralización corresponde al Cretácico Inferior y Cretácico Superior. La mineralización está espacial y temporalmente asociada con intrusiones subvolcánicas: pórfidos félsicos y diques. Felder (1979) fechó los diques hipabisales en 33.1 ± 1.8 Ma.

La mineralización metálica está constituida por una asociación principal de arsenopirita, calcopirita, galena, pirita, pirrotita y esfalerita, con mineral accesorio de covelina, goethita, hematita, marcasita y sulfosales menores como boulangerita que se encuentran a nivel local. La mineralización no metálica, que hasta el momento se desconocía, consiste en una asociación de adularia, calcita, cuarzo, epidota (serie epidota-clinozoisita), fluorita, granate (serie andradita-grosularia), piroxeno (diópsido-hedenbergita), siderita, wollastonita, anfíbol (actinolita-tremolita), clorita (serie clinocloro-chamosita), sericita (moscovita), titanita, zeolitas y rutilo.

Por otra parte, macroscópicamente se diferencian las siguientes litologías en las áreas mineralizadas del distrito minero de Velardeña: (a) skarn de granate con mineralización de Zn-Cu-Pb (\pm Py-Po); (b) mineralización masiva o semi-masiva de Zn-Pb-Cu (\pm Py-Po); (c) skarn retrogrado de epidota-clorita; (d) endoskarn; (e) vetas y brechas de calcita (\pm fluorita) con mineralización de Zn-Pb (\pm Py-Apy). Asimismo, las rocas encajonantes son: (a) pórfido félsico alterado (silicificación, propilitización, sericitización); (b) mármol; (c) granitoides; (d) jasperoides, y (e) calizas.

En este estudio se ha analizado la composición isotópica del azufre ($\delta^{34}\text{S}$) en cristales de pirita y galena, utilizados como geotermómetro de acuerdo con Ohmoto y Rye (1979), obteniéndose una temperatura de $346 \pm 25^\circ$ C. Por otra parte, la presencia de pirrotita indica condiciones reductoras, por lo que los valores fuera de rango que se han encontrado en este yacimiento (en esfalerita, $\delta^{34}\text{S} \geq -4\%$) podrían reflejar una incorporación de azufre de origen sedimentario, lixiviado de las series infrayacentes.

La evolución temporal de los fluidos mineralizantes en el skarn de Velardeña es análoga a la de los depósitos de skarn en el noreste de México relacionados con magmatismo calco-alcalino. La evolución de los fluidos mineralizantes puede ser descrita como: (a) skarn progradante: fluidos del tipo líquido+vapor (L+V) producidos durante una fase temprana representada por los granates y piroxenos cálcicos; (b) inicio del skarn retrogradante: representado por la formación de cristales de clinozoisita, epidota, calcita y cuarzo, generalmente reemplazando y/o sobrepuesto a las fases progradantes; y (c) precipitación de los metales en el skarn retrogradante y formación de vetas: fluidos saturados de tipo multicomponente, L+V+S(NaCl).

Abstract

Velardeña mining district is located in northeast of Durango state 95 km from Torreon, near to Cuencame. Velardeña has been exploited since the sixteenth Century for its high Pb-Zn-Ag content. Velardeña, as the most Pb-Zn-Ag skarns in the north of Mexico, is located on the edge of an emerged element as the Mesozoic paleogeography. The economic value of this deposit persists today, and actually, some mining companies are currently conducting exploration works to explore zinc.

Geologically, Velardeña is located in a Mesozoic basin at the intersection of three physiographic provinces: (a) The *Sierra Madre Oriental*, (b) *Sierras Transversas* sub-provinces and (c) The *Meseta Central*. Calcareous sedimentary sequence hosting the ore and this sequence corresponds to lower Cretaceous and Upper Cretaceous age. The mineralization is spatial and temporally associated with sub volcanic intrusions: felsic porphyry and dikes. Felder (1979) dated hypabyssal dikes at 33.1 ± 1.8 m.y. old.

Major sulfide minerals include arsenopyrite, chalcopyrite, galena, pyrite, pyrrhotite and sphalerite with accessory mineral as covellite, gothite, hematite, marcasite and minor sulfosalts as boulangerite. The silica mineralization assemblages are adularie, calcite, quartz, epidote (epidote-clinzoisite series), fluorite, garnet (andradite-grossular series), pyroxene (diopside-hedembergite), siderite, wollastonite, amphibole (actinolite-tremolite), biotite, chlorite (clinocllore-chamosite series), sericite (muscovite), titanite, zeolites, and rutile, which until now were unknown.

Moreover, main macroscopically lithologies in Velardeña are: (a) garnet skarn mineralization Cu-Zn-Pb (\pm Py-Po); (b) massive or semi-massive mineralization Zn-Pb-Cu-(\pm Py-Po); (c) retrograde skarn epidote-chlorite; (d) endoskarn and (e) calcite veins and breccias (\pm fluorite) with Zn-Pb (\pm Py-Apy). The host Rocks are: (a) altered felsic porphyry (silicification, propylitization, sericitization); (b) marble; (c) granitoid; (d) jasperoid and (e) limestones.

In this study, 21 pure fractions of sulfide minerals (pyrite and galena) were used as geothermometer according with Giesemann *et al.*, (1974), obtaining a temperature of 346 ± 25 °C. Moreover, the presence of pyrrhotite indicates reducing conditions, so values in sphalerite $\delta^{34}\text{S} \geq -4$ ‰ may reflect incorporation of sulfur leaching derived of overlying series.

The evolution of mineralizing fluids in Velardeña skarn is similar to other skarn deposits in the northeastern of Mexico related to calc-alkaline magmatism. Evolution of mineralizing fluids can be described as: (a) prograde skarn: liquid + vapor type (L+V) produced during an early phase represented by calcic garnet and piroxene; (b) initial retrograde skarn represented by clinzoisite, epidote, calcite and quartz crystals, generally replacing and/or overlying the prograding phases and (c) precipitation of metals in the retrograde skarn and vein formation: saturated fluids multicomponent type L+V+S (NaCl).

Introducción

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del
Skarn de Velardeña, Durango

Introducción

El presente estudio se llevó a cabo dentro del marco del convenio de colaboración entre la empresa EXPLORACIONES MINERAS PEÑOLES S.A. de C.V. (PEÑOLES) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con el propósito fundamental de esclarecer cuestiones metalogenéticas clave para la comprensión del yacimiento de Velardeña, Durango.

El skarn de Velardeña ha sido explorado y explotado en diferentes épocas por su alta ley en metales base, principalmente de zinc y plomo, con valores subordinados de cobre, oro y plata.

Objetivos Generales

A la fecha no se habían esclarecido algunas características fundamentales de dicho yacimiento, propósito principal de este estudio, el cual se centra en establecer el modelo específico de depósito (dentro de la tipología general de los skarns), incluyendo: (a) la relación con el magmatismo, (b) las características de los fluidos mineralizantes, y (c) las fuente(s) del azufre y de otros componentes de la mineralización.

El conocimiento de dichas cuestiones referentes a la metalogenia del yacimiento servirá también para establecer criterios geológicamente fundamentados para la exploración del distrito minero de Velardeña, principalmente en zonas que aun se encuentran en etapas de exploración; además, estos criterios se podrían extrapolar a otras mineralizaciones tipo skarn en el norte de México.

Objetivos Específicos

De acuerdo con lo anterior expuesto los objetivos concretos de este trabajo consistieron en:

1. Caracterizar mineralógica y geoquímicamente los cuerpos mineralizados, con énfasis en el estudio de los minerales económicos y de las paragénesis de calcosilicatos.

2. Caracterizar los fluidos responsables de la mineralización mediante el análisis de inclusiones fluidas, y determinación de sus posibles orígenes.

3. Caracterizar el origen del azufre mediante el análisis de isótopos estables de dicho elemento en sulfuros.

4. Determinar de las condiciones bajo las cuales se produjo el depósito de los calcosilicatos y los metales asociados.

5. Caracterizar los distintos eventos de magmatismo ligados a la mineralización metálica.

El presente trabajo pretende aportar datos relevantes sobre la composición mineralógica, y características microtermométricas y geoquímicas del depósito.

Antecedentes

Velardeña es bien conocido como un depósito tipo skarn de Zn-Pb; sin embargo, las características distintivas tales como: mineralogía, origen del azufre, temperatura de los fluidos hidrotermales asociados a la mineralización, así como las diferentes etapas de evolución del mismo no habían sido estrictamente estudiadas, salvo las observaciones de Spurr y Garrey (1908),

Trabajos Previos

Los trabajos previos en Velardeña son pocos; el primer informe detallado sobre el área, titulado *The Ore Deposits of the Velardeña District*, fue realizado por Spurr y Garrey (1908) quienes cartografiaron la zona y denominaron a los diques riolíticos como "alaskitas".

Introducción

El presente estudio se llevó a cabo dentro del marco del convenio de colaboración entre la empresa EXPLORACIONES MINERAS PEÑOLES S.A. de C.V. (PEÑOLES) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con el propósito fundamental de esclarecer cuestiones metalogenéticas clave para la comprensión del yacimiento de Velardeña, Durango.

El skarn de Velardeña ha sido explorado y explotado en diferentes épocas por su alta ley en metales base, principalmente de zinc y plomo, con valores subordinados de cobre, oro y plata.

Objetivos Generales

A la fecha no se habían esclarecido algunas características fundamentales de dicho yacimiento, propósito principal de este estudio, el cual se centra en establecer el modelo específico de depósito (dentro de la tipología general de los skarns), incluyendo: (a) la relación con el magmatismo, (b) las características de los fluidos mineralizantes, y (c) las fuente(s) del azufre y de otros componentes de la mineralización.

El conocimiento de dichas cuestiones referentes a la metalogenia del yacimiento servirá también para establecer criterios geológicamente fundamentados para la exploración del distrito minero de Velardeña, principalmente en zonas que aun se encuentran en etapas de exploración; además, estos criterios se podrían extrapolar a otras mineralizaciones tipo skarn en el norte de México.

Objetivos Específicos

De acuerdo con lo anterior expuesto los objetivos concretos de este trabajo consistieron en:

1. Caracterizar mineralógica y geoquímicamente los cuerpos mineralizados, con énfasis en el estudio de los minerales económicos y de las paragénesis de calcosilicatos.

2. Caracterizar los fluidos responsables de la mineralización mediante el análisis de inclusiones fluidas, y determinación de sus posibles orígenes.

3. Caracterizar el origen del azufre mediante el análisis de isótopos estables de dicho elemento en sulfuros.

4. Determinar de las condiciones bajo las cuales se produjo el depósito de los calcosilicatos y los metales asociados.

5. Caracterizar los distintos eventos de magmatismo ligados a la mineralización metálica.

El presente trabajo pretende aportar datos relevantes sobre la composición mineralógica, y características microtermométricas y geoquímicas del depósito.

Antecedentes

Velardeña es bien conocido como un depósito tipo skarn de Zn-Pb; sin embargo, las características distintivas tales como: mineralogía, origen del azufre, temperatura de los fluidos hidrotermales asociados a la mineralización, así como las diferentes etapas de evolución del mismo no habían sido estrictamente estudiadas, salvo las observaciones de Spurr y Garrey (1908), Levich (1973), Ambriz (1979) y Gilmer (1986, 1987a, 1987b y 1988), las cuales en general han sido preferencialmente enfocadas a la zona de la sierra de Santa María. Así como por las diferentes empresas mineras, que en su momento, aportaron información geológica del yacimiento principalmente con fines de explotación del mismo.

Trabajos Previos

Los trabajos previos en Velardeña son pocos; el primer informe detallado sobre el área, titulado *The Ore Deposits of the Velardeña District*, fue realizado por Spurr y Garrey (1908) quienes cartografiaron la zona y denominaron a los diques riolíticos como “alaskitas”.

Posteriormente se publicaron los trabajos de McElroy y Clemens (1966) y De la Vega (1968), orientados a determinar la estratigrafía local. Luego, en la Universidad de Texas en Austin, se realizó una tesis de maestría por Levich (1973). Dicha tesis era un estudio descriptivo de la estructura y mineralogía de la Sierra de Santa María. Por otra parte, Felder (1979), Ambriz (1979) y Gilmer *et al.* (1988) publicaron

información geológico-minera, reportando leyes metálicas de 4 % de Zn, 3 % de Pb y 120 g/Ton de Ag, más valores variables de Cu y Au. Los estudios publicados más recientemente en la zona fueron hechos por Gilmer y colaboradores durante la década de los 80 (1986, 1987 y 1988).

Existen otros trabajos inéditos, en formato de informe, como el que se llevó a cabo a solicitud de la empresa Grupo Minera México, por González Partida en el año de 1994.

Actualmente, el yacimiento de Velardeña es concesión de la empresa EXPLORACIONES MINERAS PEÑOLES S.A. de C.V., la cual se encuentra realizando trabajos de exploración con la intención de iniciar la extracción de zinc en el año de 2012.

Capítulo 1

Geología del yacimiento

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del
Skarn de Velardeña, Durango

1. Geología del yacimiento

1.1 Generalidades

Esta investigación se basa en el estudio de dos zonas diferentes del distrito minero de Velardeña, las cuales fueron seleccionadas en función de su representatividad, información geológica disponible, e interés económico y científico:

(1) **Mineralización Antares:** Situada en el área propiamente dicha de Velardeña, en el flanco oriental del domo Santa María, en el sector oeste del distrito.

(2) **Mineralización Reyna de Cobre:** Situada en la vertiente oriental de la Sierra de San Lorenzo, en el sector este del área de estudio.

La zona minera de Velardeña se localiza en la porción noreste del estado de Durango a 95 km de Torreón, muy próxima a la ciudad de Cuencamé (Figura 1.1). Se encuentra comunicada por importantes carreteras: el tramo de la carretera libre No. 40 Durango-Matamoros hasta Pedriceña-Velardeña, y la

autopista que conecta a las ciudades de Durango y Gómez Palacio (Figura 1.2).

Los cuerpos mineralizados estudiados en este trabajo se encuentran distribuidos en las sierras de Santa María y de San Lorenzo; dichas sierras están separadas por un graben dispuesto en dirección NW-SE, parcialmente rellenado por andesitas, depósitos piroclásticos y conglomerados. En la Sierra de Santa María se encuentran las minas de Santa María, Las Azules, Molotitos y Antares. Por otro lado, la Sierra de San Lorenzo alberga las minas de Guardarraya y de Reyna de Cobre (Figura 1.5).

1.2 Contexto Geológico

El yacimiento de Velardeña se ubica en la intersección de tres provincias fisiográficas (Raisz, 1964): (a) La Sierra Madre Oriental, (sub-provincia de las Sierras Transversas), (b) la Sierra Madre Occidental (sub-provincia de las Sierras Altas), y (c) la Mesa Central.

La Sierra Madre Oriental está conformada en su mayoría por rocas



Figura 1.1. Localización del distrito minero Velardeña en el Estado de Durango.

sedimentarias mesozoicas plegadas, asimismo, la Sierra Madre Occidental se conforma por una potente secuencia de rocas riolíticas e ignimbritas del Terciario. Por último, la región norte de la Mesa Central, en la parte en que colinda con la zona de estudio aparece un cordón de cerca de 130 km de ancho en promedio, con elevaciones que rebasan en numerosos lugares los 2 800 msnm y a partir del cual, hacia el occidente, las elevaciones son menores a 2000 msnm y decrecen paulatinamente (Nieto-Samaniego, *et al.*, 2005).

Regionalmente, el basamento se encuentra representado por la Fm. Nazas, para la cual Barboza-Gudiño *et al.* (2004) menciona una edad Triásico Medio–Superior y la describieron como una serie de rocas metavolcánicas que comprende rocas piroclásticas y flujos de lava de composición intermedia a félsica, con menor proporción de rocas máficas “diques andesítico-basálticos a dacíticos”. Esta unidad se encuentra discordantemente cubierta por una secuencia sedimentaria que se depositó desde el Jurásico y que continuó hasta el final del Cretácico Superior, conformada por una serie de rocas carbonatadas y terrígenas que probablemente se depositaron mediante sistemas turbidíticos.

Sobreyaciendo discordantemente a las rocas mesozoicas y rellenando fosas y valles, afloran conglomerados continentales que varían de gravas poco consolidadas a conglomerados cementados por arcilla, limo y carbonatos compuestos de fragmentos de las rocas mesozoicas. Intrusionando a las rocas sedimentarias mesozoicas y parte de la secuencia paleógena anteriormente descritas, se encuentran cuerpos hipabisales cuya composición varía de granito a diorita (SGM, 2000, Figuras 1.3 y 1.4).

Localmente, la secuencia estratigráfica se inicia con las formaciones sedimentarias Aurora, Cuesta del Cura, Indidura y el Conglomerado Ahuichila; estas unidades son sobreyacidas por coladas de andesita e



Figura 1.2. Vías de acceso a la zona de estudio.

intruídas por un enjambre de diques porfídicos generalmente de composición granítica, a los cuales se encuentra espacial y genéticamente relacionada la mineralización metálica.

La Fm. Aurora (y/o su equivalente, la Fm. Tamaulipas Superior) constituye los flancos calcáreos de los anticlinales de las sierras de Santa María y de San Lorenzo. La Fm. Aurora presenta un cambio de facies hacia la sierra de Santa María, donde se vuelve más arcillosa. Esta formación inicialmente fue descrita por Burrows (1910), como una caliza casi pura, en capas gruesas, con nódulos de óxidos de hierro y de pedernal (chert), y con abundante contenido fósil (. Humphrey y Díaz (1956) la describen como una caliza de estratificación delgada a masiva, de color gris a ocre, con cantidades variables de pedernal en forma de nódulos irregulares y concreciones. Presenta escasas intercalaciones de una lutita calcárea gris. Los nódulos de pedernal son de color gris a negro e intemperizan a ocre oscuro. PEMEX (1988) considera que estas calizas son petrográficamente de tipo wackestone–packestone y grainstone, en estratos masivos, con macrofauna de

rudistas (caprínidos y toucasias) y microfauna de miliólidos, así como con fragmentos de algas, entre otros. Por su contenido paleontológico y las relaciones estratigráficas antes señaladas, se le asigna una edad de Albiano Inferior a Superior. Esta unidad fue descrita en la porción media de la Cuenca de Chihuahua; sin embargo, el término ha sido extendido hacia el Sector Transverso de la Sierra Madre Oriental (PEMEX, 1988).

Cubriendo concordantemente a la Fm. Aurora y aflorando ampliamente en la zona de estudio, se encuentra la Fm. Cuesta del Cura, que consiste en calizas delgadas ondulantes con horizontes de pedernal negro (lidita). Esta unidad se extiende en casi todas las sierras desde Torreón hasta Monterrey, con espesores de no más de 300 m. Presenta una coloración en afloramiento de gris oscuro a negro, y contiene, además del pedernal negro, amonitas y microfauna que le confieren una edad del Albiano”Cenomaniano (Imlay, 1936; Levich, 1973). La Fm. Cuesta del Cura es correlacionable con las siguientes formaciones: (a) Caliza Sierra Madre, en Tabasco y el Istmo de Tehuantepec, (b) Fm. Tamaulipas Superior y Caliza el Abra, en la Cuenca de Tampico–Misantla, y su parte inferior con (c) Fm. Kiamichi del Grupo Washita (indiferenciado en el noreste de México y oriente de Texas).

Siguiendo con la secuencia estratigráfica, cubriendo a la Fm. Cuesta del Cura, se encuentra la Fm. Indidura (Kelly, 1936), que dentro de la región estudiada tiene un espesor aproximado de 80 m (SGM, 1997); la cual está compuesta por areniscas de grano fino, de gris oscuro a pardo (intemperizando a blanco y amarillo claro), y casi no presenta microfósiles. En la parte sur del sinclinorio de La Peña (no lejos de área de Velardeña), se diferencian dos miembros: Inferior y Superior. El Miembro Inferior aflora en la parte sur del cañón “Sin Nombre”, y está constituido por lutitas calcáreas lajeadas y

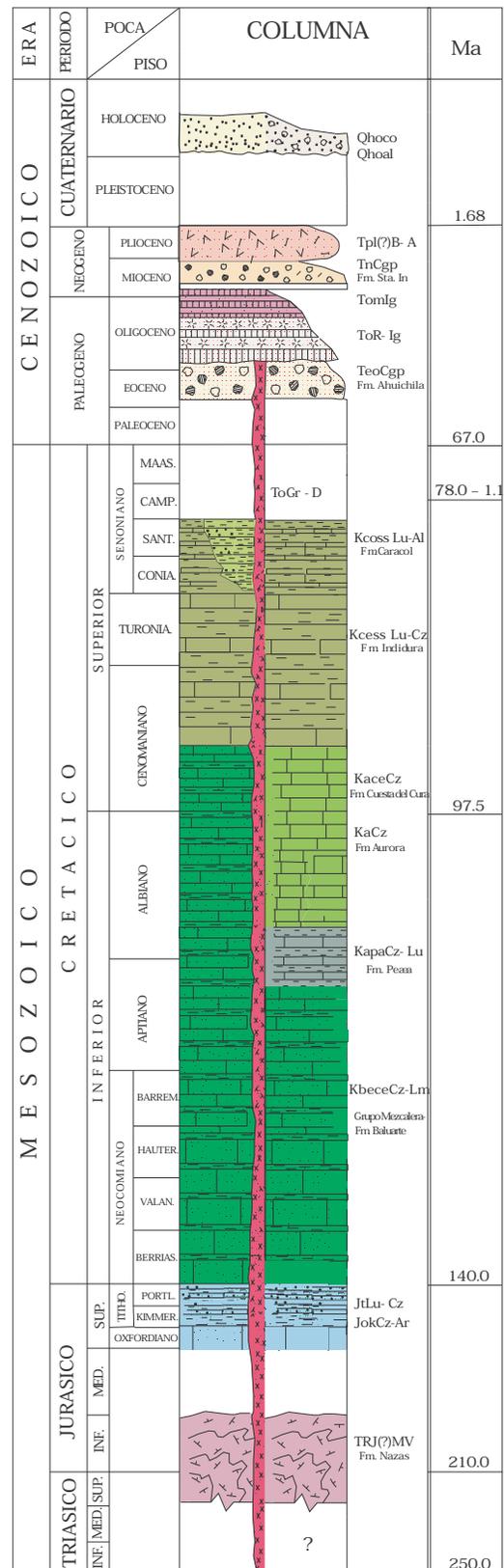


Figura 1.3. Columna geológica regional (modificada de SGM, 2000).

calizas nodulares de color gris (que intemperizan a amarillo); en esta unidad no se han identificado fósiles. El Miembro Superior se observa sobre el flanco norte del cañón antes mencionado, y está constituido por lutitas laminares de color oscuro (que intemperizan a café rojizo). Imlay (1936) y otros autores (Tristán-González y Torres Hernández, 1994) reportan contenido de fósiles (bivalvo *Inoceramus labiatus*), en este miembro.

Los cambios transicionales en el régimen sedimentario se reflejan en el cambio de la Fm. Indidura a la Fm. Caracol (Imlay, 1936), la cual está compuesta por una alternancia de estratos delgados de areniscas y limolitas de coloración verde a pardo. Discordantemente por encima de la secuencia sedimentaria descrita hasta el momento, yace la Fm. Ahuichila (Rogers, *et al.*, 1961), que consiste en un conglomerado bien cementado formado por clastos de caliza, lutita y arenisca, con intercalaciones de piroclastos. Con respecto a su granulometría, los clastos varían de arenas a cantos, y están contenidos en una matriz calcárea. Este depósito ocupó fosas tectónicas continentales y es de tipo (tectofacies) molasa post-orogénico; su edad es Paleoceno a Eoceno (Fries *et al.*, 1955). La actividad magmática se inició en el Eoceno con la emisión de andesitas y piroclastos, los cuales afloran y rellenan el graven del valle de Velardeña. Estas rocas fueron fechadas en 45 Ma por el método de K-Ar (Gilmer *et al.*, 1988). Sus afloramientos son escasos, ya que están en buena parte cubiertos por depósitos de aluvión. Se ha

determinado un espesor total de 500 m para la secuencia volcánica. El vulcanismo se asocia a un cortejo de diques y pequeños stocks y sills de composición riolítica y textura porfídica, los cuales presentan textura fluidal marcando la dirección preferencial de emplazamiento.

Los depósitos recientes (cuaternarios) tienen gran extensión y se presentan principalmente en los valles y en zonas de pie de monte.

El domo Santa María (Figura 1.5), es una estructura elipsoidal su eje mayor se encuentra orientado en dirección NW-SE, el cual es paralelo a los ejes de los anticlinales y sinclinales de la zona, sus dimensiones aproximadas son de 7 por 5 km, se encuentra aproximadamente a 5 km de la Sierra de San Lorenzo; las fallas normales paralelas en el flanco noreste de la Sierra de Santa María, así como las fallas en el flanco suroeste de la Sierra de San Lorenzo delimitan el valle que separa a las dos áreas (McElroy y Clemons, 1966).

La mineralización del distrito está relacionada con las intrusiones subvolcánicas. Felder (1979) fechó los diques hipabisales en 33.1 ± 1.8 Ma., por el método de K-Ar. Geoquímicamente el magmatismo es de afinidad calcialcalina, con algunos términos más diferenciados que tienden a leucogranitos peraluminosos, lo que concordaría con la denominación de "alaskitas" que les dieron Spurr y Garrey (1908).

Puede apreciarse en la Figura 1.6 la distribución espacial de las unidades anteriormente descritas, que se encuentran expuestas en el área de estudio.

Figura 1.4. (a la izquierda) Mapa geológico regional del área de estudio, en el recuadro con línea color blanco se destaca la zona de estudio (modificado de SGM, 2000).



Figura 1.5. Fotografía aérea del domo de Santa María (imagen proporcionada gentilmente por EXPLORACIONES MINERAS PEÑOLES S.A. de C.V).

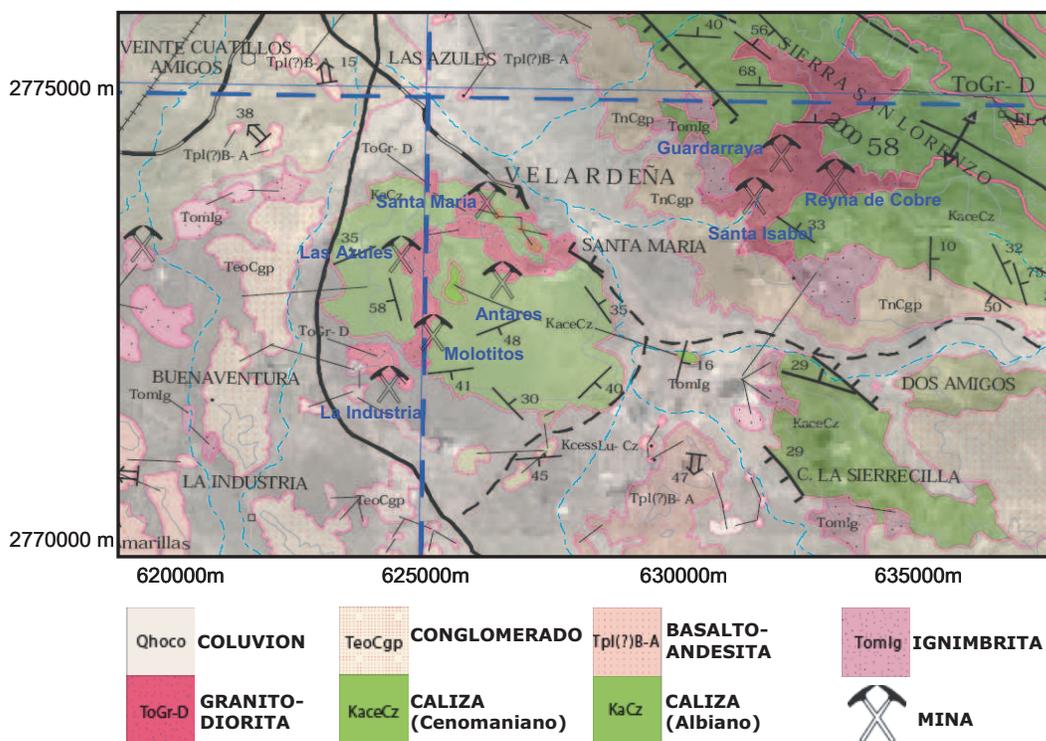


Figura 1.6. Mapa de unidades litológicas expuestas en el área de estudio (modificado de De Santiago, *et al.*, 2000).

Capítulo 2

Metodología

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del
Skarn de Velardeña, Durango

2. Metodología

EL desarrollo del presente estudio se ha llevado a cabo mediante diversas técnicas analíticas, con el fin de establecer las etapas de mineralización y su cronología relativa (secuencia paragenética), y determinar los controles magmáticos y estructurales de la mineralización. La metodología fue desarrollada de acuerdo al siguiente esquema:

- a) Muestreo (y descripción macroscópica)
- b) Estudio petrográfico
- c) Microscopia electrónica de barrido (SEM), con análisis por espectroscopia de energías dispersivas de rayos X (EDS)
- d) Identificación de fases minerales por difracción de rayos X (DRX)
- e) Caracterización de la química mineral de las fases más relevantes de la mineralización por medio de microsonda electrónica (EPMA)
- f) Caracterización geoquímica elemental (elementos mayores, elementos menores y algunos traza seleccionados) en roca total mediante fluorescencia de rayos X (FRX)
- g) Estudio microtermométrico de inclusiones fluidas
- h) Análisis de la composición isotópica del azufre en sulfuros

A continuación se hace una descripción detallada de cada una de las técnicas mencionadas.

a) Muestreo y descripción macroscópica de muestras

El muestreo se llevó a cabo en dos etapas. En la primera etapa se recolectaron un total de 247 muestras, de las cuales 187 correspondieron a núcleos de barrenos, 13 a afloramientos de superficie y 47 a muestras del interior de la mina. Posteriormente, se realizó una selección de muestras, la cual se basó en el criterio de que fueran representativas de los dos cuerpos mineralizados estudiados (Antares y Reyna de Cobre) y de sus

respectivas rocas encajonantes. Algunas muestras concretas se recolectaron con el propósito específico de aplicar determinados métodos de análisis planeados a priori. Se procuró que el tamaño de las muestras fuera suficiente como para poder realizar todos los análisis geoquímicos y mineralógicos planteados.

La segunda etapa consistió en un muestreo puntual principalmente en núcleos de barrenación, con fines de obtener muestras frescas de las rocas intrusivas en ambas áreas mineralizadas.

La distribución de los puntos de muestreo en los dos cuerpos mineralizados que han sido objeto del presente estudio se muestra en la Figura 2.1.

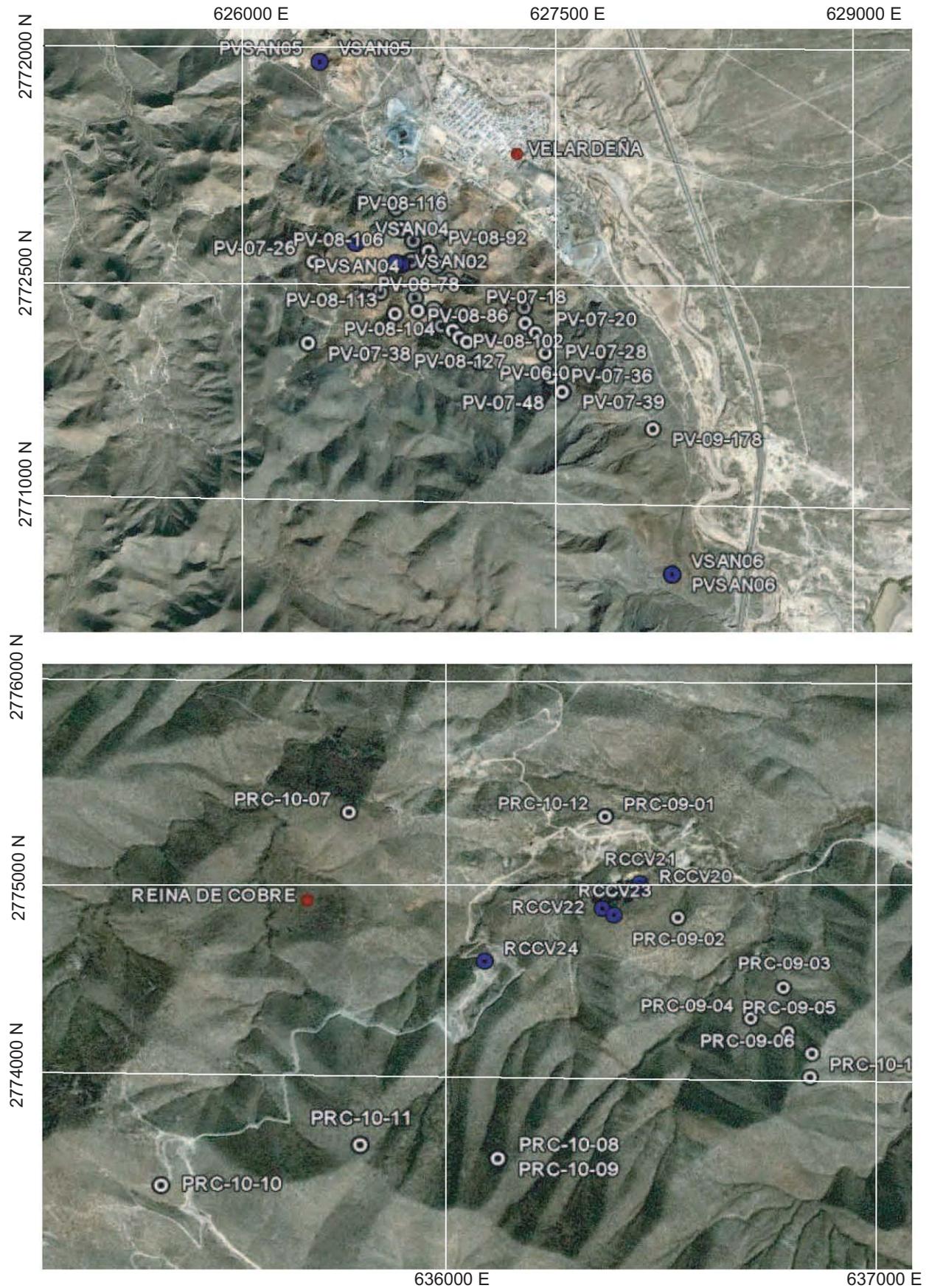
Previamente al análisis de las muestras, se procedió a una descripción macroscópica (Anexo 1) de las muestras de mano. Esta descripción permitió la identificación preliminar de los minerales esenciales de mena y de ganga, así como de las fábricas y texturas, encaminado a realizar una clasificación preliminar de las muestras.

De este modo, la división de las muestras en categorías básicas sirvió para la selección de un conjunto más reducido de muestras representativas. Las muestras seleccionadas fueron 46, a su vez, la descripción macroscópica de las muestras permitió una distribución más selectiva de los análisis mineralógicos, geoquímicos y microtermométricos.

b) Petrografía

El estudio petrográfico se realizó con el propósito de identificar los minerales esenciales y accesorios, así como sus abundancias relativas y sus texturas, tanto de las rocas encajonantes como de las mineralizaciones del distrito minero de Velardeña.

Se eligieron 31 muestras para la elaboración de láminas delgadas pulidas. Las láminas fueron preparadas en el laboratorio



comercial Wagner Petrographic (Utah, EUA). Para poder estudiar paralelamente las láminas por medio de (a) luz transmitida (petrografía, para minerales transparentes o no metálicos), y (b) luz reflejada (minerografía, para minerales opacos o metálicos), todas las láminas fueron realizadas sin recubrimiento y con pulido metalográfico (“pulido espejo”).

Para el estudio petrográfico se utilizó un microscopio Zeiss modelo Axiolab ubicado en el Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica de la UNAM. Las fotomicrografías se tomaron por medio de una cámara digital CMEX DC-1300 acoplada a dicho microscopio. En cada lámina se realizaron detalladas observaciones con luz reflejada y transmitida. Siempre y cuando las texturas lo permitieron, se realizaron conteos rápidos para establecer de manera aproximada el contenido modal de los minerales esenciales. Cuando esto no fue posible, únicamente se realizaron estimaciones visuales.

Además de la identificación y semicuantificación de minerales, se establecieron y describieron detalladamente las texturas, cuya interpretación fue la base para deducir la secuencia paragenética, incluyendo los eventos de mineralización y su cronología relativa, así como la granulometría y la disposición en la roca de las fases minerales.

c) Microscopia electrónica de barrido (SEM), con análisis por espectroscopia de energías dispersivas de rayos X (EDS)

El microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) se basa en la interacción entre un haz de electrones y la

superficie de la muestra. El uso de electrones en lugar de luz visible, gracias a su capacidad de resolución y a que pueden ser enfocados fácilmente mediante lentes electromagnéticas, permite obtener imágenes con aumentos que pueden alcanzar 10,000 o hasta 50,000 veces el tamaño del objeto.

Para el presente estudio, las imágenes microscópicas se han producido a partir de los electrones retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés) que emite la muestra, cuya intensidad depende de un coeficiente que es función del número atómico de los elementos que componen la muestra. Por lo tanto, los minerales que contengan elementos pesados, como los sulfuros, se observarán en dichas imágenes más claros que los minerales que únicamente contengan elementos ligeros, como el cuarzo o la calcita. Es por esta propiedad que estas imágenes se pueden denominar “imágenes composicionales” o SEM-BSE.

Adicionalmente, como consecuencia de la interacción de los electrones con la materia, ésta emite rayos X a modo de un espectro continuo junto con varios picos característicos, los cuales dependen de los elementos presentes en la muestra. Gracias a este fenómeno, es posible obtener análisis químicos cualitativos, puntuales o de área, mediante el uso de la espectrometría de energía dispersiva de rayos X (EDS, por sus siglas en inglés). Sin embargo, debido a la superposición de los picos característicos, la resolución analítica del método es baja, por lo que normalmente su uso se limita a la obtención de análisis cualitativos. Así, para alcanzar una cuantificación fiable de la química mineral, se recurrió al uso de la

Figura 2.1. (izquierda). Figura 2.1a. Distribución de los puntos de muestreo (barrenos: puntos blancos; muestras de superficie: puntos azules) en el área mineralizada de Reyna de Cobre (imagen superior). Figura 2.1b. Distribución de los puntos de muestreo (barrenos: puntos blancos; muestras de superficie: puntos azules) en el área mineralizada de Antares (imagen inferior).

microsonda electrónica. Teniendo en cuenta las características de la técnica combinada SEM-EDS, ésta es sumamente útil como complemento de la petrografía. De este modo, se pueden identificar, con base en su composición elemental básica y, eventualmente en su morfología, aquellos minerales cuyas características ópticas no son determinativas o cuyo tamaño de grano es demasiado pequeño para una caracterización por medio del microscopio petrográfico.

Para ello, se han utilizado dos equipos. En primer lugar, un microscopio Hitachi TM-1000 “tabletop” (modelo “de escritorio”), ubicado en el Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica (UNAM), con el cual se obtuvieron la mayoría de las imágenes SEM-BSE y de los análisis EDS. Adicionalmente, algunas láminas delgadas fueron seleccionadas para su análisis mediante un equipo Jeol JXA-8900R localizado en el Laboratorio Universitario de Petrología (LUP) del Instituto de Geofísica (UNAM). Este mismo equipo, que consta de analizadores de longitud de onda dispersiva de rayos X (WDS, por sus siglas en inglés), fue utilizado a posteriori para obtener microanálisis de microsonda electrónica de minerales seleccionados.

d) Identificación de fases minerales por difracción de rayos X (DRX)

Los análisis de difracción de rayos X (DRX), en polvo, se realizaron con el objeto de complementar la determinación de las asociaciones minerales, al permitir la identificación de fases minerales que, por ser criptocristalinas o por no presentar características diagnósticas, no pudieron ser identificadas ópticamente. Este método regularmente detecta minerales con abundancias mayores al 3 % en peso.

En función de los problemas de identificación surgidos durante el estudio

petrográfico (y por SEM-EDS), se seleccionaron 27 muestras para su análisis por DRX. Cuando el tamaño de grano lo permitió, se procuró separar mecánicamente el mineral a identificar del resto de la roca. La cantidad de muestra separada para análisis osciló, aproximadamente, entre 0.5 y 1 g. Las muestras fueron molidas en un mortero de ágata hasta obtenerse un polvo impalpable. Los análisis de DRX se efectuaron mediante un difractómetro Shimadzu XRD-6000, equipado con un monocromador y con un tubo con ánodo de cobre como fuente de rayos X. Se utilizó la radiación CuK α 1,2, con una longitud de onda de (λ) 0.15405 nm, dirigida a través de un colimador hacia una muestra orientada al azar. Las muestras se analizaron sobre portamuestras de aluminio (fracción no orientada) en el intervalo angular $2(\theta)$ de 4° a 70°, a una velocidad angular de 2°/minuto, el límite de detección bajo estas condiciones es de 1%, sin embargo, este límite puede ser menor dependiendo del grado de cristalinidad de la fase estudiando y de la velocidad angular a la cual se realice el estudio. El equipo de análisis se localiza en el Instituto de Geología de la UNAM.

El procedimiento usado en estos análisis para la búsqueda e identificación de fases se basa en el “Método de Hanawalt”, y se ha aplicado mediante el software Traces y manualmente, mediante la consulta de la versión impresa de los catálogos.

e) Caracterización de la química mineral por medio de microsonda electrónica

La microsonda electrónica (EPMA, por sus siglas en inglés), como se señaló anteriormente, es una técnica analítica emparentada con el SEM. En la EPMA la radiación X emitida por la muestra es analizada mediante varios espectrómetros de rayos X por dispersión de \ddot{e} (WDS, por sus siglas en inglés). Éstos descomponen la radiación X mediante su difracción por un cristal de parámetros

cristalinos determinados, de acuerdo con la ley de Bragg.

La técnica de la EPMA permite analizar los elementos desde el boro (Z=5) hasta el plutonio (Z=94), con un límite de detección de aproximadamente 0.01 % en peso.

Las muestras deben tener un pulido a espejo, por lo que usualmente se analizan láminas delgadas pulidas o secciones pulidas. Para cada elemento a analizar es necesario el uso de estándares de composición conocida. Para la selección de los estándares se toma en cuenta el mineral a analizar y el rango de concentración esperado para cada elemento. El equipo que se ha utilizado para el presente estudio es un Jeol JXA-8900R, localizado en el Laboratorio Universitario de Petrología del Instituto de Geofísica (UNAM). Los puntos de análisis se marcaron con tinta directamente sobre la muestra, en función de las observaciones realizadas con anterioridad mediante los microscopios petrográfico y electrónico.

Seguidamente, las muestras marcadas fueron recubiertas con una película conductora de carbono. La calidad de los análisis se puede inferir del total analítico (% en peso), de manera que, en general, un análisis será considerado aceptable cuando dicho valor esté entre 98.5 y 101.5 %.

A partir de los resultados en % en peso (tal y como los arroja la computadora de la EPMA) se han realizado cálculos estequiométricos para obtener las fórmulas estructurales de los minerales y, consiguientemente, los contenidos molares o en átomos por fórmula unidad (apfu). En el caso de los minerales hidratados, también se debe calcular el contenido de grupos OH y/o de agua de constitución o de coordinación. Además, para el caso de los granates, se ha recalculado, con base en un balance de cargas, la distribución del hierro total en Fe^{2+} y Fe^{3+} , lo que permite ajustar adecuadamente las fórmulas. Por ello, después de los cálculos, muchos de los valores totales ajustan mejor al 100 %.

f) Caracterización geoquímica elemental (elementos mayores, y menores y traza seleccionados) en roca total mediante fluorescencia de rayos X (FRX)

Para el análisis químico de elementos mayores en roca total, en muestras seleccionadas de rocas ígneas del distrito minero de Velardeña, se ha utilizado la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX). Es una técnica que puede usarse para cuantificar los constituyentes elementales de muestras sólidas y líquidas.

La composición elemental en roca total permite clasificar a las rocas ígneas y determinar su afinidad geoquímica, lo que ayuda a inferir el contexto geotectónico en el que se formaron. Además, es una guía del grado y los procesos de alteración de las rocas, y complementariamente con la DRX y la petrografía, puede ser interpretada en clave de composición mineral.

Se seleccionaron 6 muestras representativas de los diferentes tipos de rocas ígneas tanto de la zona de Antares como la de Reyna de Cobre, a las que se asocia el yacimiento mineral, tanto de rocas hipabisales (pórfidos) como plutónicas (graníticas).

Para garantizar la representatividad de los análisis, se procesaron muestras de 0.5 a 1 kg. La preparación de éstas inició con su lavado, seguida de una molienda y cuarteado. Las muestras se prepararon con polvo en base seca, se comprimieron hasta formar una pastilla y fueron analizadas con un espectrómetro de masas secuencial de FRX marca Siemens SRS 3000, en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) del Instituto de Geología de la UNAM. El procedimiento de preparación de muestras y los materiales usados como referencia para construir las diferentes curvas de calibración son explicados en detalle por Lozano y Bernal (2005).

g) *Estudio microtermométrico de inclusiones fluidas*

El procedimiento de preparación de la muestra dependerá de la dureza de la roca o mineral que se desea estudiar. Independientemente, hay que considerar que las inclusiones fluidas (IF) son frágiles, por lo cual las muestras deben ser tratadas cuidadosamente. Las técnicas de preparación deben de estar diseñadas para evitar el calentamiento y la deformación mecánica de la muestra. El tipo de preparación más utilizado para estudios microtermométricos de IF es la sección delgada doblemente pulida, con un grueso algo superior a lo habitual (>200 micras).

Antes de proceder al análisis microtermométrico de las IF y después de haber realizado un estudio petrográfico convencional de asociaciones minerales, es necesario llevar a cabo un estudio petrográfico para establecer las asociaciones de IF. Esta petrografía tiene por objetivo la definición y ordenación relativa de eventos, aunque a una escala menor que la petrografía convencional.

La petrografía de IF, al basarse en texturas y morfologías intracristalinas busca determinar la presencia y las relaciones espaciales de asociaciones o grupos discretos genética, temporal y estadísticamente significativos de IF con los minerales que las contienen. Para cualquier caso de estudio, la asociación de IF constituye la unidad básica del análisis petrográfico y microtermométrico.

Para el análisis microtermométrico de IF se llevan a cabo tres tipos fundamentales de mediciones: (a) T_E , temperatura eutéctica del sistema, (b) T_F , temperatura de fusión del hielo dentro de la IF, y (c) T_H , temperatura de homogeneización de fases en la IF. La T_H brinda información sobre la temperatura de formación del cristal huésped, y las temperaturas de fusión (T_E y T_F) sobre la composición y salinidad de los posibles fluidos presentes.

Generalmente, en IF acuosas se pueden determinar estos parámetros bajo observación microscópica. El análisis se realizó con la ayuda de un microscopio petrográfico de luz transmitida, a 1,000 aumentos, al que se le ha adicionado una platina térmica que permite el calentamiento de los especímenes hasta +650° C, y un sistema de enfriamiento a base de nitrógeno líquido que baja la temperatura hasta -192° C. El método se basa en provocar la solidificación (congelación) de las fases fluidas mediante la disminución progresiva de la temperatura. La metodología a seguir varía según realicemos los análisis en muestras de minerales con o sin exfoliación.

La T_E representa el comienzo de la fusión del sistema, y está determinada las especies disueltas predominantes en la solución. Por otro lado, la T_F se determina como la temperatura a la cual desaparece el último cristal de hielo en una IF previamente congelada. Esta última temperatura depende de la concentración de sales disueltas en la fase acuosa (en fluidos subsaturados). La salinidad se calcula a partir de la T_F asumiendo que el fluido solo contiene agua y NaCl, y por convención se expresa en % en peso equivalente de dicha sal (% NaCl eq.).

El análisis a alta temperatura consiste en calentar la muestra hasta homogeneizar las diferentes fases presentes en una IF. El proceso de calentamiento se efectúa exactamente sobre las mismas inclusiones que previamente se analizaron a baja temperatura.

Los procesos de enfriamiento y calentamiento de las muestras se deben realizar a una velocidad lenta (1° C por minuto), a fin de permitir el equilibrio de las fases y detectar ópticamente los fenómenos de fusión y homogeneización. Debido a que el rango de temperaturas de observación es muy amplio, usualmente de -200° a +650° C, el trabajo de medición microtermométrica de IF consume mucho tiempo

Los datos de T_F y T_H obtenidos deben de corregirse usando una curva de calibración para el equipo, construida con estándares de

puntos de fusión conocidos, con la finalidad de tener una base de referencia para el manejo de los resultados. Cabe mencionar que la platina LINKAM realiza directamente una autocorrección.

h) Composición isotópica del azufre en sulfuros

El principio que permite hacer uso de esta técnica es el del fraccionamiento de masas, fenómeno por el cual los distintos isótopos estables de un elemento se pueden separar unos de otros por una serie de procesos físico-químicos, térmicos o biogeoquímicos. Midiendo las relaciones de abundancia de estos isótopos en las fases coexistentes podemos reconstruir la historia geoquímica del sistema.

En el presente trabajo se ha llevado a cabo un estudio de los isótopos de azufre en distintos sulfuros presentes en las menas (pirita, calcopirita, esfalerita y galena), con el fin de: (a) obtener información acerca de la fuente del azufre y, por tanto, de los procesos mineralizantes, así como (b) realizar estimaciones de la temperatura de formación del depósito.

Los análisis isotópicos de azufre se han efectuado en los *Serveis Científico-Tècnics* de la *Universitat de Barcelona*, España. Para ello, se han obtenido un total de 21 separados minerales puros de diferentes sulfuros presentes en la mineralización metálica (pirita, 5 muestras; calcopirita, 4 muestras; esfalerita, 7 muestras; galena, 5 muestras). La separación se ha realizado con la ayuda de tamices y pinzas, y la pureza de las muestras se ha verificado bajo el microscopio binocular. Los análisis se realizaron mediante un espectrómetro Delta C Finnigan MAT de flujo con un analizador elemental acoplado, TC-EA, de acuerdo al método de Giesemann *et al.* (1974). En este espectrómetro las muestras a analizar deben tener un contenido de azufre elemental de entre 20 y 100 microgramos. Para ello, se preparan muestras con un peso desde 0.15-0.20 mg, en el caso de pirita, y hasta 0.40-0.60 mg, en el caso de la galena, las cuales se colocaron en cápsulas de estaño que se aplastan formando una pequeña esfera que se introduce en el espectrómetro.

Los resultados se expresan como valores de $\delta^{34}\text{S}$, mediante la notación en partes por mil (‰) de la desviación respecto al estándar Troilita del Cañón del Diablo (CDT). La precisión analítica está dentro del ± 0.1 ‰ a 1 ó.

Capítulo 3

Mineralogía y texturas

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del
Skarn de Velardeña, Durango

3. Mineralogía y texturas

El estudio de las fases minerales se ha realizado con el propósito de identificar los minerales esenciales y accesorios, así como sus abundancias relativas y sus texturas características, tanto de las rocas encajonantes como de las mineralizaciones del distrito minero de Velardeña. El estudio petrográfico, complementado con el análisis de SEM, así como por el análisis de EPMA y DRX, de algunas muestras seleccionadas ha permitido establecer la secuencia paragenética del depósito mineral, y determinar con precisión los tipos de roca que lo constituyen y/o encajonan.

3.1 Petrografía

La descripción petrográfica-minerográfica de las 31 láminas delgadas-pulidas de este estudio se presenta en el Anexo 2. Macroscópicamente se diferencian las siguientes litologías en las áreas mineralizadas del distrito minero de Velardeña:

Mineralización:

- Skarn de granate con mineralización de Zn-Cu-Pb (\pm Py-Po)
- Mineralización masiva o semi-masiva de Zn-Pb-Cu (\pm Py-Po)
- Skarn retrogrado de epidota-clorita
- Endoskarn
- etas y brechas de calcita (\pm fluorita) con mineralización de Zn-Pb (\pm Py-Apy)

Roca encajonante:

- Pórfido félsico alterado (silicificación, propilitización, sericitización, producto del skarn)
- Mármol
- Granitoides
- Jasperoides
- Calizas

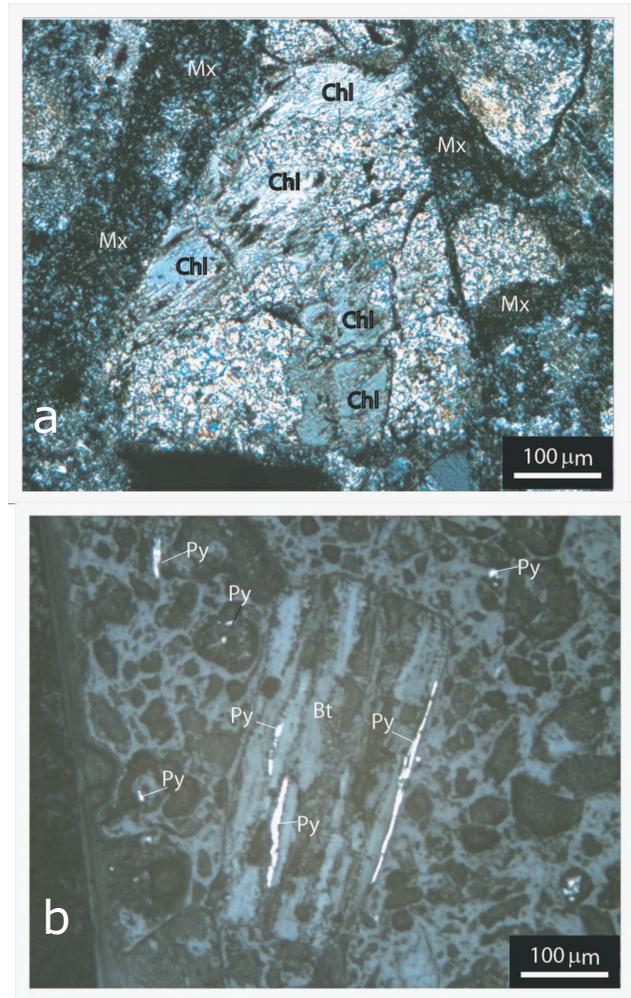


Figura 3.1. Fotomicrografías del pórfido alterado (muestra V-178-H, Antares). En la Figura 3.1a se observa un fenocristal reemplazado por clorita, en matriz criptocristalina; Chl = clorita, Mx= matriz; luz transmitida con analizador,. En 3.1b, se observan cristales de pirita alojados en planos de clivaje de un fenocristal de biotita; Py= pirita, Bt= biotita; luz reflejada.

En general, los contactos entre las litologías establecidas en el yacimiento son abruptos, las texturas muestran evidencias de reemplazamiento y de una mineralización compleja en múltiples etapas (principalmente: progradante y retrogradante; cf. Einaudi *et al.*, 1981). A continuación se presenta un resumen

con las características petrográficas generales de las principales litologías identificadas en el yacimiento:

3.1.a. Pórfidos félsicos

En el área de estudio, abundan los cuerpos de composición granítica con una textura general porfídica (Figura 3.1). Están constituidos por fenocristales subedrales, de hasta 4 mm de diámetro, de cuarzo y feldespato potásico, en menor proporción, de plagioclasa, incluidos en una matriz criptocristalina de similar composición pero preferentemente afectada por alteraciones de tipo sericítica.

La mineralización metálica es escasa y se encuentra diseminada, ocasionalmente reemplazando fenocristales, y consiste en pirita, marcasita, calcopirita y esfalerita. Algunos diques presentan una silicificación muy penetrativa, lo que les confiere un aspecto blanco y una textura microcristalina (Figura 3.2).

De acuerdo con Williams *et. al* (1982), las texturas porfídicas pueden originarse por razones diversas: cuando a profundidad el magma comienza a cristalizar lentamente, donde se desarrollan grandes cristales (fenocristales) y antes de que alcance la completa solidificación puede ser inyectado en rocas de menor temperatura, o bien ascender hacia la superficie (rocas extrusivas), donde el líquido residual cristaliza para conformar la matriz de grano fino; sin embargo, algunas pueden ser el resultado de la cristalización continua bajo presión uniforme; los primeros cristales se desarrollan lentamente hasta que se alcanza una etapa crítica de superenfriamiento, por lo que el líquido residual enfría rápidamente.

Los granitos porfídicos solo difieren en la abundancia del grano y la textura, en general tienen fenocristales de feldespato alcalino y cuarzo en una matriz microgranular.

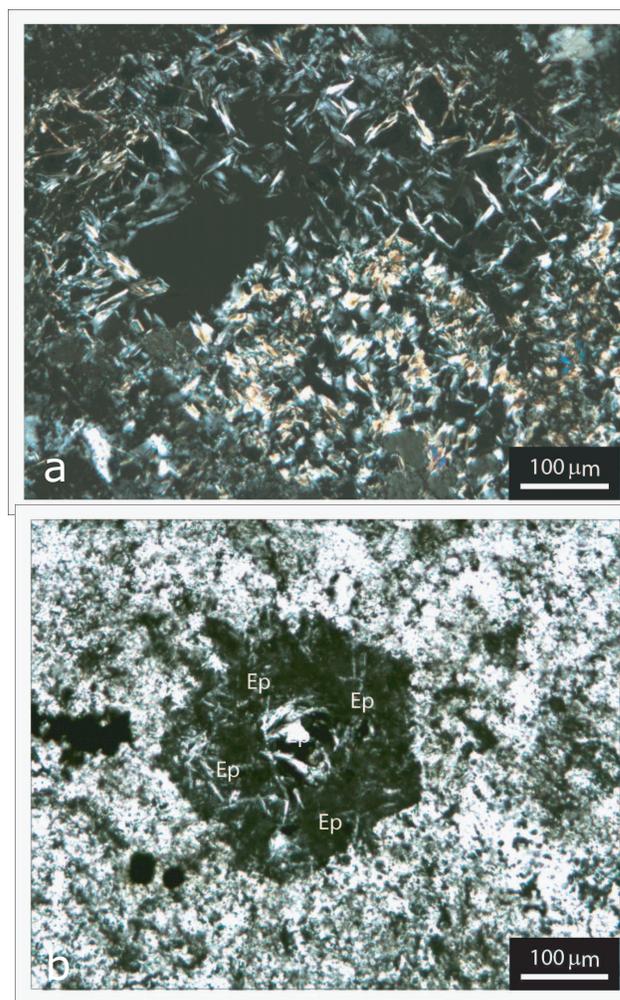


Figura 3.2. Fotomicrografías del dique silicificado (muestra V-97-L, Antares). En la Figura 3.2a se observan cristales prismáticos, alargados, en agregados cristalinos con hábito acicular de epidota, luz transmitida con analizador. En la Figura 3.2b se observan cristales de epidota pseudomorfizando un cristal de granate relicto; Ep=epidota; luz transmitida con analizador.

3.1.b. Granitoides

El término granitoide fue introducido por Le Maitre (1989), para referirse a rocas ígneas faneríticas —de tamaño de grano grueso, en las cuales los cristales son distinguibles a simple vista— presumiblemente formadas a considerable profundidad, y constituidas por cuarzo, feldespatos alcalinos y/o plagioclasas,

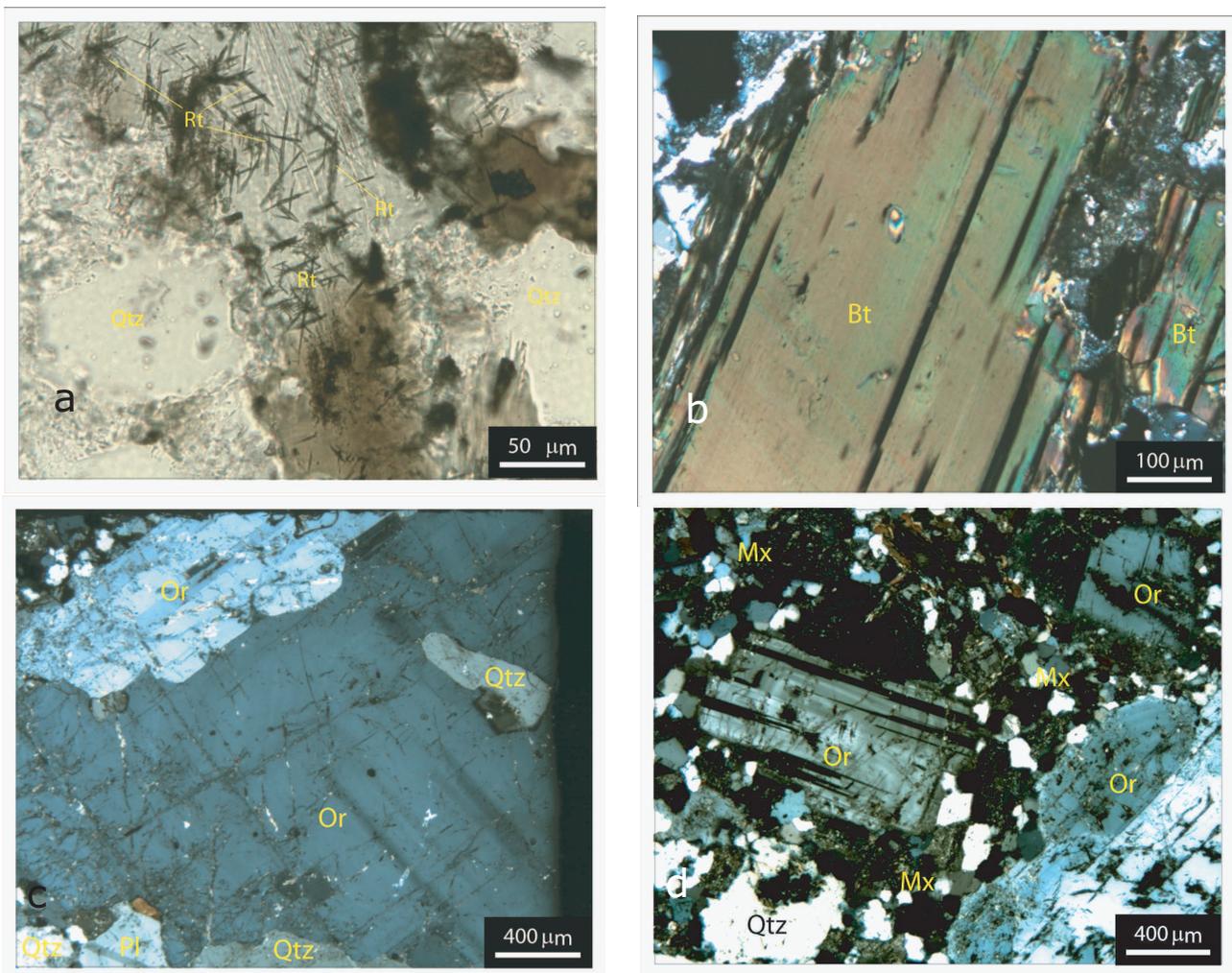


Figura 3.3. Fotomicrografías del Monzogranito (muestra C-12-H, Reyna de Cobre). En la Figura 3.3a se observan agujas de rutilos (?) incluidas en cristales de cuarzo residual; cuarzo=Qtz, rutilo=Rt; luz transmitida con analizador. En la Figura 3.3b se observan fenocristales de biotita con colores de interferencia enmascarados debido a alteración; biotita=Bt; luz transmitida con analizador. En la Figura 3.3c se observan fenocristales de feldespato potásico; ortoclasa=Or, plagiocasa=Pl, cuarzo=Qtz; luz transmitida con analizador. En la Figura 3.3d se muestra la textura holocristalina de la roca; cuarzo=Qtz, ortoclasa=Or, matriz=Mx; luz transmitida con analizador.

con minerales secundarios y accesorios en cantidades variables.

Esta denominación fue propuesta por la *International Union of Geological Sciences* (IUGS) para clasificar conjuntamente a las rocas plutónicas identificadas como granitos (s.s.), granodioritas y tonalitas (Casillas, 1997). Se considerarán como granitoides o rocas graníticas a aquellas rocas plutónicas, con base

en su contenido de cuarzo modal entre el 20% y el 60%, en diagramas QAPF.

Las rocas plutónicas del distrito minero Velardeña, en general corresponden a granitoides, pero solo en algunos casos, en rocas poco alteradas, se pudo precisar su clasificación petrográfica, como monzogranitos con textura de granular a porfídica (Figura 3.3). Están compuestos por cuarzo, plagioclasa, y

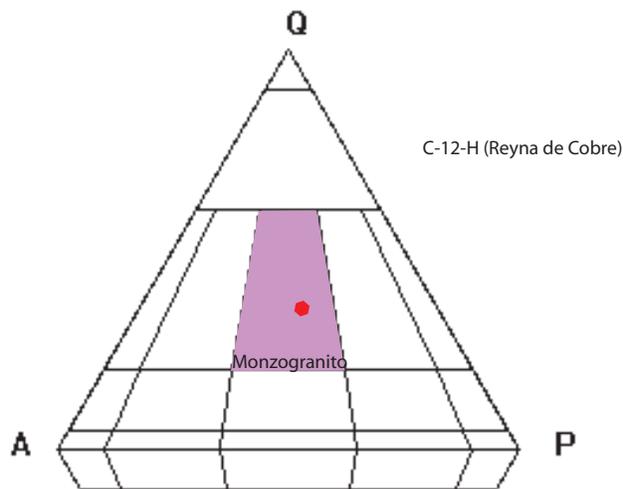


Figura 3.4. Muestra C-12-H, de Reyna de Cobre, corresponde con un monzogranito (diagrama según LeMaitre, 1989).

feldespato potásico en cantidades subordinadas, con biotita como mineral accesorio. Localmente presentan vetillas de cuarzo y calcita, y cierto grado de sericitización que afecta selectivamente a la plagioclasa. Exceptuando las vetillas, carecen de mineralización metálica.

En la Figura 3.4, se muestran las abundancias de las fases minerales para las rocas plutónicas recalculadas para su clasificación en el diagrama de QAP.

3.1.c. Mármol

El mármol es una roca que se forma como consecuencia del metamorfismo de calizas, lo que da lugar a recristalización de la calcita. Este proceso transforma la textura original de las calizas en texturas granoblásticas de tamaño de grano variable.

El mármol en Velardeña es una roca granular microcristalina (de hasta 100 micras de diámetro) compuesta casi en su totalidad por calcita, que puede estar en algunos casos asociada con mineralización metálica (Figura 3.5).

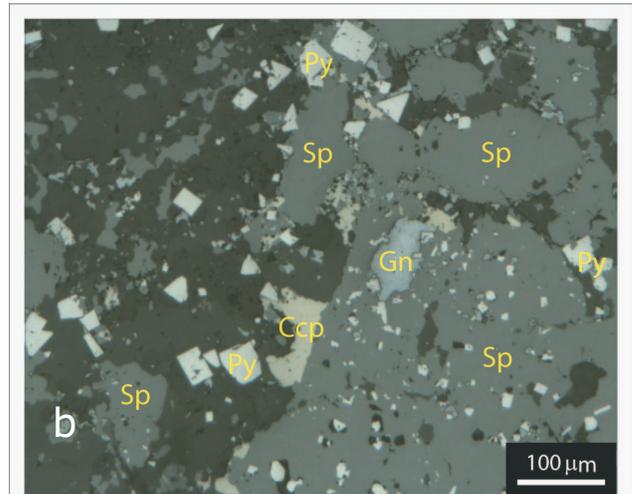
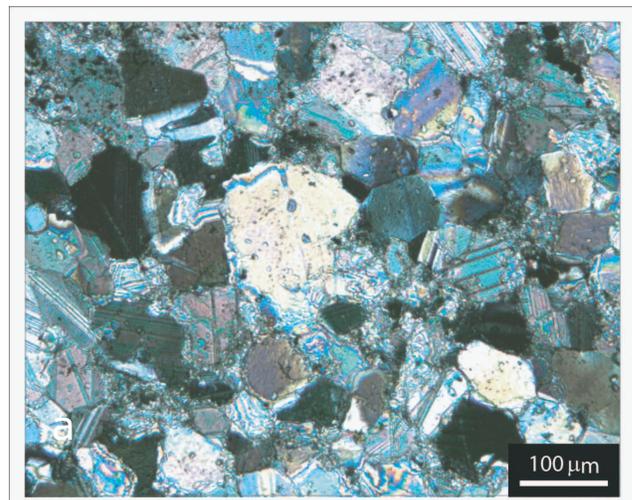


Figura 3.5. Fotomicrografías de veta de calcita, en mármol con mineralización (Zn-Pb), muestra VE-60-V (Antares). En la Figura 3.5a se observa mármol de textura gruesa, luz transmitida con analizador. En la Figura 3.5b se muestran cristales de esfalerita con galena en menor proporción, en fracturas y bordes de grano con cristales diseminados de pirita y calcopirita; esfalerita=Sp, calcopirita=Ccp, pirita=Py, galena=Gn; luz reflejada.

3.1.d. Jasperoides

Spurr (1898) introdujo el término de jasperioides para nombrar a las rocas constituidas esencialmente por sílice criptocristalina, o calcedonia, la cual ha sido formada por el reemplazamiento de calcita o dolomita.

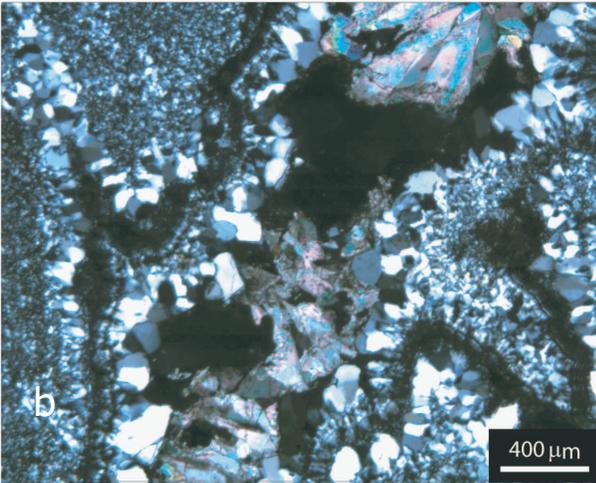
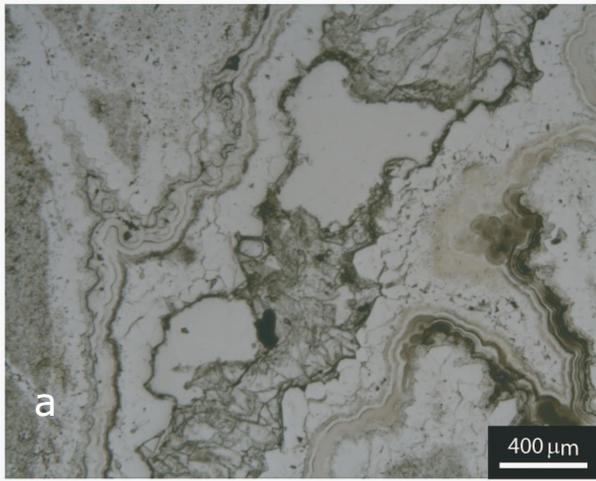


Figura 3.6. Fotomicrografías de Jasperoide sedimentario (muestra V-06-AG, Antares). En la Figura 3.6a se observan cristales micro-criptocristalinos de cuarzo y sílice coloidal, luz reflejada. En la Figura 3.6b se muestran los mismos cristales micro-criptocristalinos de cuarzo, luz transmitida con analizador.

Los jasperoides pueden ser de color blanco o en tonos rojos, grises, ocre o negros, dependiendo de su contenido en hierro y materia orgánica.

En el área de estudio, los jasperoides consisten en cuarzo micro-criptocristalino, con calcita diseminada, y muestran una textura botrioidal y un abundante vetilleo (de cuarzo con mayor tamaño de grano, Figura 3.6).

3.1.e. Endoskarn

Los términos endoskarn y exoskarn fueron propuestos por Perry (1969), para distinguir la parte del skarn desarrollada por reemplazamiento en las rocas ígneas, de la que se desarrolla en el encajonante sedimentario, respectivamente.

El endoskarn en Velardeña es una roca calcosilicatada microcristalina que preserva texturas ígneas relictas (porfídica). Los fenocristales de plagioclasa se hallan pseudomorfizados a epidota, y hay vetillas de wollastonita, calcita, clorita y cuarzo. La mineralización metálica está diseminada y consiste principalmente en pirita, calcopirita, arsenopirita y marcasita, con cantidades subordinadas de galena y esfalerita (Figura 3.7).

3.1.f. Exoskarn

Roca calcosilicatada de tamaño de grano y textura muy variable (inequigranular, de reemplazamiento), compuesta predominantemente por cristales de granate cálcico y, en menor grado, de piroxeno cálcico. En la mayoría de casos, en el área de estudio, se observa una asociación retrógrada de clorita-calcita-cuarzo paragenéticamente asociada a la mineralización metálica. Esta última puede llegar a constituir agregados masivos a semi-masivos, fanerocristalinos, o bien concentrarse en vetillas o formar diseminaciones muy ricas en galena y esfalerita con valores subordinados de pirita, calcopirita, arsenopirita y marcasita (Figura 3.8).

3.1.g. Vetas y brechas

Estructuras rellenas/cementadas por calcita con cantidades subordinadas de cuarzo, fluorita y adularia, que en ocasiones contienen una mineralización metálica que se caracteriza por la esfalerita “acaramelada” (pobre en Fe) y por la abundancia de arsenopirita (Figura 3.9).

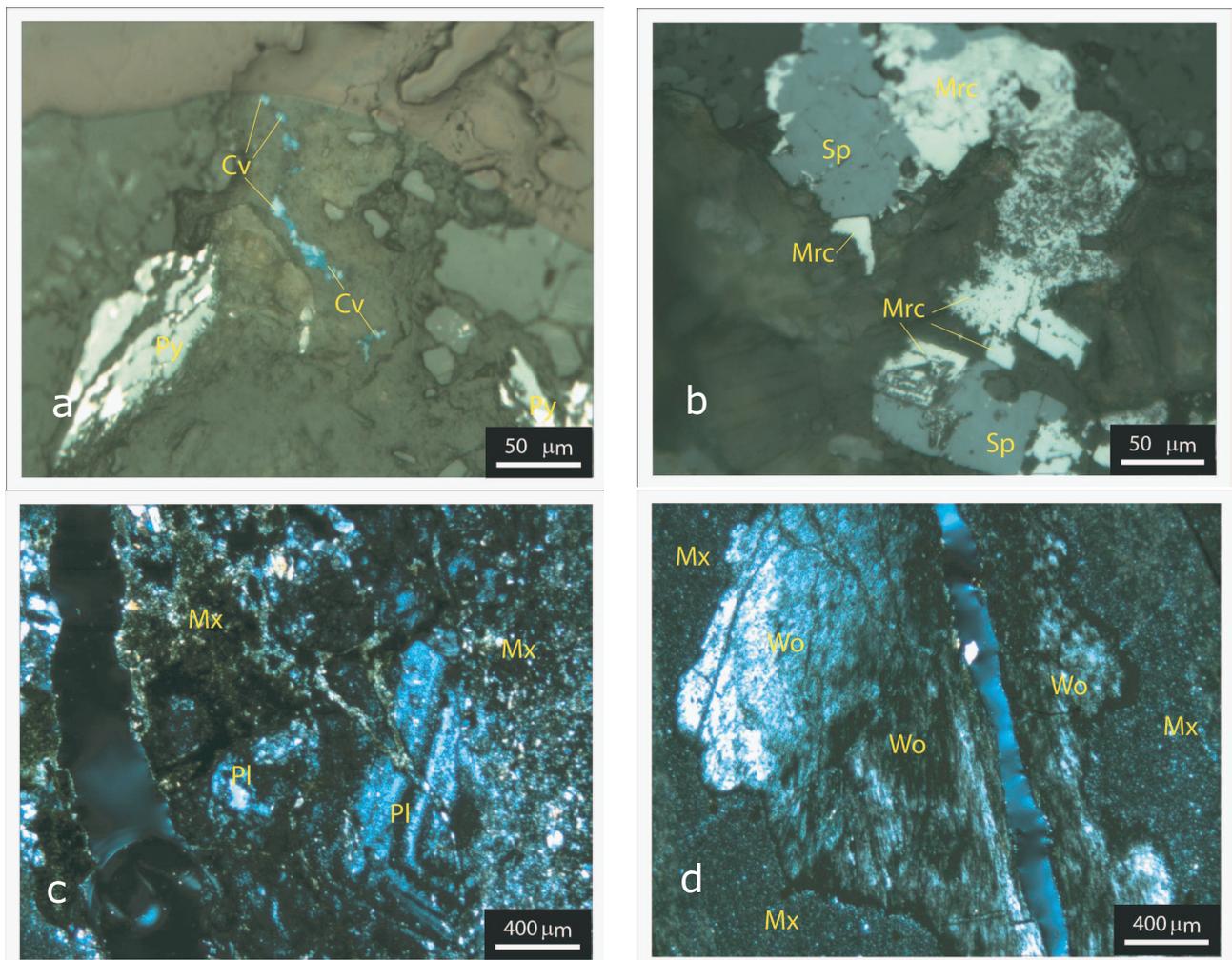
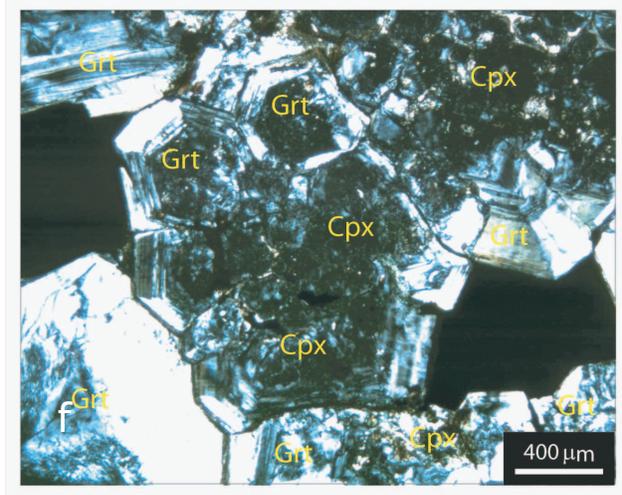
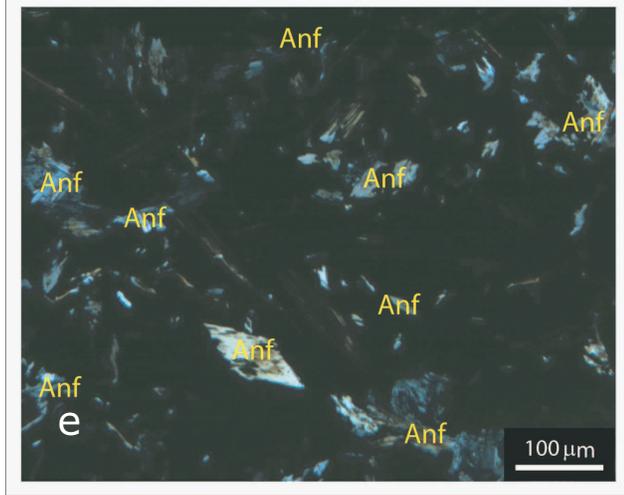
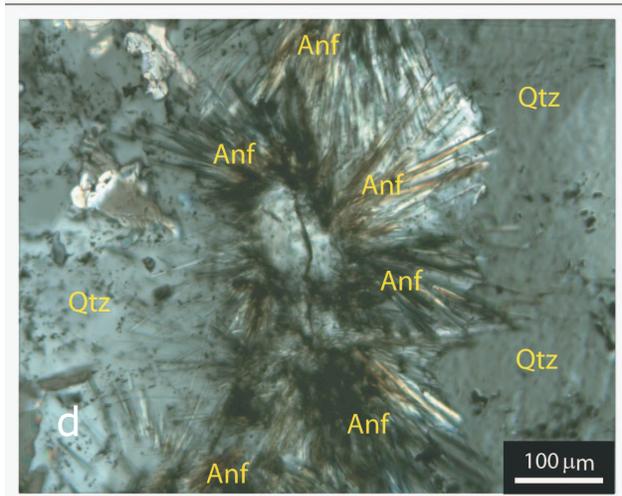
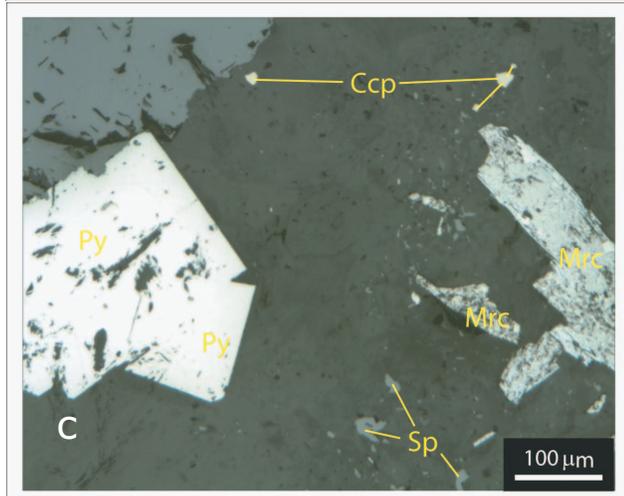
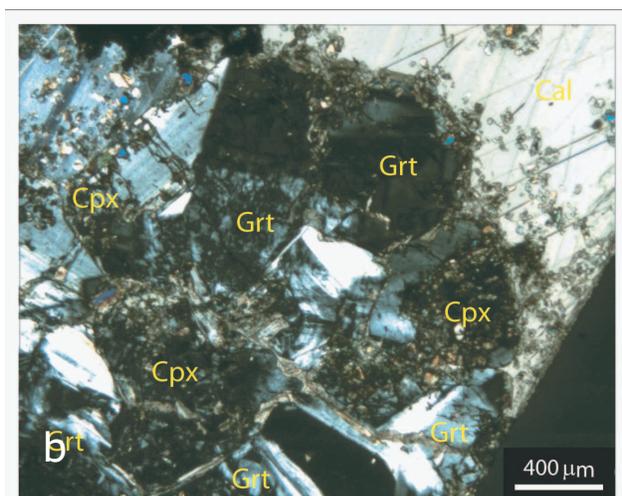
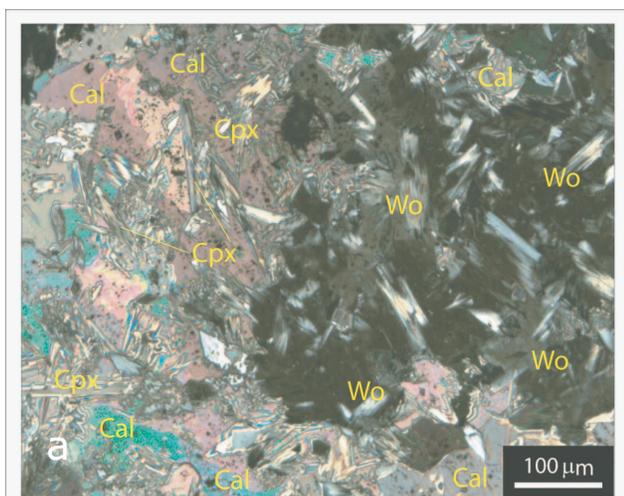


Figura 3.7. Fotomicrografías del endoskarn (muestra C-13-G, Reyna de Cobre). En la Figura 3.7a se observan cristales de covelita en plano de microfractura, con pirita y calcopirita, pseudomorfizando fenocristales relictos; covelita=cv, Py=pirita, matriz=Mx; luz reflejada. En la Figura 3.7b se muestran cristales de esfalerita con calcopirita intercrecida, en paragénesis con cristales de marcasita euedrales-subedrales; esfalerita=Sp, marcasita=Mrc; luz reflejada. En la Figura 3.7c se observan fenocristales de plagioclasa relictas con macla polisintética en matriz criptocristalina alterada, con vetillas rellenas de calcita; plagioclasa=Pl, matriz=Mx; luz transmitida con analizador. En la Figura 3.7d se muestra un fenocristal de wollastonita con hábito fibroso; wollastonita=Wo, matriz=Matriz; luz transmitida con analizador.

Figura 3.8. (derecha) Fotomicrografías del exoskarn (muestra V-26-B, Antares). En la Figura 3.8a se observan cristales de clinopiroxenos y wollastonita sobrecrecidos con calcita; clinopiroxeno=Cpx, calcita=Cal, wollastonita=Wo; luz transmitida con analizador. En la Figura 3.8b se muestran granates sobrecrecidos por piroxeno y asociados a calcita; clinopiroxeno=Cpx, granate=Grt, clinopiroxeno=Cpx; luz transmitida con analizador. En la Figura 3.8c se observan fenocristales de pirita euedral y marcasita diseminados; pirita=Py, calcopirita=Ccp, marcasita=Mrc, esfalerita=Sp; luz reflejada. En la Figura 3.8d se muestran cristales alargados aciculares de tremolita-actinolita; anfíbolita=Anf, cuarzo=Qtz; luz transmitida con analizador. En la Figura 3.8e se observan anfíboles euedrales, prismáticos, incluidos en agregados de esfalerita, asociados a calcita; anfíbolita=Anf; luz transmitida con analizador, por último, en la Figura 3.8f se observan granates euedrales, alterados, zonados, con cristales de piroxenos incluidos en agregados de esfalerita; granate=Grt, clinopiroxeno; luz transmitida con analizador.



Cuando las propiedades ópticas de los cristales no permitían precisar algunas fases minerales, o bien cuando existían dudas respecto a la composición química de los mismos, estos cristales fueron analizados mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM, Figura 3.10)

3.2 Análisis de química mineral por microsonda electrónica

Los resultados de los análisis de química mineral por EMP se presentan en el Anexo 3, expresados en % en peso de óxidos, y en las Tablas 3.1 a 3.9, recalculados a fórmulas estructurales y/o contenidos atómicos o molares. Únicamente se presentan los análisis de calidad, aunque el número total de puntos analizados fue mucho mayor.

3.2.1 Anfíboles

Para la clasificación de anfíboles se han analizado cristales asociados a la mineralización metálica del área mineralizada de Antares. Se trata de cristales monoclinicos de hábito prismático a fibroso, y de hasta 1 mm de longitud, que se hallan generalmente incluidos en esfalerita, individualmente o formando agregados radiales (Figura 3.11).

De acuerdo con Leake, *et. al*, (1997) la clasificación de los anfíboles se basa en el contenido químico de acuerdo con la fórmula estándar $AB_2^{VI}C_5^{IV}T_8O_{22}(OH)_2$, respecto a esta los anfíboles se clasifican principalmente en cuatro grupos:

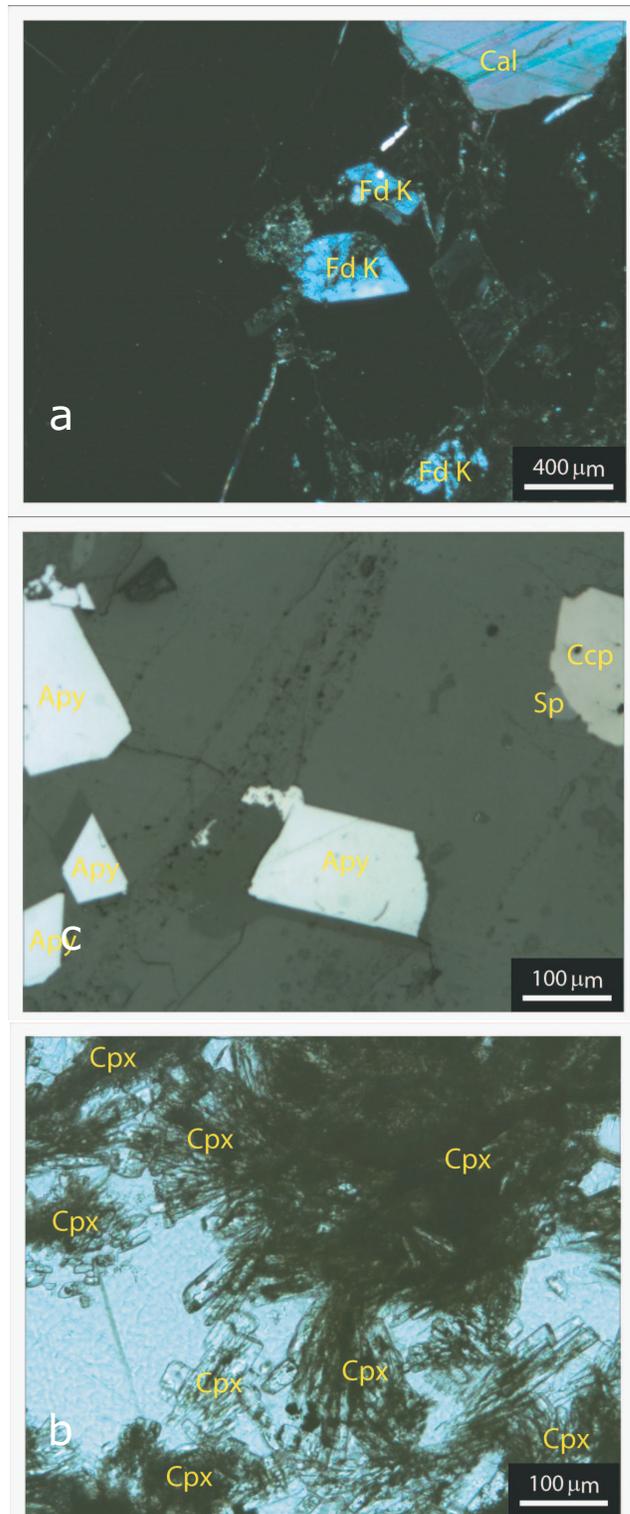


Figura 3.9. Fotomicrografías de veta de fluorita con mineralización (Fe-Zn), muestra VW-158-AB (Antares). En la Figura 3.9a se observan cristales euedrales rómbicos de adularia asociada a calcita; adularia=FdK, calcita=Cal; luz transmitida con analizador. En la Figura 3.9b se muestran cristales prismáticos aciculares de clinopiroxenos; clinopiroxenos=Cpx; luz transmitida sin analizador. En la Figura 3.9c se observan cristales de arsenopirita y calcopirita euedral diseminada en fluorita; arsenopirita=Apy, calcopirita=Ccp, esfalerita=Sp; luz reflejada.

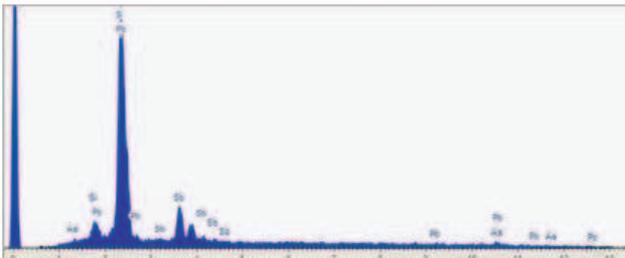


Figura 3.10. Imagen de microscopio electrónico de barrido de un agregado cristalino de boulangerita, con el correspondiente espectro EDS (muestra correspondiente al área mineralizada de La Industria).

(1) *Grupo magnesio-hierro-manganeso-litio*: donde $(Ca + Na)_B$ es $<1,00$ y la suma de los iones de tipo L (Mg, Fe, Mn, Li)_B es e" 1,00.

(2) *Grupo cálcico*: donde $(Ca + Na)_B$ es e" 1,00 y $Na_B < 0,50$. Por lo general, pero no en todos los casos, es $Ca_B > 1,50$.

(3) *Grupo sódico-cálcico*: donde $(Ca + Na)_B$ es e" 1,00 y Na_B está en el rango de 0,50 a 1,50.

(4) *Grupo sódico*: cuando Na_B e" 1,50.

Conforme a lo antes expuesto, los cristales analizados corresponden a anfíboles cálcicos, los cuales, se clasifican como actinolita, por su contenido en Si respecto a la relación Mg/(Mg+Fe²⁺) (Fig. 3.12).

El contenido en Mg en las muestras analizadas va de 0.844 a 0.745 *apfu* (átomos

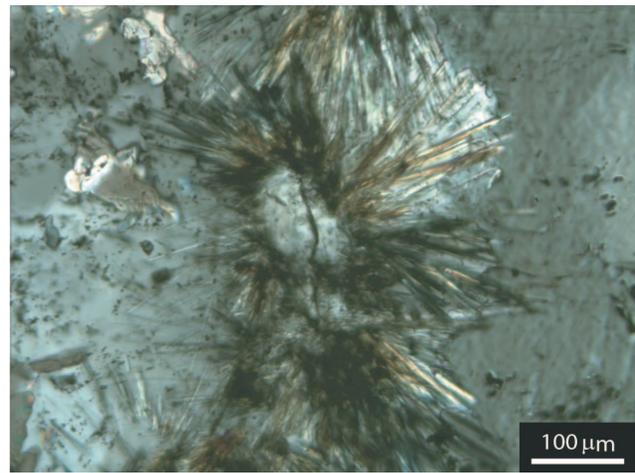


Figura 3.11. Fotomicrografía de cristales aciculares de actinolita del yacimiento de Velardeña. Luz transmitida con analizador.

por unidad de fórmula), mientras que Fe varía entre 4.048 y 4.072 *apfu*.

3.2.2. Clinopiroxenos

Los cristales analizados proceden tanto de Antares como de Reyna de Cobre, y generalmente desarrollan prismas cortos, de hasta 250 µm de longitud. En el caso de las muestras de Reyna de Cobre, estos cristales se hallan incluidos en granate (Figura 3.13).

De acuerdo con Morimoto (1988), los piroxenos para su clasificación química se dividen en cuatro grupos:

- a) piroxenos Ca-Mg-Fe,
- b) piroxenos Na-Ca (Na-Ca),
- c) piroxenos Na (Na),
- d) y otros piroxenos

Los piroxenos de Velardeña se encuentran dentro del campo de los piroxenos compuestos por Ca-Mg-Fe, que en el diagrama En-Fs-Wo se clasifican cristaloquímicamente como diópsido ($Di_{97-53} - Hd_{42-02} Jh_{04-01}$), con contenidos

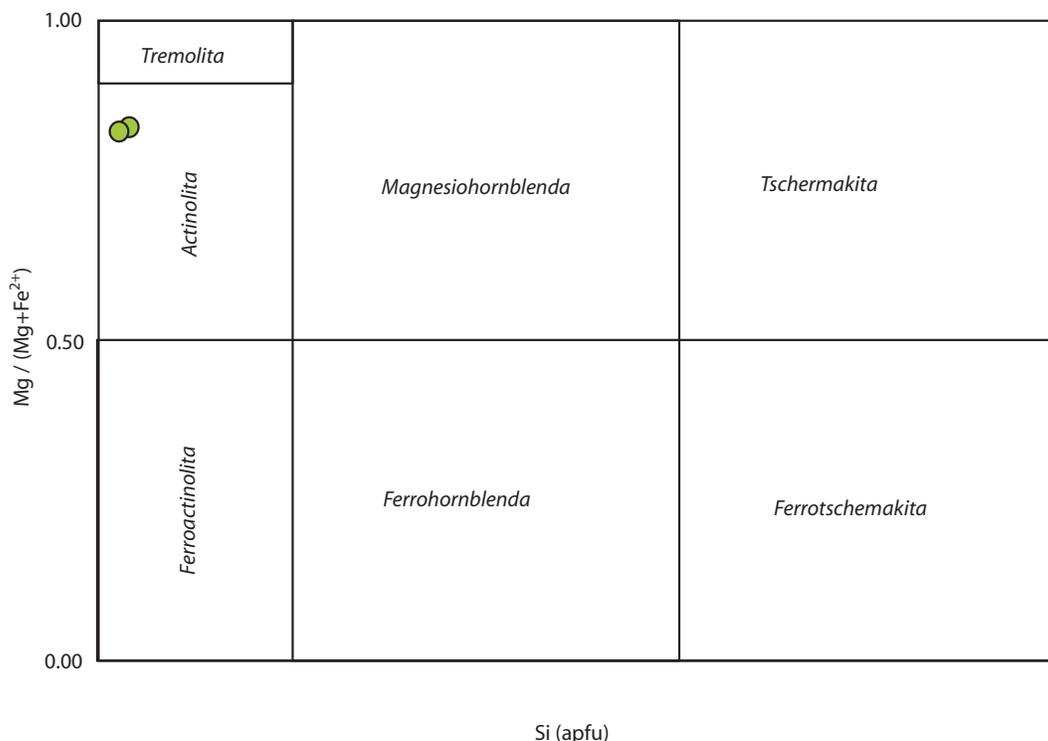


Figura 3.12. Diagrama de clasificación de los anfíboles cálcicos (Leake *et al.*, 1997), en la muestra V-26-B correspondiente con el área de Antares.

en Mg de 0.544-0.978 apfu (Figuras. 3.14 y 3.15).

componente “piralspita” (Mg, Mn, Fe²⁺) es muy bajo, de hasta 2.3 % molar.

3.3.3. Granates

Se analizaron cristales de granate tanto del área de Antares como de Reyna de Cobre. Estos cristales son euedrales o subedrales, alcanzan 3 mm de diámetro y presentan típica zonación concéntrica y anisotropía anómala (Figura 3.16).

Aunque todos los puntos analizados corresponden a andradita, muestran un amplio rango de variación composicional (Ad₁₀₀₋₅₇Grs₄₃₋₀₀), de acuerdo con la zonación observada (Fig.3.17, Tabla 3.3). El

3.2.4. Feldespatos alcalinos

Los cristales analizados corresponden petrográfica y paragenéticamente a adularia (*i.e.* con un grado de orden que la sitúa entre la ortosa y la microclina, cristalizada a bajas temperaturas a partir de fluidos hidrotermales). Son cristales euedrales, de hasta 1 mm de longitud, paragenéticamente asociados a cuarzo y calcita (Figura 3.18).

Composicionalmente, se trata de feldespatos potásicos (Or₉₆₋₉₂Ab₀₈₋₀₄An₀₀) (Fig. 3.19, Tabla 3.4). Su contenido en bario no excede los 5000 ppm.

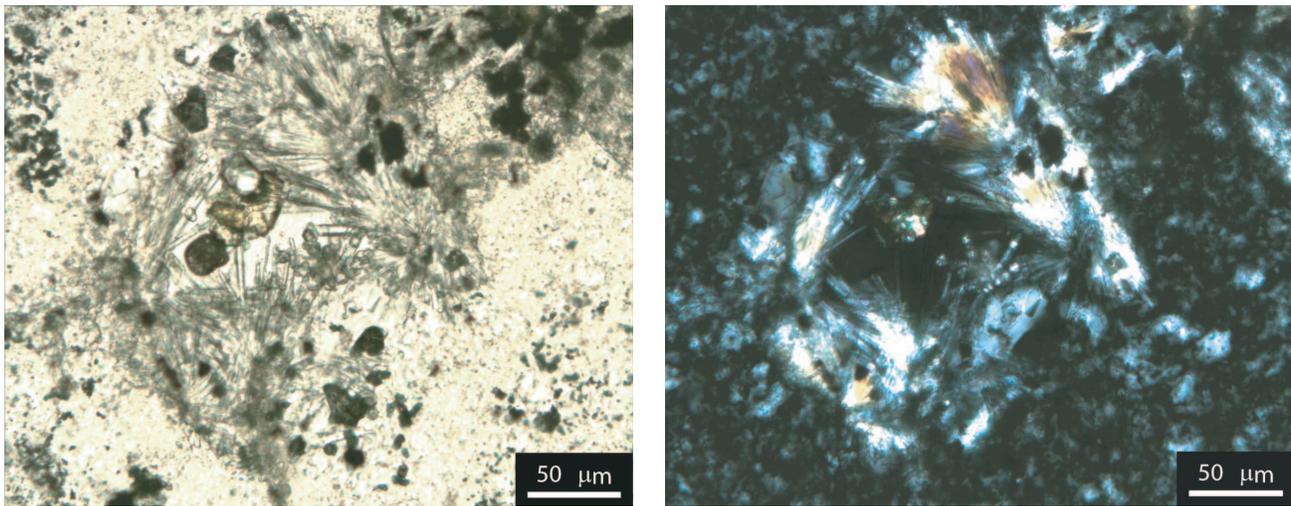


Figura 3.13. Fotomicrografía de cristales prismáticos de clinopiroxeno del yacimiento de Velardeña, en agregados cristalinos con hábito acicular, colores de interferencia anómalos. Luz transmitida sin analizador (izquierda). Luz transmitida con analizador (derecha).

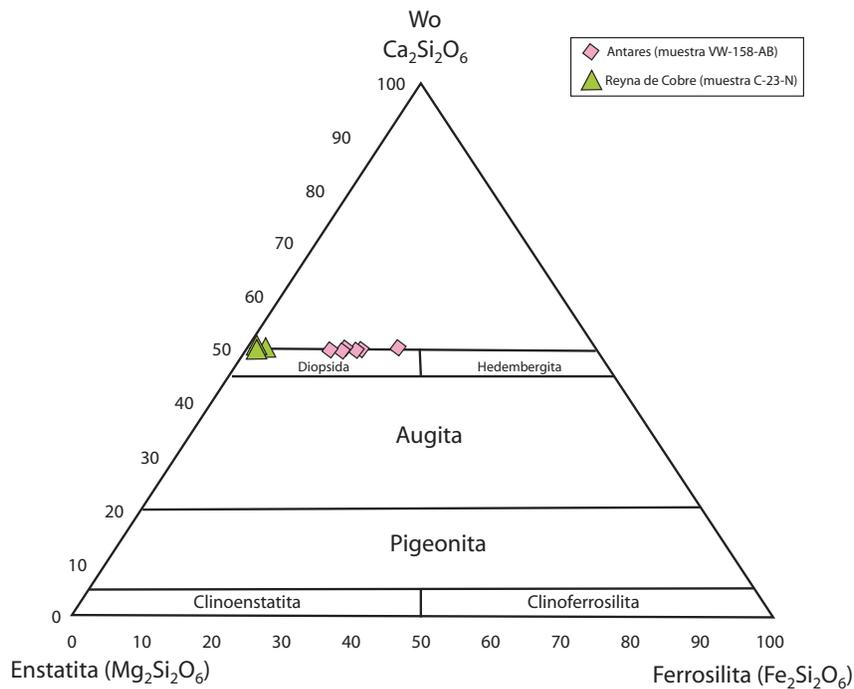


Figura 3.14. Rangos de composición de los clinopiroxenos en el diagrama Ca-Mg-Fe (Morimoto *et al.*, 1988) del yacimiento de Velardeña.

3.2.5. Carbonatos

Se seleccionaron para ser analizados cristales de calcita tardía, emplazada en vetas y/o en posición intersticial respecto a

los silicatos y a los sulfuros (esfalerita variedad “acaramelada”, principalmente), tanto de Antares como de Reyna de Cobre. Se trata de cristales anedrales de tamaño de grano muy variable, que suelen formar texturas “en mosaico” (Figura 3.20).

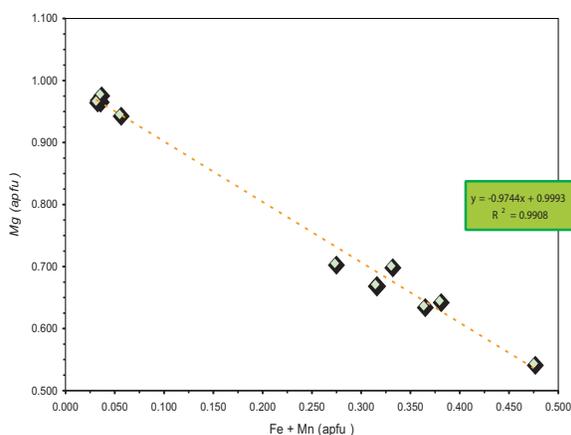


Figura 3.15. Diagrama binario para los clinopiroxenos cálcicos del yacimiento de Velardeña, en el que se muestra la buena correlación negativa entre Mg y Fe+Mn, de acuerdo con la solución sólida continua entre diópsido y hedenbergita.

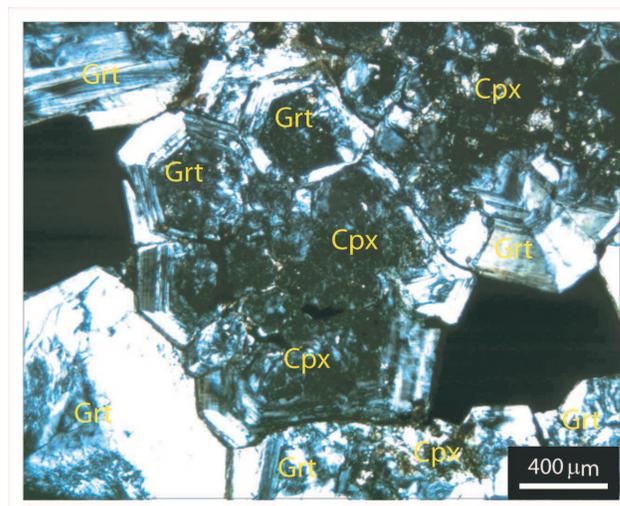


Figura 3.16. Fotomicrografías de cristales de granate del yacimiento de Velardeña, euedrales, alterados, zonados, con cristales de piroxeno, incluidos en agregados de esfalerita; granate=Grt, clinopiroxeno=Cpx. Luz transmitida con analizador.

Desde el punto de vista de la química mineral, se trata de calcita muy pura (95.87-99.74 mol % CaCO_3 ; Tabla 3.5), aunque dos análisis proporcionaron contenidos significativos en manganeso, con una fórmula estructural tal como $(\text{Ca}_{1.93-1.92}, \text{Mn}_{0.07-0.05})\text{CO}_3$.

3.2.6. Arsenopirita

Se analizaron cristales de arsenopirita del área de Antares, en paragénesis con pirrotita, y también en vetas más tardías de calcita y cuarzo. Los cristales en general son euedrales y alcanzan 500 micras de longitud (Figura 3.21). Se analizaron cinco puntos en dos muestras.

Químicamente se aproximan mucho a la fórmula ideal de una arsenopirita pura, y su contenido en arsénico varía de 32.63 a 33.39 átomos % (Tabla 3.6).

3.2.7. Galena

Varios cristales de galena representativos de la asociación de menas del yacimiento de Velardeña han sido analizados. La galena se encuentra en ocasiones asociada a cristales de esfalerita rellenando fracturas, en otros casos engloba cristales de pirita, arsenopirita y calcopirita (Figura 3.22). Se siete puntos en tres muestras.

Aunque su composición coincide con la de una galena pura, cabe mencionar que se han medido contenidos de plata de entre ~400 y ~2000 ppm (Tabla 3.7).

3.2.8. Esfalerita

Se reconocieron dos familias diferentes de esfalerita, una asociada a la etapa retrograda del skarn y otra de tipo acaramelada, asociada a la etapa de formación de vetas tardías. Se han analizado

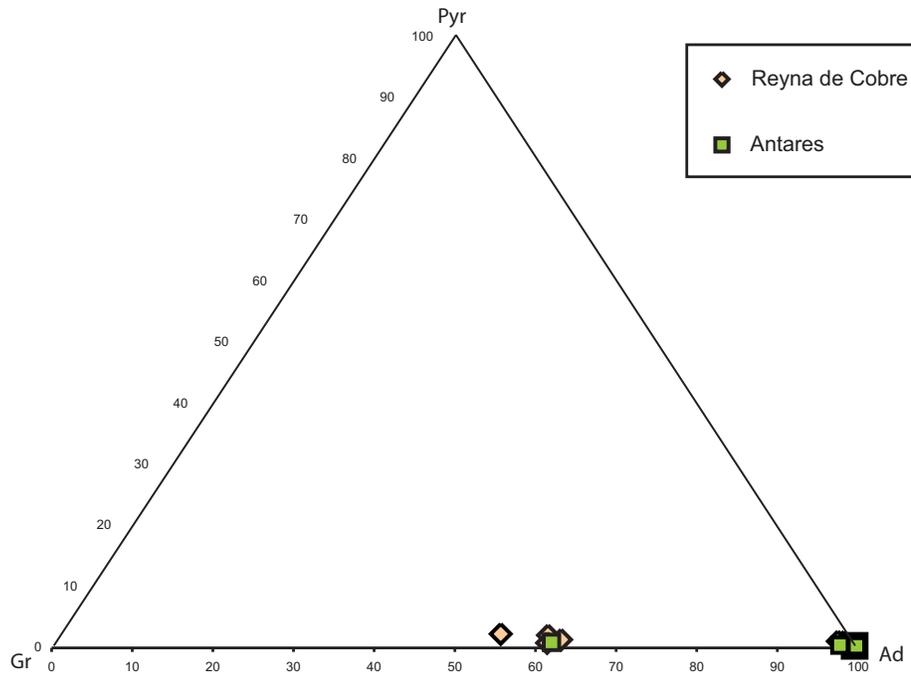


Figura 3.17. Clasificación de los granates cálcicos del yacimiento de Velardeña.

cristales de esfalerita representativos de todas las paragénesis metálicas del yacimiento de Velardeña. La esfalerita se encuentra intercrecida con otros minerales como galena y calcopirita. Comúnmente presenta inclusiones (“blebs”) de calcopirita, en la textura de “chalcopyrite disease”. Si el contenido de Fe es menor a 30% se presenta como variedad “acaramelada” (Figura 3.23). Se analizaron 26 puntos en ocho muestras.

Mientras que los elementos menores, como en cadmio (<0.223 at. % Cd) y el manganeso (0.136-2.219 at. % Mn) se presentan en contenidos bajos y bastante constantes a lo largo del yacimiento, el hierro muestra grandes diferencias en función de las paragénesis (Figuras 3.24 y 3.25, Tabla 3.8). Así, los contenidos más altos en este metal, entre 16 y 22 % molar de FeS, corresponden a la mineralización polimetálica masiva asociada a los skarns de granate, mientras que en la esfalerita

tardía, emplazada en vetas y asociada principalmente a calcita, el hierro varía de 4 a 6 % molar de FeS.

Tres de los análisis (23, 24 y 25 en la Tabla 3.8) corresponden a cristales de esfalerita en aparente paragénesis con pirita y pirrotita, condición necesaria para la aplicación del geobarómetro de Hutchinson y Scott (1981). La presión calculada a partir del contenido en Fe de estos puntos varía entre 0.8 y 0.9 Kbar.

3.2.9. Pirita y pirrotita

Se han analizado cristales de pirita y pirrotita de diversas paragénesis del área mineralizada de Antares, pero no se han obtenido valores significativos de ningún elemento menor (Tabla 3.9). Se analizaron nueve puntos en cuatro muestras de pirita y dos puntos en una muestra para la pirrotita (Figura 3.26).

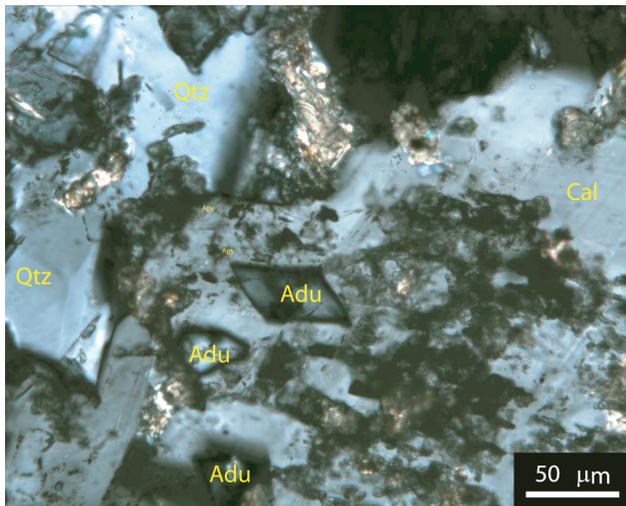


Figura 3.18. Fotomicrografía de cristales de adularia eudral del yacimiento de Velardeña, (muestra C-02-E de Reyna de cobre) asociados a calcita y cuarzo; adularia=Adu, calcita=Cal, cuarzo=Qtz. Luz transmitida, con analizador.

Por su contenido en hierro (46.5 atm. % Fe) y azufre (53.4 atm. % S), estos análisis se aproximan mucho a la fórmula Fe_7S_8 , que de acuerdo con Lusk *et al.* (1993) corresponde al politipo monoclinico de la pirrotita.

3.3 Difracción de rayos X y análisis SWIR

En general, hay una buena correspondencia entre los resultados obtenidos por DRX y los datos petrográficos, corroborándose de este modo los minerales que integran la secuencia paragenética deducida para el yacimiento de Velardeña.

En varias muestras, se detectaron, en cantidades accesorias de filosilicatos (minerales arcillosos) atribuibles a diversos grupos minerales (e.g. esmectitas). Sin embargo, no fue posible

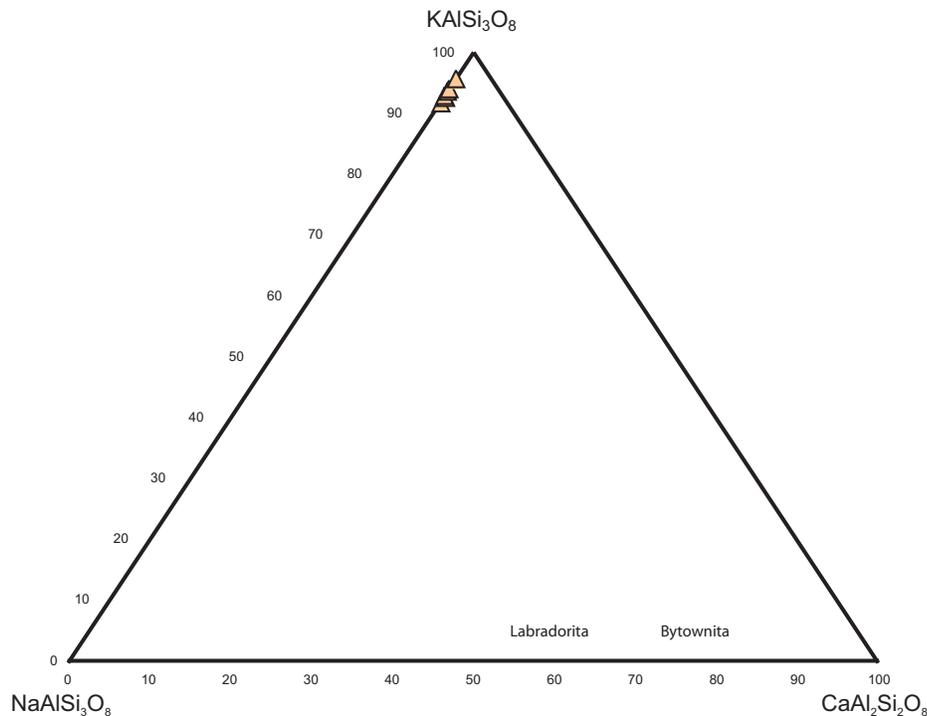


Figura 3.19. Clasificación de los feldespatos alcalinos (adularia) del yacimiento de Velardeña.

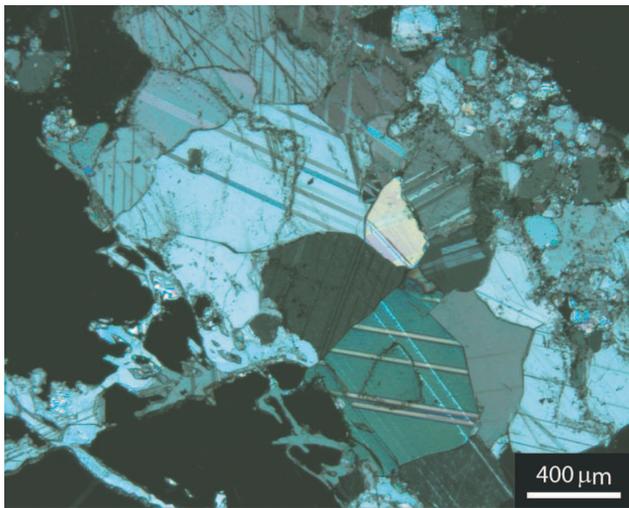


Figura 3.20. Fotomicrografía de cristales de calcita en mosaico del yacimiento de Velardeña. Luz transmitida, con analizador.

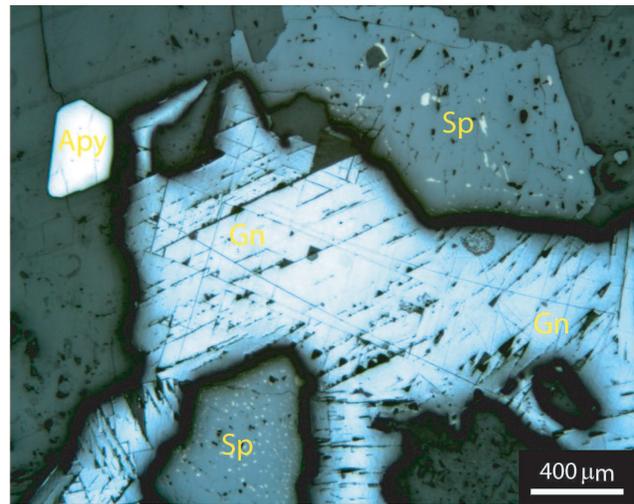


Figura 3.22. Fotomicrografía de cristales de galena del yacimiento de Velardeña, mostrando los típicos "pits" o hoyos triangulares, asociados paragenéticamente a esfalerita con inclusiones ("blebs") de calcopirita (muestra C-04-F, Reyna de Cobre); galena=Gn, esfalerita=Sp,

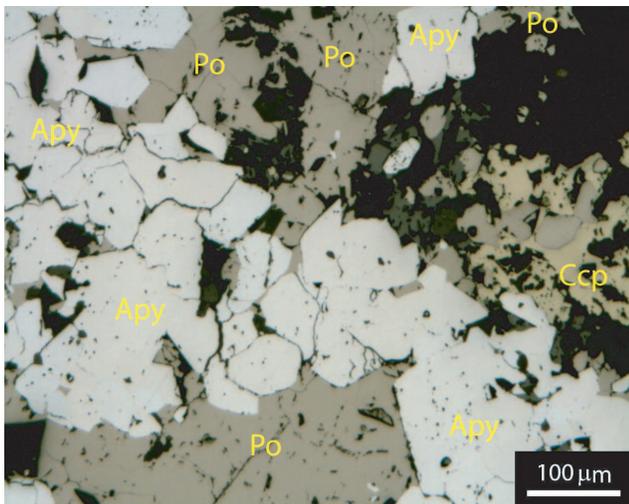


Figura 3.21. Fotomicrografía de cristales de pirrotita, arsenopirita y calcopirita en paragénesis del yacimiento de Velardeña. Muestra V-20-D; pirrotita=Po, arsenopirita=Apy, calcopirita=Ccp. Luz reflejada.

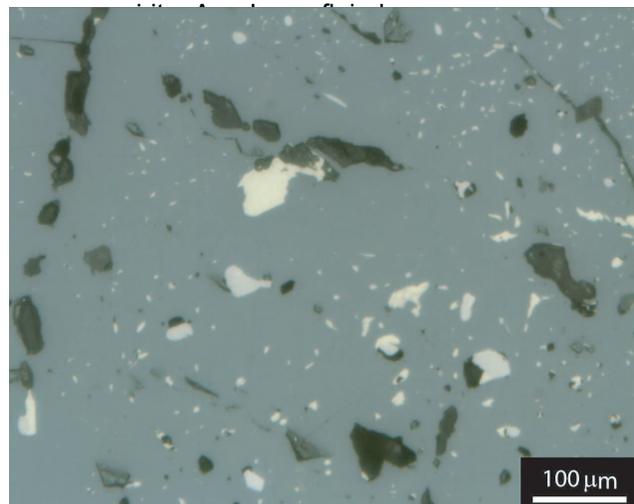


Figura 3.23. Fotomicrografía de cristales de esfalerita del yacimiento de Velardeña, con textura típica "chalcopirite disease", luz reflejada.

identificarlos con precisión debido a la dificultad para su separación.

Por otro lado, se analizaron expresamente algunas muestras de las que no se había realizado lámina delgada-pulida porque su aspecto criptocristalino o arcilloso

desaconsejaba su estudio petrografico-minerográfico, principalmente pórfidos muy alterados y skarns de grano muy fino. En la tabla 3.10 se presentan los resultados del análisis de DRX de las muestras seleccionadas.

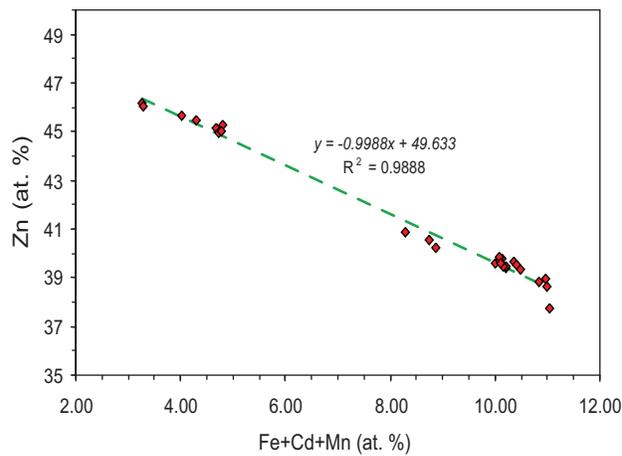


Figura 3.24. Diagrama binario para la esfalerita del yacimiento de Velardeña, en el que se muestra la buena correlación negativa entre Zn y Fe+Mn+Cd, de acuerdo con las sustituciones de la posición metálica de este sulfuro.

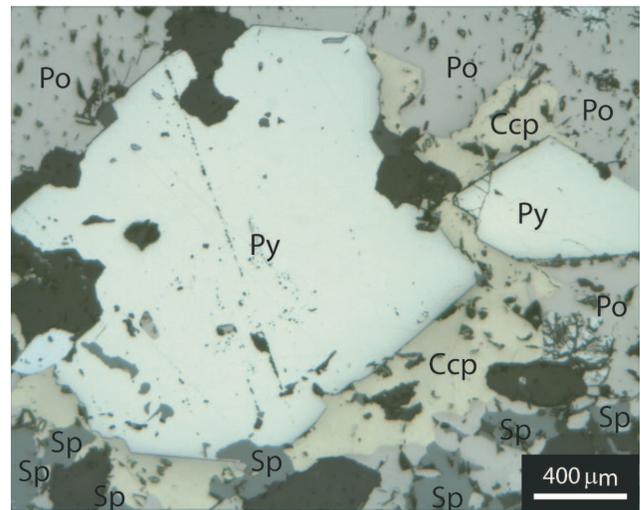


Figura 3.26. Fotomicrografía de un cristal eudral de pirita corroído, rodeado por pirrotita y calcopirita. Muestra VE-200-W (Antares); esfalerita=Sp, pirrotita=Po, calcopirita=Ccp, pirita=Py. Luz reflejada.

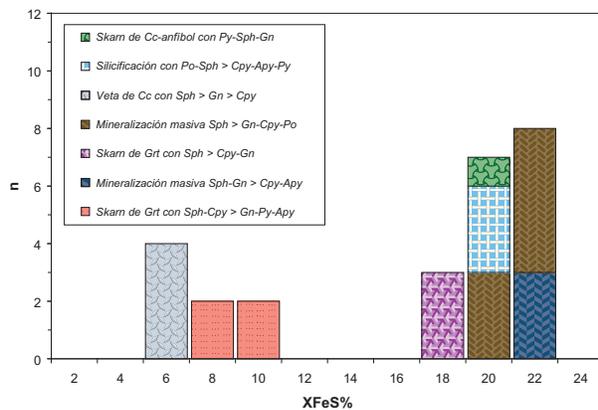


Figura 3.25. Histograma del contenido en hierro en los cristales de esfalerita del yacimiento de Velardeña, de acuerdo con las diversas paragénesis en las que este mineral se encuentra.

exclusivamente con base en la identificación de texturas que proporcionan criterios cronológicos (relativos), o de sucesión temporal, como son:

- Reemplazamiento y alteración
- Sobrecrecimiento de distintos minerales
- Texturas relictas
- Relaciones de corte (vetas)
- Crecimiento de cristales en cavidades y espacios abiertos (p.ej. vetas, porosidad, espacios intersticiales)
- Desarrollo de cristales eudrales
- Zonación de los cristales
- Cristales poiquiloblásticos (con inclusiones de otros minerales)
- Bordes de grano de equilibrio (texturas granulares-poligonales)
- Intercrecimiento entre minerales

3.4 Secuencia paragenética

A partir de los estudios realizados, se ha deducido la secuencia paragenética general del yacimiento de Velardeña, la cual es representativa de las zonas mineralizadas de Antares y Reyna de Cobre. Esto se ha realizado

La secuencia paragenética deducida de las asociaciones minerales de Velardeña, muestra dos grandes estadios de formación de minerales causados por una actividad hidrotermal ligada al emplazamiento de rocas ígneas, y característicos de la mayoría de depósitos de tipo skarn (e.g. Einaudi *et al.*, 1981):

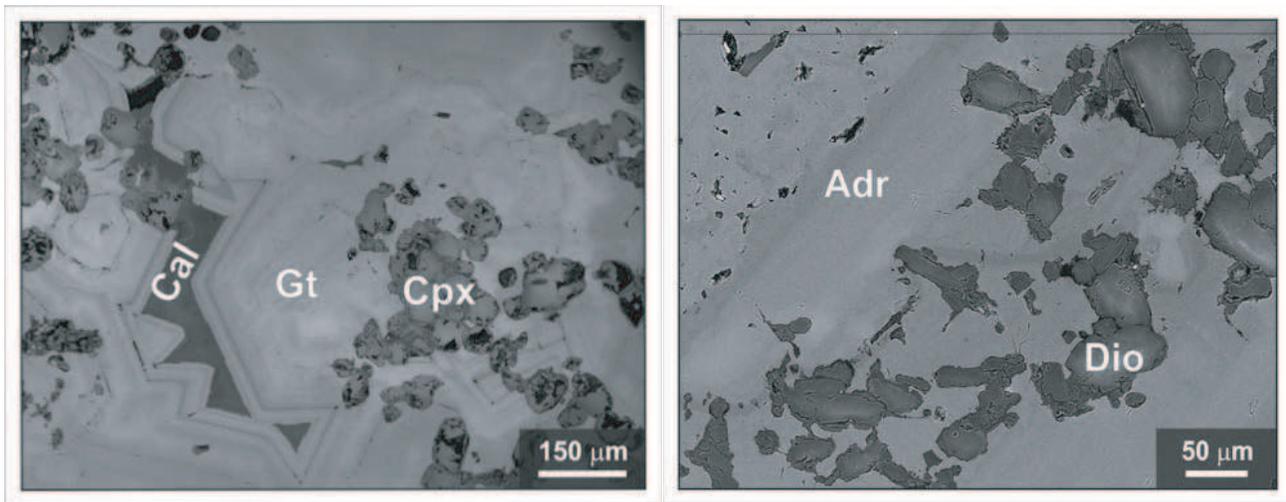


Figura 3.27. a) Imagen de microscopio electrónico de barrido con BSE de una lámina delgada-pulida; la mineralogía ha sido interpretada a partir de la composición química obtenida del análisis EDS. Se observan las relaciones paragenéticas entre el piroxeno (Cpx) y el granate (Gt), ambos formados durante la etapa progradante del skarn, y la calcita (Cal), formada durante el evento retrogradante del skarn (muestra correspondiente al área mineralizada de Reyna de Cobre). En b) Cristales de clinopiroxeno cálcico (diópsido; Dio) incluidos en un granate (andradita; Adr) con zonación y carácter poiquilítico, como ejemplo de la paragénesis retrogradante del skarn de Velardeña (área mineralizada de Antares). Imagen SEM-BSE.

Las Figuras 3.27, 3.28 y 3.29 muestran ejemplos de paragénesis producidas durante las etapas progradante, retrogradante y de vetas, respectivamente.

Los minerales de mena son tardíos respecto a la mayor parte de los silicatos, por lo que suelen ocupar posiciones intersticiales respecto a ellos. La etapa de mineralización hipogénica más tardía corresponde a la formación de vetas (y/o brechas) por fluidos tardíos relacionados con la retrogradación del skarn.

Dichas vetas presentan complicadas relaciones de corte, por lo que se pueden atribuir a múltiples generaciones. En general, son muy ricas en calcita y adularia, y algunas contienen esfalerita “acaramelada” (pobre en Fe), mientras que otras contienen mucha arsenopirita.

Además, hay vetas, aparentemente las más tardías, que contienen fluorita. Por

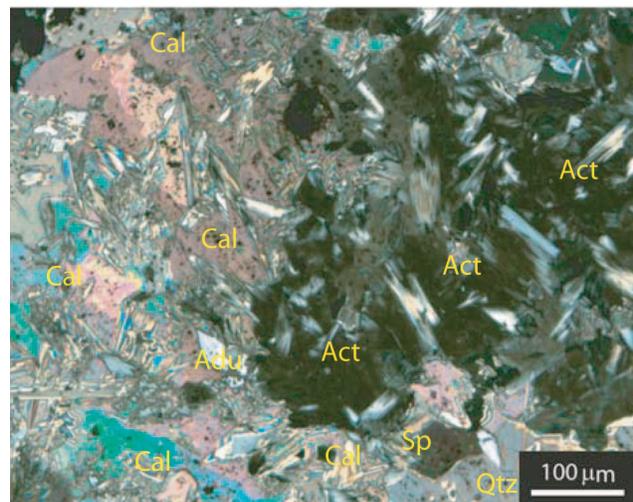


Figura 3.28. Fotomicrografía representativa de la paragénesis retrogradante del skarn de Velardeña, constituida por calcita (alta birrefringencia, Cal), adularia (euedral, secciones en forma de rombo, Adu) y anfíbol cálcico (ferroactinolita; hábito fibroso, Act). Área mineralizada de Antares. Luz polarizada, con analizador.

último, algunas muestras desarrollan puntualmente paragénesis supergénicas, es decir, que incluyen minerales formados a partir del intemperismo de las fases de origen hidrotermal, como la siderita y la goethita.



Figura 3.29 Veta de calcita (blanco) y fluorita (morado tenue) que corta una asociación retrogradante de clorita y epidota (zona verde). Área mineralizada de Antares.

Tabla 3.1. Composición química y fórmulas estructurales de anfíbol cálcico del yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	SiO ₂ wt. %	Al ₂ O ₃ wt. %	TiO ₂ wt. %	CaO wt. %	Na ₂ O wt. %	K ₂ O wt. %	MnO wt. %	FeO wt. %	MgO wt. %	NiO wt. %	Cr ₂ O ₃ wt. %	H ₂ O wt. %	Total wt%
1	V-26-B	57.48	0.71	0.03	13.90	0.15	0.14	0.47	6.81	19.70	0.00	0.00	2.17	101.54
2	V-26-B	58.72	0.80	0.02	13.02	0.17	0.12	0.45	6.54	20.05	0.00	0.00	2.20	102.08
3	V-26-B	57.96	0.95	0.00	13.03	0.17	0.17	0.38	7.37	19.82	0.01	0.00	2.19	102.04

#	Si apfu	Al apfu	Ti apfu	Ca apfu	Na apfu	K apfu	Mn ²⁺ apfu	Fe ²⁺ apfu	Mg apfu	Ni apfu	Cr apfu	H apfu
1	7.924	0.115	0.003	2.053	0.039	0.024	0.055	0.786	4.049	0.000	0.000	2.000
2	8.000	0.128	0.002	1.901	0.044	0.021	0.052	0.745	4.072	0.000	0.000	2.000
3	7.941	0.153	0.000	1.913	0.044	0.030	0.045	0.844	4.048	0.001	0.000	2.000

Tabla 3.2. Composición química y fórmulas estructurales de clinopiroxeno cálcico del yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	SiO ₂ wt. %	Al ₂ O ₃ wt. %	TiO ₂ wt. %	CaO wt. %	Na ₂ O wt. %	K ₂ O wt. %	MnO wt. %	FeO wt. %	MgO wt. %	Cr ₂ O ₃ wt. %	NiO wt. %	Total wt. %
1	VW-158-AB	53.16	0.85	0.01	24.56	0.22	0.00	0.52	9.54	12.06	0.00	0.00	100.92
2	VW-158-AB	52.20	0.03	0.00	24.68	0.03	0.01	1.38	13.53	9.58	0.00	0.00	101.44
3	VW-158-AB	53.14	0.15	0.00	24.83	0.09	0.00	0.76	10.81	11.39	0.01	0.01	101.20
4	VW-158-AB	53.70	1.09	0.04	24.77	0.31	0.00	0.46	8.39	12.84	0.00	0.02	101.63
5	VW-158-AB	53.12	0.14	0.00	25.02	0.05	0.00	0.44	10.16	12.62	0.00	0.02	101.56
6	VW-158-AB	52.69	0.27	0.00	24.87	0.09	0.00	0.59	11.50	11.53	0.00	0.00	101.54
7	C-23-N	54.97	0.31	0.00	25.97	0.00	0.00	0.20	1.62	17.54	0.00	0.00	100.61
8	C-23-N	54.92	0.41	0.00	26.06	0.00	0.00	0.30	0.82	17.99	0.00	0.02	100.51
9	C-23-N	54.83	0.26	0.01	25.89	0.00	0.00	0.31	0.85	18.14	0.01	0.03	100.32
10	C-23-N	55.28	0.29	0.00	26.08	0.00	0.00	0.39	0.63	18.03	0.00	0.01	100.71

	#	Si apfu	Al apfu	Ti apfu	Ca apfu	Na apfu	K apfu	Mn apfu	Fe ²⁺ apfu	Mg apfu	Cr apfu	Ni apfu
	Diopsido	1	1.984	0.037	0.000	0.982	0.016	0.000	0.016	0.298	0.671	0.000
	2	1.986	0.001	0.000	1.006	0.002	0.000	0.045	0.431	0.544	0.000	0.000
	3	1.994	0.007	0.000	0.998	0.007	0.000	0.024	0.339	0.637	0.000	0.000
	4	1.979	0.047	0.001	0.978	0.022	0.000	0.014	0.259	0.705	0.000	0.001
	5	1.979	0.006	0.000	0.999	0.004	0.000	0.014	0.317	0.701	0.000	0.001
	6	1.977	0.012	0.000	1.000	0.007	0.000	0.019	0.361	0.645	0.000	0.000
	7	1.987	0.013	0.000	1.006	0.000	0.000	0.006	0.049	0.945	0.000	0.000
	8	1.982	0.017	0.000	1.008	0.000	0.000	0.009	0.025	0.968	0.000	0.001
	9	1.983	0.011	0.000	1.003	0.000	0.000	0.009	0.026	0.978	0.000	0.001
	10	1.989	0.012	0.000	1.005	0.000	0.000	0.012	0.019	0.967	0.000	0.000

Tabla 3.3. Composición química y fórmulas estructurales de granate cálcico del yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	SiO ₂ wt. %	Al ₂ O ₃ wt. %	TiO ₂ wt. %	CaO wt. %	MnO wt. %	Fe ₂ O ₃ wt. %	FeO wt. %	MgO wt. %	Cr ₂ O ₃ wt. %	NiO wt. %	Total wt. %
1	C-02-E	34.35	8.69	1.58	34.37	0.43	17.91	0.00	0.33	0.14	0.16	97.96
2	C-02-E	34.08	7.83	0.30	33.93	0.78	20.52	0.00	0.08	0.13	0.15	97.80
3	C-10-I	33.44	7.24	0.78	34.71	0.09	20.04	0.00	0.29	0.08	0.06	96.73
4	C-10-I	33.55	7.71	0.26	34.78	0.10	19.57	0.00	0.15	0.05	0.05	96.23
5	C-23-N	32.43	0.40	0.01	33.38	0.18	31.32	0.00	0.16	0.00	0.00	97.87
6	C-23-N	32.52	0.25	0.00	33.23	0.17	31.77	0.00	0.16	0.00	0.01	98.10
7	V-26-B	35.31	0.05	0.01	32.96	0.13	32.35	0.00	0.00	0.00	0.00	100.82
8	V-26-B	34.97	0.00	0.00	33.07	0.14	32.36	0.00	0.00	0.00	0.00	100.54
9	V-26-B	34.78	0.41	0.05	33.05	0.14	31.51	0.00	0.03	0.00	0.01	99.98
10	V-26-B	34.95	7.71	0.40	34.23	0.32	20.07	0.00	0.05	0.03	0.00	97.75

#	Si apfu	Al apfu	Ti apfu	Ca apfu	Mn apfu	Fe ³⁺ apfu	Fe ²⁺ apfu	Mg apfu	Cr apfu	Ni apfu
1	2.828	0.843	0.098	3.032	0.030	1.110	0.000	0.041	0.009	0.011
2	2.830	0.766	0.019	3.019	0.055	1.283	0.000	0.009	0.009	0.010
3	2.803	0.715	0.049	3.117	0.006	1.264	0.000	0.036	0.005	0.004
4	2.819	0.763	0.017	3.131	0.007	1.237	0.000	0.019	0.004	0.003
5	2.801	0.040	0.001	3.089	0.013	2.036	0.000	0.020	0.000	0.000
6	2.806	0.025	0.000	3.072	0.013	2.063	0.000	0.020	0.000	0.001
7	2.968	0.005	0.000	2.969	0.010	2.047	0.000	0.001	0.000	0.000
8	2.948	0.000	0.000	2.988	0.010	2.053	0.000	0.000	0.000	0.000
9	2.941	0.041	0.003	2.994	0.010	2.005	0.000	0.004	0.000	0.000
10	2.898	0.753	0.025	3.041	0.022	1.253	0.000	0.006	0.002	0.000

Tabla 3.4. Composición química y fórmulas estructurales de feldespato alcalino (adularia) del yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	SiO ₂ wt. %	Al ₂ O ₃ wt. %	TiO ₂ wt. %	CaO wt. %	Na ₂ O wt. %	K ₂ O wt. %	BaO wt. %	MnO wt. %	FeO wt. %	MgO wt. %	Total wt. %
1	VW-158-AB	65.78	17.96	0.00	0.04	0.91	15.68	0.53	0.02	0.02	0.00	100.93
2	VW-158-AB	65.72	17.85	0.02	0.06	0.79	15.62	0.36	0.00	0.02	0.00	100.43
3	VW-158-AB	65.99	17.55	0.00	0.00	0.78	15.61	0.46	0.00	0.01	0.00	100.40
4	VW-158-AB	66.33	17.53	0.00	0.00	0.71	15.91	0.34	0.01	0.00	0.00	100.84
5	VW-158-AB	66.28	17.47	0.00	0.00	0.66	15.82	0.23	0.00	0.00	0.00	100.47
6	C-04-F	65.24	17.03	0.00	0.00	0.51	16.17	0.24	0.04	0.57	0.00	99.80
7	C-04-F	64.58	17.03	0.00	0.00	0.48	16.12	0.45	0.05	0.58	0.00	99.28

#	Si apfu	Al apfu	Ti apfu	Ca apfu	Na apfu	K apfu	Ba apfu	Mn apfu	Fe ²⁺ apfu	Mg apfu
1	3.016	0.970	0.000	0.002	0.081	0.917	0.010	0.001	0.001	0.000
2	3.022	0.967	0.001	0.003	0.070	0.916	0.006	0.000	0.001	0.000
3	3.036	0.951	0.000	0.000	0.069	0.916	0.008	0.000	0.000	0.000
4	3.038	0.947	0.000	0.000	0.063	0.930	0.006	0.000	0.000	0.000
5	3.043	0.945	0.000	0.000	0.059	0.927	0.004	0.000	0.000	0.000
6	3.034	0.934	0.000	0.000	0.046	0.959	0.004	0.001	0.022	0.000
7	3.026	0.941	0.000	0.000	0.043	0.963	0.008	0.002	0.023	0.000

Tabla 3.5. Composición química y fórmulas estructurales de calcita del yacimiento de Velardeña.

#	Sample	CaO	MgO	MnO	FeO	SrO	Na ₂ O	CO ₂	Total	#	CaCO ₃	MgCO ₃	MnCO ₃	FeCO ₃
		wt. %	wt. %	wt. %		mol %	mol %	mol %	mol %					
1	V-129-G	55.31	0.03	0.10	0.01	0.01	0.01	43.52	99.00	1	99.743	0.070	0.144	0.012
2	V-129-G	54.51	0.04	0.08	0.00	0.00	0.06	42.91	97.59	2	99.707	0.089	0.113	0.000
3	V-129-G	55.88	0.04	0.10	0.01	0.05	0.01	43.98	100.06	3	99.708	0.087	0.135	0.009
4	C-10-I	53.14	0.31	0.28	1.34	0.03	0.15	42.92	98.16	4	97.169	0.799	0.408	1.358
5	C-10-I	54.94	0.02	0.08	0.55	0.03	0.02	43.45	99.08	5	99.241	0.038	0.111	0.555
6	C-10-I	53.16	0.34	0.29	1.47	0.04	0.06	42.97	98.31	6	97.101	0.867	0.412	1.491
7	C-04-F	52.87	0.08	1.67	0.92	0.04	0.06	43.07	98.71	7	96.327	0.198	2.404	0.930
8	C-04-F	52.75	0.02	2.29	0.74	0.04	0.00	43.18	99.03	8	95.868	0.043	3.294	0.752

Tabla 3.6. Composición química y fórmulas estructurales de arsenopirita del yacimiento de Velardeña.

#	Sample	S	Mn	Cu	As	Bi	Fe	Cd	Zn	Sn	Ag	Sb	Pb	Total
		wt. %												
1	VE-02-AD	20.64	0.03	0.01	46.51	0.00	35.60	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	102.79
2	VE-158-AB	20.38	0.00	0.00	46.12	0.00	34.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	101.63
3		20.34	0.02	0.00	46.40	0.00	34.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	101.66
4		19.62	0.00	0.01	46.44	0.00	34.69	0.00	0.01	0.00	0.02	0.28	0.14	101.21
5		19.99	0.01	0.00	46.05	0.00	34.79	0.00	0.02	0.00	0.06	0.55	0.05	101.52

#	S	Mn	Cu	As	Bi	Fe	Cd	Zn	Sn	Ag	Sb	Pb
	atom %											
1	33.83	0.03	0.00	32.63	0.00	33.51	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
2	33.85	0.00	0.00	32.78	0.00	33.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00
3	33.82	0.02	0.00	33.02	0.00	32.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00
4	32.96	0.00	0.01	33.39	0.00	33.46	0.00	0.00	0.00	0.01	0.12	0.04
5	33.39	0.01	0.00	32.93	0.00	33.37	0.00	0.02	0.00	0.03	0.24	0.01

Tabla 3.7. Composición química y fórmulas estructurales de galena del yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	S	Mn	Cu	As	Bi	Fe	Cd	Zn	Sn	Ag	Sb	Pb	Total
		Wt. %												
1	C-04-F-1-4	13.26	0.03	0.01	0.00	0.00	0.48	0.00	0.07	0.00	0.21	0.09	84.70	98.84
2	V-18-E-2-5	12.91	0.03	0.01	0.00	0.00	0.69	0.00	0.14	0.00	0.04	0.12	84.62	98.55
3	V-18-E-2-6	12.84	0.06	0.00	0.00	0.00	0.74	0.00	0.02	0.00	0.17	0.19	84.32	98.34
4	V-129-G-1-1	13.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.15	0.29	85.83	99.89
5	V-129-G-1-2	13.50	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.04	0.00	0.10	0.21	85.83	99.73
6	V-129-G-2-3	13.57	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.09	0.00	0.19	0.22	86.15	100.26
7	V-129-G-2-4	13.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.22	85.22	99.06

#	S	Mn	Cu	As	Bi	Fe	Cd	Zn	Sn	Ag	Sb	Pb
	atom %											
1	1.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000	0.002	0.000	0.005	0.002	0.989
2	1.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.031	0.000	0.005	0.000	0.001	0.002	1.014
3	1.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.001	0.000	0.004	0.004	1.017
4	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.006	0.976
5	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.002	0.004	0.984
6	1.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.003	0.000	0.004	0.004	0.982
7	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.980

Tabla 3.8. Composición química y fórmulas estructurales de esfalerita del yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	S Wt. %	Mn Wt. %	Cu Wt. %	As Wt. %	Bi Wt. %	Fe Wt. %	Cd Wt. %	Zn Wt. %	Sn Wt. %	Ag Wt. %	Sb Wt. %	Pb Wt. %	Total Wt. %
1	C-02-E-1-1	32.90	0.34	0.00	0.00	0.00	5.01	0.00	60.42	0.01	0.00	0.01	0.00	98.68
2	C-02-E-1-2	33.17	0.32	0.00	0.00	0.03	5.09	0.02	60.45	0.01	0.00	0.00	0.00	99.08
3	C-04-F-1-1	33.09	0.52	0.00	0.03	0.05	4.33	0.12	61.08	0.03	0.00	0.00	0.00	99.24
4	C-04-F-1-2	33.13	0.40	0.00	0.03	0.00	4.18	0.06	61.38	0.00	0.00	0.02	0.00	99.20
5	V-39-A-1-1	33.89	0.75	0.00	0.02	0.02	12.08	0.08	53.08	0.00	0.00	0.01	0.00	99.93
6	V-39-A-1-2	33.58	0.72	0.02	0.00	0.00	12.06	0.04	53.24	0.00	0.00	0.00	0.00	99.66
7	V-39-A-1-3	33.72	0.64	0.00	0.00	0.01	11.96	0.05	53.09	0.01	0.00	0.00	0.01	99.48
8	V-26-B-1-1	33.72	0.21	0.01	0.03	0.00	9.93	0.00	55.03	0.00	0.00	0.00	0.01	98.93
9	V-26-B-1-2	33.96	0.22	0.00	0.02	0.00	10.07	0.05	54.79	0.01	0.00	0.00	0.02	99.14
10	V-26-B-1-3	33.83	0.16	0.01	0.03	0.00	9.44	0.00	55.47	0.00	0.00	0.01	0.00	98.93
11	V-18-E-1-1	33.79	0.24	0.02	0.05	0.00	11.43	0.06	54.22	0.00	0.00	0.00	0.00	99.81
12	V-18-E-1-2	33.78	0.21	0.07	0.00	0.00	11.65	0.09	53.90	0.00	0.00	0.00	0.05	99.75
13	V-18-E-1-3	33.62	0.21	0.07	0.03	0.02	11.68	0.03	53.91	0.00	0.00	0.00	0.09	99.65
14	V-18-E-1-4	33.30	0.21	0.00	0.00	0.00	11.79	0.06	53.94	0.00	0.00	0.01	0.00	99.30
15	V-18-E-2-1	33.38	0.21	0.00	0.04	0.00	11.55	0.01	54.18	0.00	0.00	0.00	0.00	99.37
16	V-18-E-2-2	33.50	0.19	1.34	0.02	0.00	12.61	0.07	51.43	0.01	0.00	0.01	0.00	99.17
17	V-18-E-2-3	33.40	0.24	0.03	0.00	0.05	11.81	0.12	53.81	0.03	0.00	0.00	0.05	99.52
18	V-18-E-2-4	33.61	0.18	0.02	0.02	0.03	11.59	0.00	54.39	0.02	0.00	0.00	0.06	99.92
19	V-129-G-1-3	33.05	2.46	0.00	0.00	0.00	2.77	0.52	61.16	0.06	0.00	0.00	0.02	100.03
20	V-129-G-1-4	33.07	2.50	0.00	0.00	0.00	2.69	0.48	60.50	0.01	0.01	0.00	0.00	99.26
21	V-129-G-2-1	33.60	0.49	0.06	0.00	0.00	3.16	0.23	62.60	0.04	0.00	0.00	0.00	100.16
22	V-129-G-2-2	33.62	0.56	0.05	0.00	0.07	3.08	0.33	62.47	0.09	0.00	0.00	0.00	100.26
23	VE-02-AD-5	33.92	0.44	0.01	0.00	0.00	11.40	0.14	54.24	0.00	0.00	0.02	0.00	100.17
24	VE-02-AD-6	33.47	0.39	0.00	0.00	0.14	11.30	0.06	54.31	0.00	0.00	0.03	0.00	99.69
25	VE-02-AD-2-2	33.78	0.38	0.02	0.01	0.00	11.41	0.01	54.20	0.00	0.00	0.01	0.00	99.82
26	VE-60-Y-1	33.26	0.63	0.00	0.00	0.00	11.46	0.00	53.25	0.02	0.00	0.00	0.08	98.70

#	S atom %	Mn atom %	Cu atom %	As atom %	Bi atom %	Fe atom %	Cd atom %	Zn atom %	Sn atom %	Ag atom %	Sb atom %	Pb atom %	Total atom %
1	50.155	0.298	0.000	0.000	0.000	4.382	0.000	45.157	0.005	0.000	0.002	0.000	
2	50.316	0.280	0.000	0.000	0.006	4.434	0.007	44.953	0.003	0.000	0.001	0.000	
3	50.219	0.462	0.000	0.018	0.012	3.777	0.050	45.452	0.010	0.000	0.000	0.000	
4	50.283	0.356	0.000	0.018	0.000	3.638	0.028	45.668	0.000	0.000	0.010	0.000	
5	50.342	0.654	0.000	0.012	0.005	10.300	0.032	38.651	0.000	0.000	0.004	0.000	
6	50.088	0.628	0.017	0.001	0.000	10.323	0.015	38.927	0.000	0.000	0.000	0.000	
7	50.322	0.557	0.000	0.000	0.003	10.249	0.020	38.844	0.002	0.000	0.000	0.003	
8	50.680	0.181	0.004	0.018	0.000	8.571	0.000	40.544	0.000	0.000	0.000	0.003	
9	50.873	0.191	0.000	0.010	0.000	8.663	0.022	40.232	0.005	0.000	0.000	0.005	
10	50.830	0.136	0.008	0.016	0.000	8.146	0.000	40.860	0.000	0.000	0.003	0.000	
11	50.338	0.211	0.012	0.033	0.000	9.779	0.025	39.601	0.000	0.000	0.000	0.000	
12	50.355	0.185	0.051	0.000	0.000	9.972	0.037	39.388	0.000	0.000	0.000	0.011	
13	50.220	0.179	0.051	0.017	0.006	10.017	0.012	39.479	0.000	0.000	0.000	0.021	
14	49.959	0.184	0.000	0.000	0.000	10.156	0.025	39.671	0.000	0.000	0.005	0.000	
15	50.033	0.180	0.000	0.027	0.000	9.943	0.004	39.812	0.000	0.000	0.000	0.000	
16	50.174	0.169	1.011	0.010	0.000	10.843	0.030	37.756	0.006	0.000	0.002	0.000	
17	50.024	0.212	0.019	0.000	0.011	10.153	0.050	39.509	0.011	0.000	0.000	0.011	
18	50.114	0.154	0.013	0.015	0.007	9.919	0.002	39.754	0.009	0.000	0.000	0.015	
19	49.902	2.169	0.000	0.000	0.000	2.401	0.223	45.279	0.023	0.000	0.000	0.004	
20	50.194	2.219	0.002	0.000	0.000	2.347	0.207	45.023	0.005	0.005	0.000	0.000	
21	50.533	0.427	0.042	0.000	0.000	2.730	0.097	46.156	0.015	0.000	0.000	0.000	
22	50.567	0.488	0.040	0.000	0.016	2.655	0.142	46.056	0.036	0.000	0.000	0.000	
23	50.362	0.380	0.004	0.000	0.000	9.714	0.058	39.473	0.001	0.000	0.009	0.000	
24	50.062	0.343	0.000	0.000	0.031	9.707	0.025	39.821	0.001	0.000	0.010	0.000	
25	50.309	0.333	0.014	0.006	0.000	9.760	0.003	39.572	0.000	0.000	0.004	0.000	
26	50.138	0.556	0.002	0.000	0.000	9.922	0.000	39.353	0.009	0.000	0.000	0.020	

Tabla 3.9. Composición química y fórmulas estructurales de pirita y pirrotita del yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	Mineral	S Wt. %	Mn Wt. %	Cu Wt. %	As Wt. %	Bi Wt. %	Fe Wt. %	Cd Wt. %	Zn Wt. %	Sn Wt. %	Ag Wt. %	Sb Wt. %	Pb Wt. %	Total Wt. %
1	V-18-E-2-7	Pirita	52.25	0.00	0.02	0.04	0.12	47.18	0.00	0.09	0.00	0.00	0.02	0.00	99.72
2	V-18-E-2-8		52.10	0.02	0.04	0.00	0.00	46.97	0.00	0.08	0.02	0.07	0.02	0.03	99.34
3	V-122-F-1		52.59	0.00	0.00	0.06	0.00	47.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.10	100.45
4	V-122-F-2		50.90	0.00	0.00	4.53	0.03	45.84	0.00	0.01	0.00	0.02	0.08	0.00	101.42
5	V-122-F-3		51.80	0.01	0.00	0.12	0.00	46.58	0.00	0.00	0.00	0.01	0.13	0.03	98.67
6	V-129-G-1-5		53.33	0.00	0.00	0.00	0.00	46.88	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	0.07	100.37
7	V-129-G-1-6		53.55	0.00	0.00	0.05	0.00	47.12	0.00	0.05	0.00	0.04	0.00	0.00	100.80
8	VE-60-Y-2		53.16	0.03	0.01	0.03	0.02	47.50	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	100.81
9	VE-60-Y-3		52.79	0.04	0.01	0.02	0.00	47.53	0.00	0.10	0.01	0.05	0.00	0.00	100.54
10	VE-02-AD-3	Pirrotita	39.72	0.00	0.00	0.00	0.04	60.31	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	100.11
11	VE-02-AD-4		39.86	0.00	0.00	0.00	0.00	60.31	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	100.23

#	S atom %	Mn atom %	Cu atom %	As atom %	Bi atom %	Fe atom %	Cd atom %	Zn atom %	Sn atom %	Ag atom %	Sb atom %	Pb atom %
1	2.000	0.000	0.000	0.001	0.001	1.037	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
2	2.000	0.000	0.001	0.000	0.000	1.035	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
3	2.000	0.000	0.000	0.001	0.000	1.040	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
4	2.000	0.000	0.000	0.076	0.000	1.034	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
5	2.000	0.000	0.000	0.002	0.000	1.033	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
6	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.009	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
7	2.000	0.000	0.000	0.001	0.000	1.010	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
8	2.000	0.001	0.000	0.000	0.000	1.026	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
9	2.000	0.001	0.000	0.000	0.000	1.034	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000
10	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.872	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.869	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 3.10. Resultados de los análisis por DRX de muestras seleccionadas del yacimiento de Velardeña.

#	Clave	Descripción macroscópica	Minerales (DRX)
1	C-02-E	Skarn de granate mineralizado (Zn-Cu-Pb)	Ep, Grt, Cc, Sp, Q, (Fl)
2	C-05-C	Skarn de granate mineralizado (Cu-Pb)	Cc, Q, Grt, Po, Py
3	C-06-A	Pórfido félsico alterado	Q, KF, Cpx, Ep, Chl(?), mica(?)
4	C-07-B	Contacto entre mármol y skarn con epidota	Cc, Grt, Q, Cpx, Ep
5	C-08-K	Skarn bandeado	Wo > Grt
6	C-08-J	Pórfido silicificado	Cc, Grt, Q, Cpx, Brt(?)
7	C-10-i	Skarn de granate (estéril)	Cc, Grt, Cpx, Fl, Sd
8	C-12-H	Vetas en monzogranito	Q, Cc
9	C-13-G	Endoskarn criptocristalino (estéril)	Cc, Cpx, Wo, KF, Grt
10	C-23-N	Skarn de granate (estéril)	Grt, Cc, Q, Brt
11	V-06-AG	Jasperoide (sedimentario)	Q, (Cc)
12	V-26-B	Skarn de granate mineralizado (Zn±Cu)	Grt, Sp, Py, Cc, Fl, Cpx (Q)
13	V-39-A	Mineralización masiva (Zn-Pb-Cu)	Sp, Py, (Cpx)
14	V-63-O	Brecha mineralizada (Zn-Pb)	Cc, Grt, Cpx, Q, Py
15	V-78-P	Contacto entre pórfido y skarn	Cpx, Grt, Py, Sd, Cc, Q, Sme(?)
16	V-97-L	Pórfido alterado	Q > KF, Grt, (mica?)
17	V-102-N	Pórfido félsico sericitizado	Q, KF, (mica?, Zeo?)
18	V-104-M	Veta-brecha mineralizada (Fe-Zn-As)	Cc, Q, Sp, (mica?, Sme?)
19	V-129-G	Veta de calcita mineralizada (Zn-Pb)	Sp, Gal
20	VE-02-AD	Mineralización (Fe-Zn-Cu) en vetillas y diseminada	KF, Q, Po, Sp, Cc
21	VE-60-V	Veta de calcita mineralizada (Zn-Pb)	Sp, Py, Sd, Q
22	VE-60-Y	Veta de calcita mineralizada (Fe-Zn-Pb)	Cc, Q
23	VE-122-AC	Skarn mineralizado (Zn-Fe)	Sp, Py, Sd, Q, (Amp)
24	VE-122-Z	Skarn mineralizado (Zn-Fe)	Sp, Py, Amp, Q, Sd
25	VE-200-X	Pórfido alterado	Cc, Q, KF
26	VW-59-U	Skarn verde microcristalino (estéril)	Cc, Cpx, Grt, Fl, Gal
27	VW-158-AB	Veta de calcita y fluorita mineralizada (As-Fe-Zn)	Fl, Cc, Q, Cpx

Procedencia de las muestras: #1-10, Reyna de Cobre; #11-27, Antares.

Abreviaturas de minerales: Amp, anfíbol cálcico; Brt, barita; Cc, calcita; Chl, cloritas; Cpx, clinopiroxeno cálcico; Ep, epidota; Fl, fluorita; Gal, galena; Grt, granate cálcico; KF, feldespato potásico; Po, pirrotita; Py, pirita; Q, cuarzo; Sd, siderita; Sme, esmectita; Sp, esfalerita; Wo, wollastonita; Zeo, zeolita.

Capítulo 4

Geoquímica de los cuerpos intrusivos

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del
Skarn de Velardeña, Durango

4. Geoquímica de los cuerpos intrusivos

4.1 Fluorescencia de rayos X

Los cuerpos intrusivos en Velardeña son plutones y diques porfídicos, emplazados en niveles someros en la corteza. A grandes rasgos, las rocas analizadas se hallan dentro del rango composicional esperado para los granitoides comunes (*cf. Le Maitre, op. cit.*); sin embargo, el hecho de algunas de las muestras presenten alteración hidrotermal en algún grado (silicificación, sericitización) modifica su contenido en varios elementos mayores (*e.g.* K₂O, SiO₂, CaO), por lo que estas muestras han sido descartadas.

Los elementos mayores analizados son: Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P, los cuales se expresan en forma de porcentaje en peso de óxidos. La concentración de estos elementos está controlada por los minerales que conforman las rocas intrusivas analizadas, como son: el cuarzo (SiO₂),

plagioclasa (CaO, Na₂O y Al₂O₃) y feldespato potásico (K₂O y Al₂O₃). Por otra parte, los minerales ferromagnesianos controlarán el porcentaje de FeO y MgO presentes. Como se mencionó en capítulos anteriores, los datos de elementos mayores fueron obtenidos mediante FRX (Tabla 4.1), ellos fueron recalculados bajo condiciones anhidras y procesados, en algunos casos, con ayuda del software IGPET versión 3.0 para la elaboración de los diagramas, cabe señalar que los análisis no son del todo confiables en las muestras en las que el porcentaje por pérdida de calcinación es de siete o mayor (muestras C-06-A, V-178-H y PRC1006A). Los valores recalculados se muestran en la Tabla 4.2.

Para la clasificación de la serie magmática de las muestras analizadas, fue utilizado el diagrama TAS (*Total Alkalies vs. Silica*), por sus siglas en inglés; para rocas plutónicas. (Fig. 4.1).

Como puede observarse en la Figura 4.1, las rocas pertenecen a los dominios de las

Tabla 4.1. Composición química (elementos mayores) en roca total de muestras de rocas intrusivas (granitoides y pórfidos) del distrito minero de Velardeña.

<i>Muestra</i>	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MgO	PxC	TOTAL
	<i>% en peso</i>											
C-06-A	14.492	59.282	4.54	4.122	0.699	0.041	3.667	0.232	3.526	2.184	7.2	99.985
C-12-H	14.449	61.827	2.344	6.779	0.55	0.032	4.485	0.186	3.455	1.736	4.26	100.1
C-08-J	5.954	46.26	0.059	41.252	0.212	0.088	1.903	0.111	0.133	1.983	1.61	99.565
V-178-H	13.052	64.423	2.748	5.156	0.412	0.099	2.859	0.184	0.864	1.778	8.51	100.09
VE-200-X	6.005	36.526	3.268	28.658	0.018	0.087	1.186	0.028	0.381	0.529	22	98.686
V-97-L	11.894	76.075	8.424	0.539	0.047	0.009	0.687	0.035	0.295	0.412	1.42	99.837
V-102-N	15.709	68.481	10.698	0.413	0.274	0.008	0.76	0.125	0.572	1.058	1.63	99.728
PV09163	14.278	68.841	5.481	2.074	0.279	0.016	0.379	0.102	3.98	0.817	3.73	99.977
PV0708	14.919	50.751	3.105	5.876	0.92	0.103	7.678	0.221	4.116	6.936	4.48	99.105
PV1116	15.431	64.307	3.293	5	0.574	0.069	3.904	0.189	4.027	1.592	1.37	99.756
PRC1006A	5.786	60.624	2.435	2.944	0.175	0.021	16.85	0.092	0.661	0.622	9.6	99.81

PxC: pérdida por calcinación.

Litología en las muestras: #1 y 2, granitoides; #3 a 5 dique silicificado, #6 a 11 pórfido sericitizado.

Tabla 4.2. Composición química (recalculado) para condiciones anhidras en las rocas intrusivas del distrito minero de Velardeña.

<i>Muestra</i>	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	P_2O_5	Na_2O	MgO	TOTAL
	<i>% en peso</i>										
C06A	15.62	63.89	4.89	4.44	0.75	0.04	3.95	0.25	3.80	2.35	100.00
C12H	15.08	64.51	2.45	7.07	0.57	0.03	4.68	0.19	3.60	1.81	100.00
C08J	6.08	47.23	0.06	42.11	0.22	0.09	1.94	0.11	0.14	2.02	100.00
V178H	14.25	70.35	3.00	5.63	0.45	0.11	3.12	0.20	0.94	1.94	100.00
V97L	12.09	77.30	8.56	0.55	0.05	0.01	0.70	0.04	0.30	0.42	100.00
V102N	16.01	69.81	10.91	0.42	0.28	0.01	0.77	0.13	0.58	1.08	100.00
VE200X	7.83	47.63	4.26	37.37	0.02	0.11	1.55	0.04	0.50	0.69	100.00
PV09163	14.83	71.53	5.69	2.15	0.29	0.02	0.39	0.11	4.14	0.85	100.00
PV0708	15.77	53.63	3.28	6.21	0.97	0.11	8.11	0.23	4.35	7.33	100.00
PV1116	15.68	65.36	3.35	5.08	0.58	0.07	3.97	0.19	4.09	1.62	100.00
PRC1006A	6.41	67.20	2.70	3.26	0.19	0.02	18.68	0.10	0.73	0.69	100.00

rocas alcalinas y subalcalinas. Las rocas de afinidad subalcalina, concretamente las muestras de que corresponden al área de Antares, grafican en el campo de la serie calcialcalina, y composicionalmente se clasifican como granitos y granodioritas, con un contenido de SiO_2 de 69.81"77.30 % y de álcalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) de ~4"12 %.

Mientras que las rocas correspondientes al área de Reyna de Cobre muestran un contenido de SiO_2 de 63.89"67.20 % y de álcalis de ~3"7 %, lo que corresponde composicionalmente a dioritas y granodioritas.

La diferencia entre los datos presentados por Gilmer y colaboradores (1988) obedece a varios factores, por una parte, en su estudio solo se reportan dos muestras analizadas, ambas alteradas y procedentes del domo de Santa María; por otra parte, este estudio aporta nuevos datos de los cuerpos intrusivos del área de

Reyna de Cobre, lo que se expresa como una mayor dispersión de la composición de la muestra producto de las diferencias (aunque menores) entre los magmas que dieron origen a los cuerpos intrusivos en ambos sectores del área de estudio. Todas las muestras son asociadas a un contexto orogénico (Figura 4.2).

Con los datos de la Tabla 4.2, una vez que se han descartado los datos que no son factibles a representar, por los motivos que ya se han expuesto, se presenta en la Figura 4.2 un diagrama ternario AFM (álcalis [$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$], óxidos de Fe total [$\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$] y MgO). El uso más común para el diagrama AFM es distinguir entre tendencias de diferenciación toleíticas y calcialcalinas en las serie magmática subalcalina.

Los datos presentados en la Figura 4.2 muestran que los cuerpos intrusivos analizados pertenecen a la serie calcialcalina.

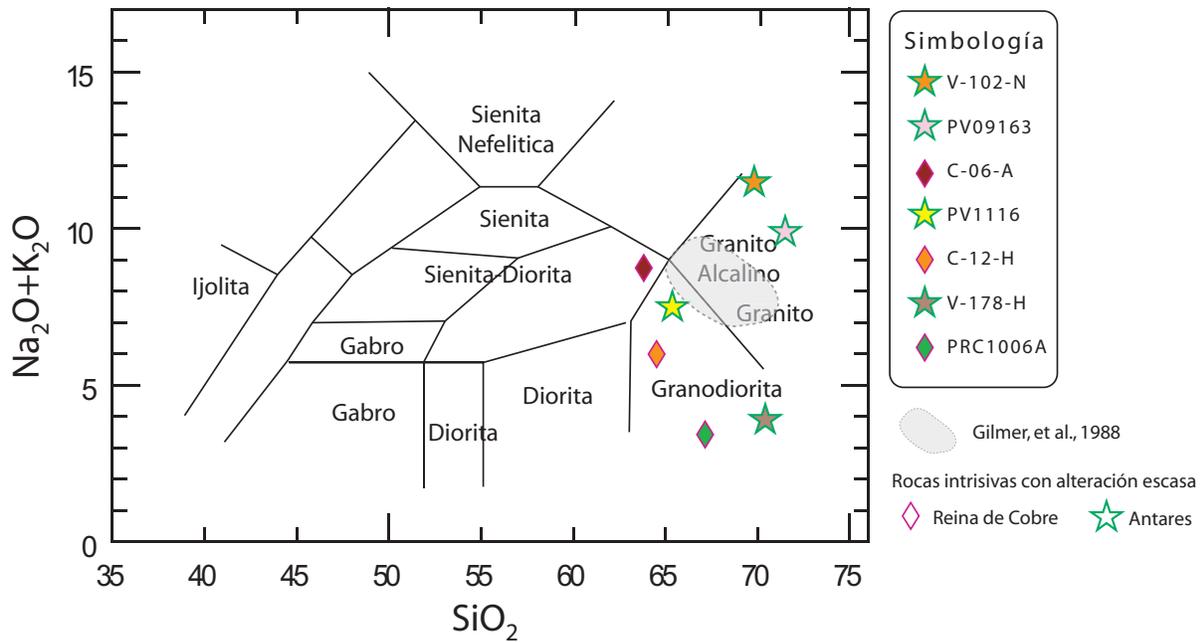


Figura 4.1. Diagrama TAS adaptado por Wilson (1989) para rocas plutónicas, donde se muestra la variación composicional de las rocas analizadas de Velardeña. La zona sombreada delimitada por una línea punteada muestra el campo de las muestras reportadas por Gilmer *et al.* (1988). Las estrellas corresponden a rocas del área de Antares, mientras que los rombos corresponden a muestras de Reyna de Cobre.

Por otra parte, la clasificación con base en la saturación de alúmina de Maniar y Piccoli (1989) permite distinguir tres grandes grupos: 1) granitoides peraluminosos; es decir, saturados en Al_2O_3 , 2) metaluminosos; es decir, subsaturados en Al_2O_3 , y 3) peralcalinos con concentración molar $(K_2O + Na_2O)/Al_2O_3 > 1$. Para esta clasificación, Chappell y White (1974) desarrollaron una metodología mediante la cual se determina el Índice de Saturación en Alúmina (ASI), a través de la conversión molar de $Al_2O_3/(CaO+NaO+K_2O)$ (Tabla 4.3).

De acuerdo a lo antes expuesto, las rocas con $ASI > 1.0$ se denominan peraluminosas Si $ASI > 1.0$ y $Na+K < Al$ se trata de rocas metaluminosas. Si $ASI < 1.0$ y $Na+K > Al$, las rocas son peralcalinas (Zen, 1985). El ASI es predominantemente determinado por dos factores: por una

parte, el proceso de fusión y, por otra parte, la composición de la fuente magmática (Figura 4.3).

Dos de las muestras de los granitoides de Antares grafican en el campo de las rocas peraluminosas, Estas rocas contienen más aluminio del que pueden incluir los feldespatos, por lo que, y de acuerdo con la petrografía observada en estas rocas, las fases mineralógicas en donde se distribuye la alumina pueden ser biotita, granate o algún polimorfo de aluminosilicatos. De acuerdo con Clark (1992), los magmas peraluminosos se forman por la fusión hidratada de rocas máficas, o bien, por fusión de rocas pelíticas o semipelíticas.

Por otra parte, el resto de las muestras, tanto de Antares como de Reyna de Cobre, grafican en el campo de las rocas metaluminosas, en las cuales los minerales

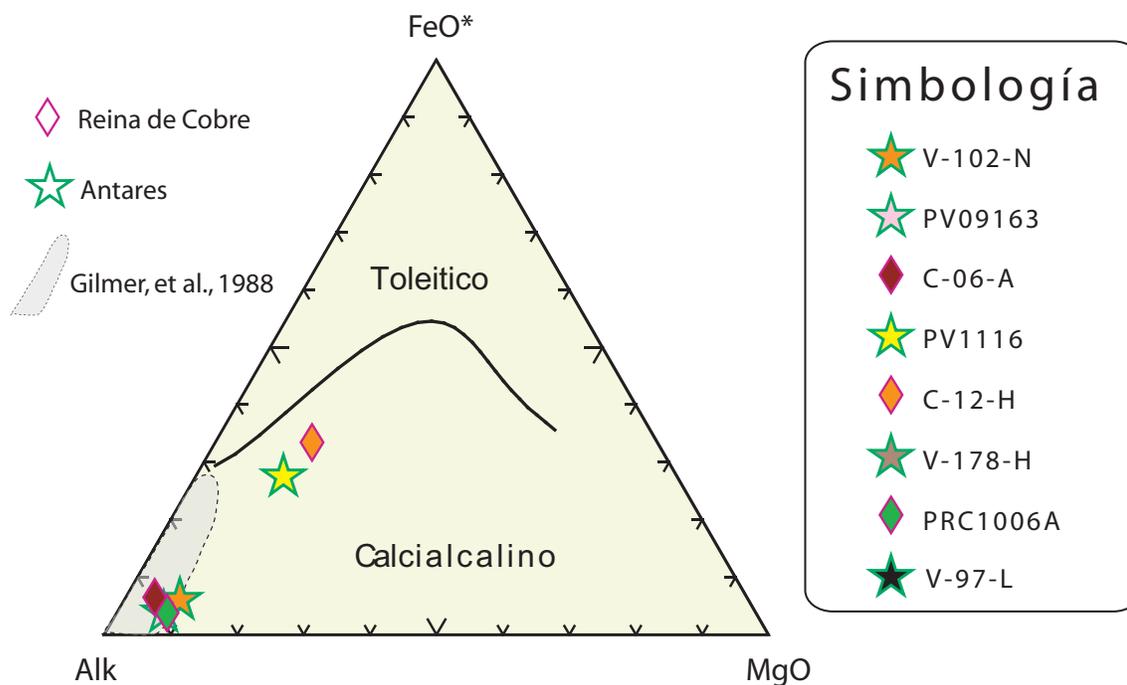


Figura 4.2. Diagrama AFM (Irvine y Baragar, 1971) para el área de Velardeña, mostrando los campos de la serie toleitica y la calcicalalina. La zona sombreada delimitada por una línea punteada corresponde a las muestras reportadas por Gilmer *et al.* (1988). Las estrellas representan las muestras analizadas en el área de Antares, mientras que los diamantes representan a la zona mineralizada de Reyna de Cobre. Todos los análisis caen en el campo de la serie magmática calcicalalina.

Tabla 4.3. Datos recalculados de elementos mayores en peso molecular (mol) para la determinación del ASI de acuerdo con Chappell y White (1974).

Muestra	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MgO
	<i>Mol</i>									
C06A	0.1532	1.0634	0.0519	0.0792	0.0118	0.0011	0.0247	0.0018	0.0613	0.0584
C12H	0.1479	1.0736	0.0260	0.1261	0.0090	0.0008	0.0293	0.0014	0.0582	0.0449
V178H	0.1398	1.1709	0.0319	0.1004	0.0070	0.0027	0.0196	0.0014	0.0152	0.0482
V97L	0.1185	1.2865	0.0909	0.0098	0.0007	0.0002	0.0044	0.0003	0.0048	0.0104
V102N	0.1571	1.1618	0.1158	0.0075	0.0044	0.0002	0.0049	0.0009	0.0094	0.0268
PV09163	0.1455	1.1904	0.0605	0.0384	0.0045	0.0004	0.0025	0.0007	0.0667	0.0211
PV1116	0.1538	1.0878	0.0355	0.0906	0.0091	0.0017	0.0248	0.0014	0.0660	0.0401
PRC1006A	0.0629	1.1185	0.0287	0.0582	0.0030	0.0006	0.1170	0.0007	0.0118	0.0171

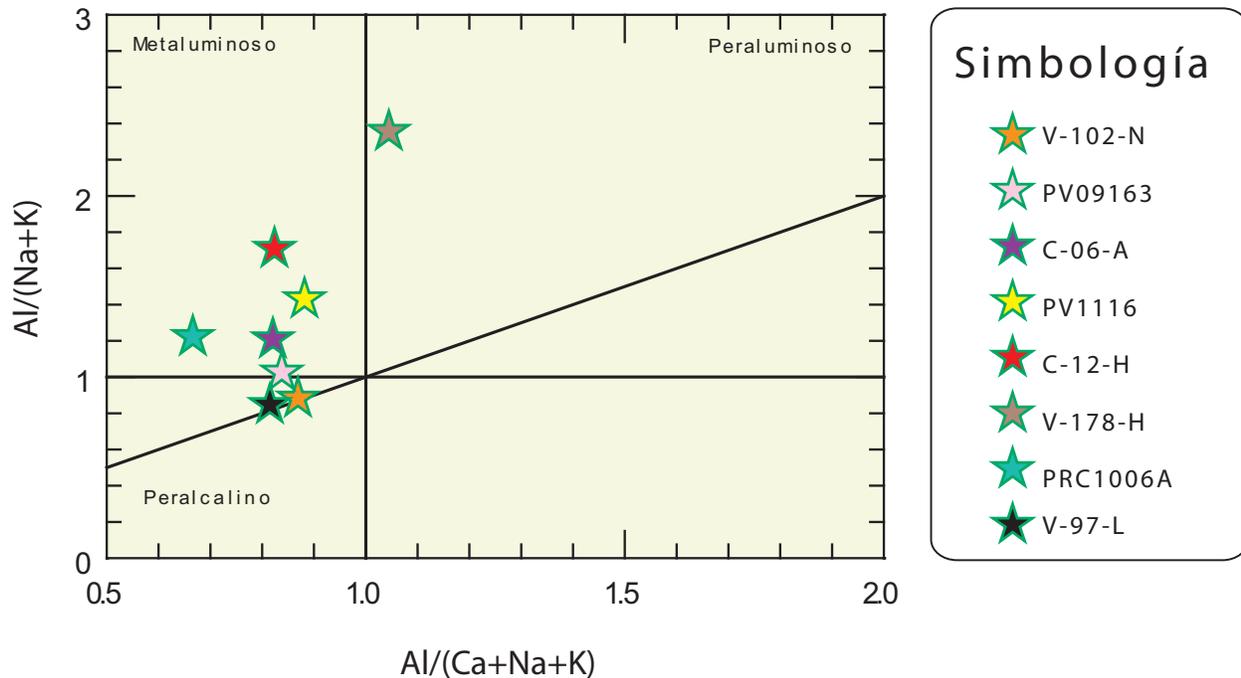


Figura 4.3. Diagrama de saturación en alúmina de granitoides (Maniar y Piccoli, 1989). Las estrellas representan las muestras analizadas en el área de Antares, mientras que los diamantes representan a la zona mineralizada de Reina de Cobre.

característicos son: biotita, hornblenda, piroxeno, epidota, apatito y zircón. Estas derivan de rocas ígneas máficas e intermedias, por procesos de fusión parcial y cristalización fraccionada de magmas provenientes de manto en zonas de subducción y/o fusión cortical (Clark, 1992).

Químicamente se puede discriminar entre dos tipos de granitos correspondientes a distintos orígenes (Chappell y White, 1974): (a) el “tipo I”, derivado de magmas formados por la fusión de rocas ígneas, y (b) el “tipo S”, derivado de magmas procedentes de la fusión de rocas sedimentarias.

Para la clasificación tipológica de los granitoides de Velardeña, fue empleado el diagrama de Chappell y White (1974) ($Al_2O_3 / (CaO+NaO+K_2O)$ [ASI; en mol] vs. SiO_2). Si ASI > 1.1, se clasifica como granito tipo “S” y si el

valor es menor, la roca es considerada como granito tipo “I”. Los valores obtenidos del índice ASI son en su mayoría menores a 1.1. Esto indica una predominancia de rocas cuyo origen magmático sería de tipo ígneo (Fig. 4.4).

Solo dos muestras (V-102-N y V-97-L), correspondientes a la zona de Antares, (clasificadas como rocas peraluminosas), son afines a los granitos de tipo “S”, lo que podría explicarse a partir de un magma híbrido formado por diversos procesos como anatexis, contaminación cortical, metasomatismo y diferenciación de un magma, o algunos de estos procesos en conjunto.

Los resultados analíticos de los granitoides de Velardeña y su clasificación concuerdan con la naturaleza y el contexto de subducción establecido regionalmente para este tipo de rocas.

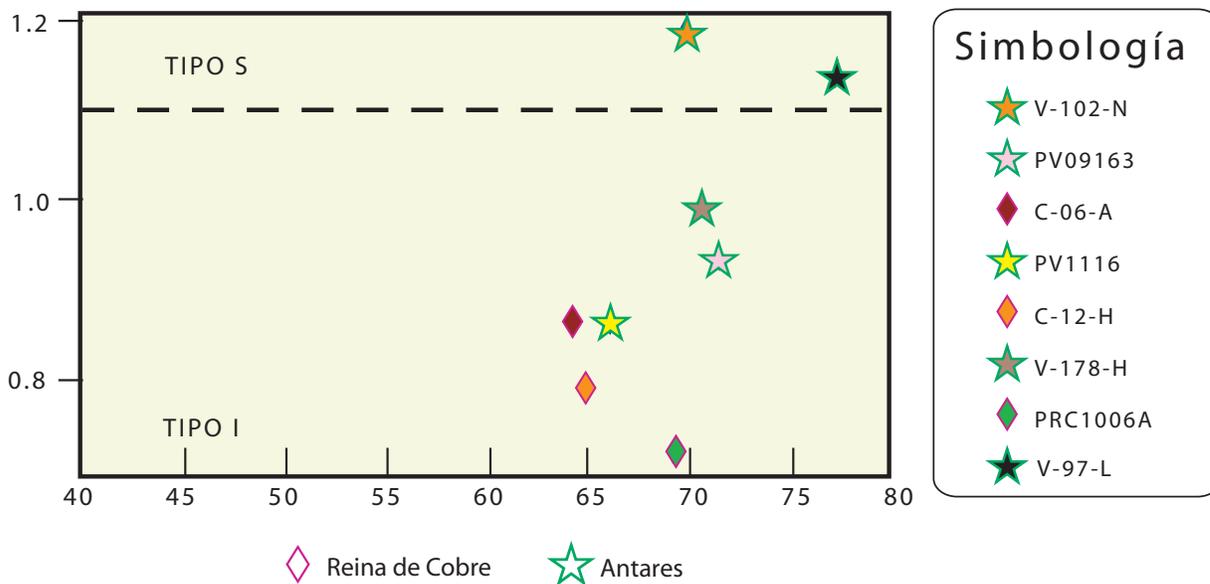


Figura 4.4. Diagrama para la tipología de granitoides (Chappell y White, 1974).

Capítulo 5

Inclusiones fluidas

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del
Skarn de Velardeña, Durango

5. Inclusiones Fluidas

5.1 Petrografía de inclusiones fluidas

El estudio de inclusiones fluidas (IF) tiene diferentes aplicaciones para la resolución de problemas geológicos, sin embargo, es el campo de los yacimientos minerales en donde esta técnica ha sido más desarrollada.

En este trabajo, el análisis de IF se realizó con la intención de conocer las características microtermométricas de los fluidos mineralizantes; dicho análisis se llevó a cabo en el Centro de Geociencias, campus Juriquilla de la UNAM.

Después de haber realizado un estudio petrográfico convencional de las asociaciones minerales, así como de las diversas fases minerales de la sílice, es necesario llevar a cabo un estudio petrográfico de las diversas *asociaciones de IF* presentes.

La petrografía convencional lleva al establecimiento de una secuencia paragenética, con una identificación del tiempo relativo de formación de eventos y micro-eventos de mineralización, esta secuencia permite ubicar en un marco

Tabla 5.1. Características de las muestras seleccionadas para el estudio de inclusiones fluidas (IF) del yacimiento de Velardeña.

Antares		
Consecutivo	Muestras Laboratorio	Descripción
1	V-18-E	Veta de calcita y sulfuros bandeados
2	V-36-C	Veta de cuarzo con esfalerita, pirita, calcopirita, arsenopirita y galena
3	V-81-S	Veta de calcita en zona de brecha silicificada
4	V-122-F	Veta de calcita
5	V-129-G	Veta de calcita y esfalerita
6	VE-02-AD	Skarn con sulfuros, esfalerita y cuarzo
7	VE-122-Z	Skarn con granates
8	VE-200-T	Veta de calcita con sulfuros
9	I-01-A	Veta de fluorita
10	VW-158-AB	Veta de fluorita
Reyna de Cobre		
1	C-02-E	Veta de esfalerita
2	C-04-F	Esfalerita y cuarzo con sulfuros
3	C-07-M	Veta de cuarzo y calcita con sulfuros
4	C-23-N	Granates

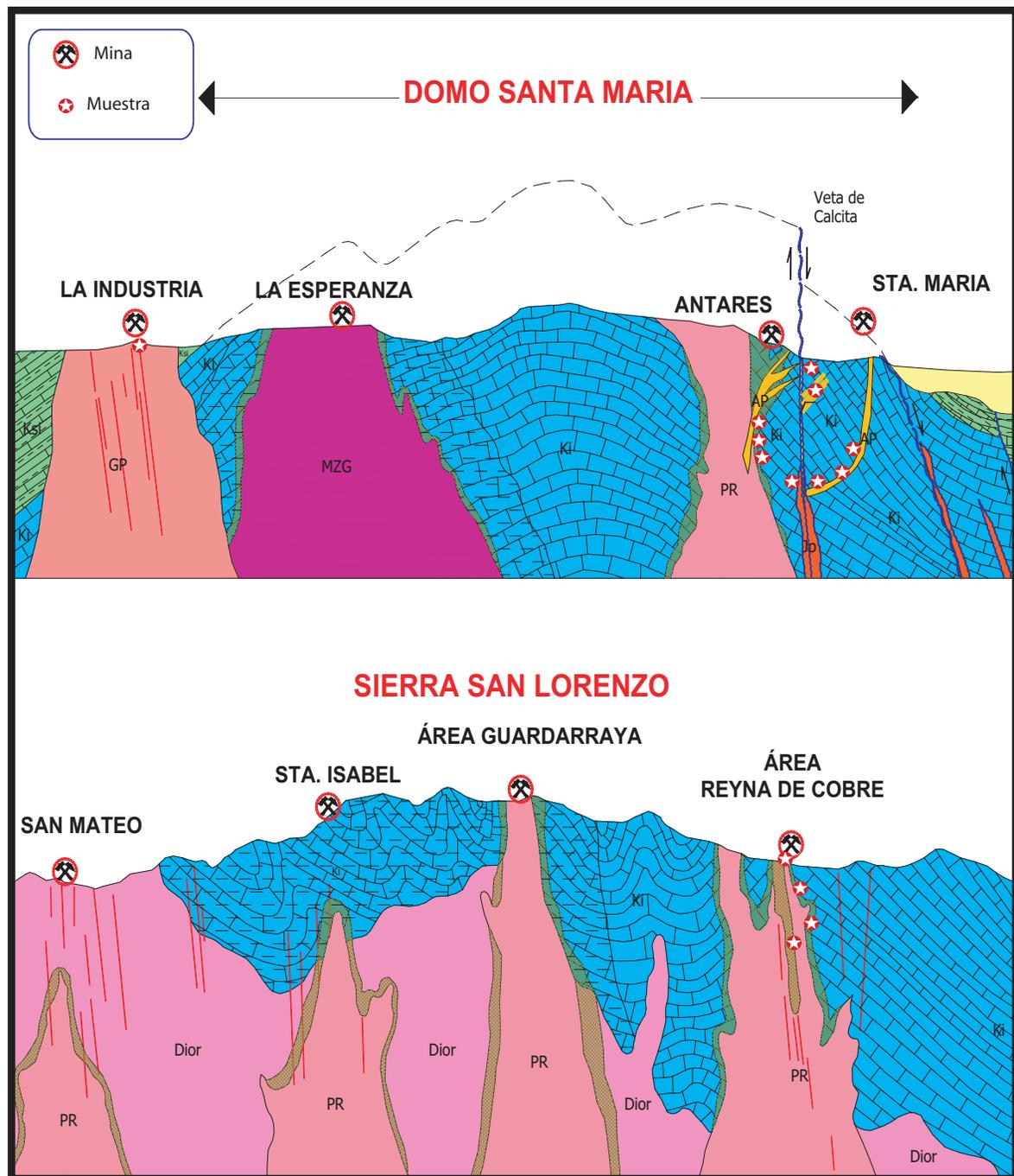


Figura 5.1. Secciones esquemáticas del yacimiento de Velardeña. Arriba se encuentra representada el área de Antares, donde se aprecia el stock en contacto con calizas y las zonas mineralizadas (skarn). Abajo se presenta el área de Reyna de Cobre. Las estrellas blancas en círculos rojos representan las muestras colectadas. Ki = calizas del Cretácico Inferior, Ksi = calizas del Cretácico Superior, GP = granito porfídico, MZG = monzogranito, PR = pórfido riolítico (granito porfídico), Ap = aplita (pórfidos félsicos), Dior = diorita, Jp = jaspe. Con información proporcionada por PEÑOLES.

temporal los fenómenos geológicos asociados a la precipitación de los minerales que la componen, lo cual incluye el atrapamiento de IF.

La petrografía de IF tiene el mismo fin, es decir, la definición y ordenación relativa de eventos, aunque a micro-escala. Sin embargo, la petrografía de IF, al enfocarse a texturas y morfologías intra-cristalinas, posee ciertas particularidades. Los objetivos básicos de la petrografía de IF pueden resumirse como la determinación de la presencia y las relaciones espaciales de asociaciones o grupos discretos genética, temporal y estadísticamente significativos de IF con los minerales que las contienen (Goldstein y Reynolds, 1994). En cualquier caso de estudio, las familias o asociaciones de IF (FIA, por sus siglas en inglés) deben entenderse como las unidades básicas del estudio petrográfico y microtermométrico. De este modo, los aspectos morfológicos y geométricos de las FIA son elementos de discusión de los datos microtermométricos, tanto en lo referente a las IF individuales como a las asociaciones de éstas. Los aspectos petrográficos más importantes para cualquier estudio de IF son los siguientes:

(a) componentes constitutivos o fases de las IF (fase vapor, líquidos de diversos tipos, vidrio, mineralogía de cristales atrapados e hijos),

(b) grado de relleno, i.e., relación entre el volumen de los componentes y el líquido en las inclusiones,

(c) los criterios para la determinación de tipos petrográficos de IF: primario (p), secundario (s) y pseudosecundario (ps), y

(d) la presencia y naturaleza de modificaciones post-atrapamiento, etc.; la determinación de algunos procesos de precipitación mineral y del tipo de atrapamiento de las inclusiones fluidas cogenéticas, bien sea a partir de un medio homogéneo o de uno heterogéneo (por desmezcla de líquidos, soluciones en ebullición o efervescencia,

presencia de sólidos suspendidos y/o existencia de una solución saturada).

Estos aspectos son los que condicionan la selección de FIA para la caracterización microtermométrica y son los que permitirán interpretar correctamente los datos derivados de dicho estudio.

Los estudios de inclusiones fluidas son escasos en depósitos tipo skarn, en comparación con los existentes para otros tipos de yacimientos (e.g. epitermales) sin embargo, algunos autores se han dado a la tarea de estudiar los fluidos en estos ambientes, la recopilación más completa es la realizada Kwak en 1986, o datos se consignan en Einaudi et al. (1981), Meinert (1998) y Newberry (1998). La falta de información se debe a lo pequeño y escaso de las inclusiones primarias en este tipo de yacimientos. Sin embargo, existen en México casos exitosos de estudio sobre inclusiones secundarias (Levresse y González-Partida, 2003; Canet et al., 2009b).

En el yacimiento de Velardeña se analizaron inclusiones fluidas en cristales de cuarzo y de calcita de la zona de Antares, y en Reyna de Cobre, cristales de granate, clinopiroxeno, fluorita y esfalerita. Para esta última zona mineralizada, además, el estudio se complementó con información previa (González-Partida, 1994).

Las características del muestreo se presentan en la Tabla 5.1. En el área de Antares fueron analizadas 10 muestras, mientras que en la de Reyna de Cobre se analizaron 4 muestras que, como se mencionó con anterioridad, fueron complementadas con datos obtenidos por González Partida (1994) con anterioridad a este estudio.

Las inclusiones analizadas en estas muestras corresponden a los minerales constituyentes del skarn de Velardeña. En la Figura 5.1 se muestra una sección esquemática donde se ubican las muestras recolectadas; dicho muestreo se llevó a cabo en los principales cuerpos mineralizados que forman mantos y brechas mineralizadas.

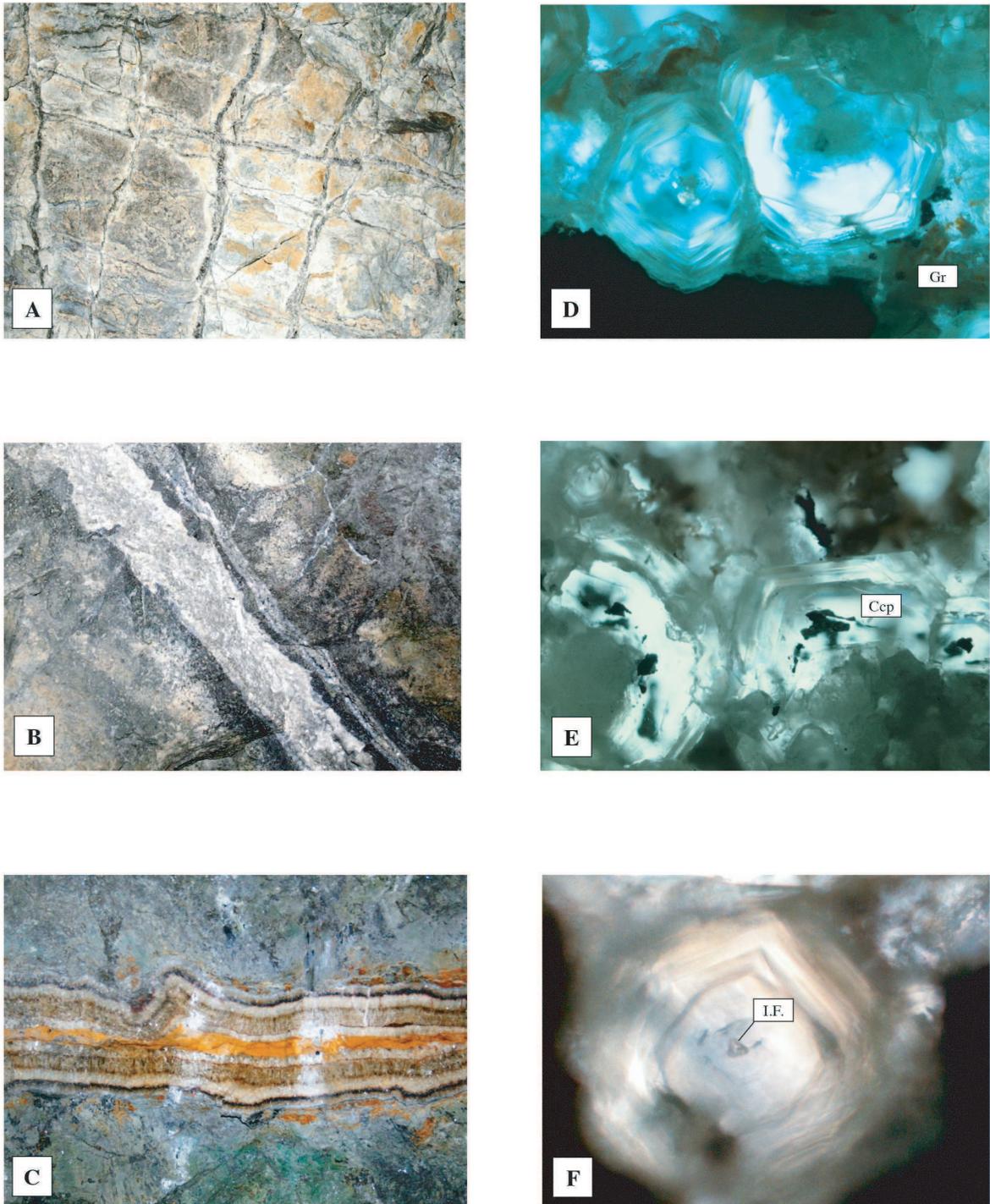


Figura 5.2. Área de Antares. (A) Stockwork en el dique (endoskarn). (B) y (C) Vetas mineralizadas con textura “coccarda”-bandeada (última etapa de mineralización metálica). (D) Granates cementados por mineralización de Zn-Cu. (E) Detalle de un granate, que en su última fase de crecimiento presenta mineralización de calcopirita (Ccp). (F) Inclusión fluida (I.F.) en granate cálcico.

Por otra parte, en las Figuras 5.2 y 5.3 se presentan las muestras, tanto de Antares como de Reyna de Cobre, a diferentes escalas, tanto a nivel de afloramiento como en los minerales al microscopio y las IF analizadas en los mismos.

5.2 Microtermometría

Según Roeder (1984), el estudio de IF provee información para la resolución inmediata de problemas en cuanto a exploración minera, y además proporciona información para el entendimiento de las condiciones físicas y químicas de los depósitos minerales.

El análisis microtermométrico basado en la diferenciación de FIA fue inicialmente propuesto por Sorby (1858); desde entonces los datos geotermométricos se han utilizado para numerosas investigaciones.

Del estudio de IF se obtienen cuatro tipos fundamentales de información en cuanto a temperatura se refiere: T_e = temperatura eutéctica del sistema, T_F = temperatura de fusión del último cristal de hielo dentro de la inclusión, T_H = temperatura de homogeneización de fases y T_S = temperatura de solubilización de otros sólidos (cristales) dentro de la inclusión (e.g. halita). Generalmente, en IF acuosas se observan estos parámetros.

La T_F es la temperatura a la cual el último cristal de hielo en una inclusión previamente congelada desaparece. Por convención, la salinidad es calculada a partir de la T_F asumiendo que el fluido solo contiene agua y NaCl.

El análisis a altas temperaturas se fundamenta en homogeneizar las diferentes fases presentes a medida que se eleva la temperatura, así como obtener información sobre la temperatura de decrepitación (explosión) de la inclusión.

Como se mencionó anteriormente, previo al análisis microtermométrico se realizó una observación petrográfica para definir el carácter primario de los fluidos; en Antares fueron analizados cristales de cuarzo, calcita y fluorita, mientras que en Reyna de Cobre los minerales fueron: calcita, cuarzo, granate, clinopiroxeno, epidota, fluorita y esfalerita.

Las IF analizadas fueron las que, de acuerdo con los criterios de Roeder (1984), presentaban evidencias de ser de origen primario (p). En calcita fluorita, esfalerita y cuarzo, las IF primarias resultaron ser abundantes, mientras que clinopiroxeno y granate fueron escasas. Las Figuras 5.4 y 5.5 muestran, a manera de ejemplo, el tipo de IF observadas y su localidad.

De acuerdo con la secuencia paragenética mineral previamente establecida, se ha constatado una evolución de los fluidos mineralizantes desde la fase progradante inicial (en clinopiroxeno, fluorita, granates, calcita y cuarzo), con fluidos del tipo líquido+vapor (L+V), hasta fluidos multi-componente saturados, L+V+S (en ganga de calcita, fluorita y mena de esfalerita), correspondientes a la etapa retrograda y posteriormente a la formación de vetas. En varias muestras se observó la presencia de CO_2 , pero solo a través del comportamiento criométrico con la formación de clathratos.

En la Tabla 5.2 se presenta un resumen de la información microtermométrica para ambas áreas mineralizadas, mientras que el Anexo 4 contiene los resultados detallados y en su totalidad.

En relación con la paragénesis mineral, se observa una evolución de los fluidos, desde: (a) fluidos L+V producidos durante una fase temprana (skarn progradante) representada por los clinopiroxenos y granates cálcicos, y (b) por cristales de fluorita-epidota y cuarzo (inicio del skarn retrogradante), hasta (c) fluidos saturados L+V+S (NaCl), asociados a la precipitación de los sulfuros y a la formación tardía de vetas (y relleno intersticial). Las

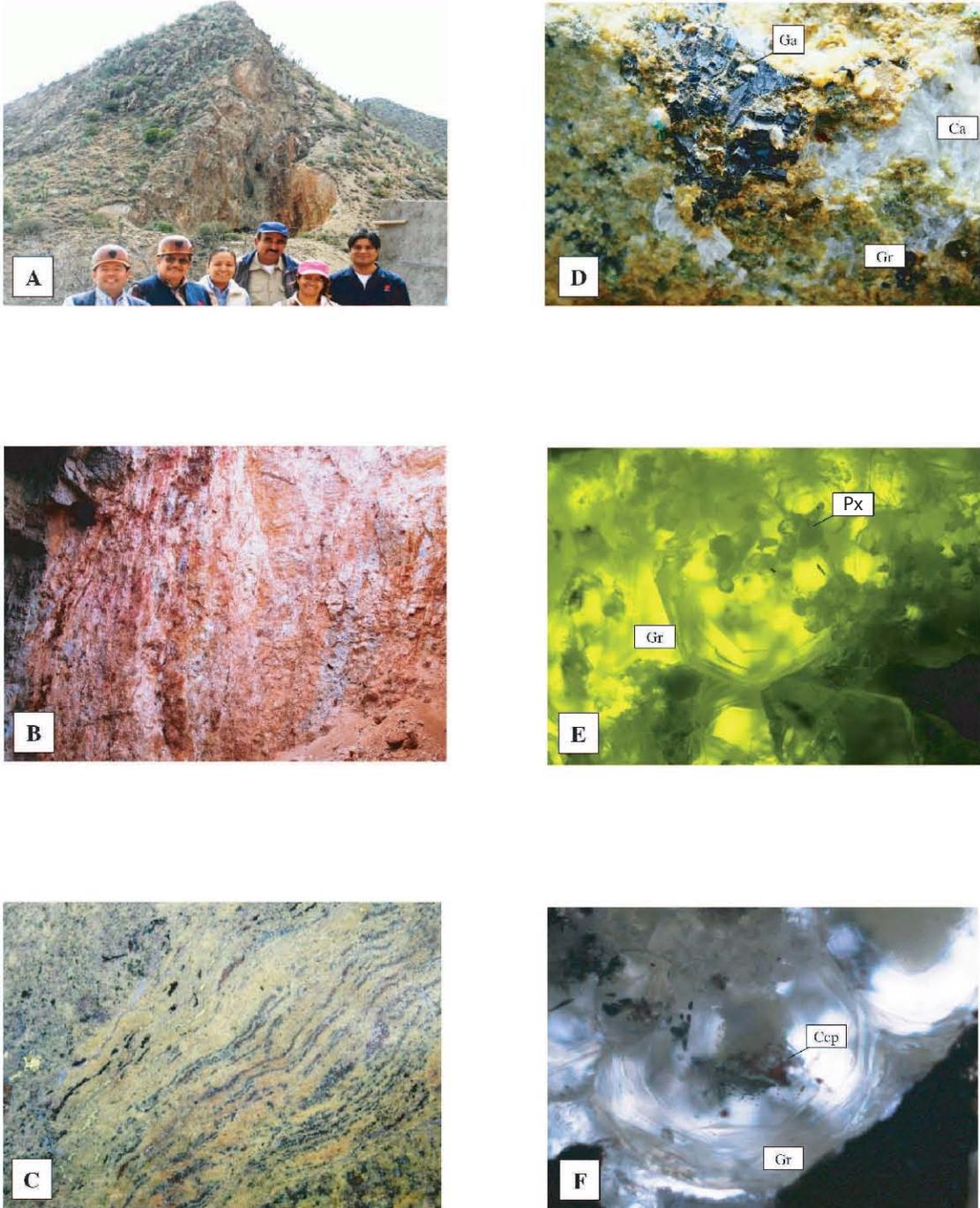


Figura 5.3.-Área de Reyna de Cobre. **(A)** Bocamina del cuerpo de Reyna de Cobre. **(B)** Bandas de ganga y mena en el respaldo del dique, afectadas por una oxidación tardía. **(C)** Granate y mineralización en bandas. **(D)** Detalle de la mena de Pb (Ga = galena) y calcita (Ca) relleno de espacios vacíos dejados por los cristales de granate (Gr). **(E)** Granates (Gr) poiquilíticos con inclusiones de piroxeno cálcico (Px). **(F)** Granate (Gr) intercrecido con calcopirita (Ccp).

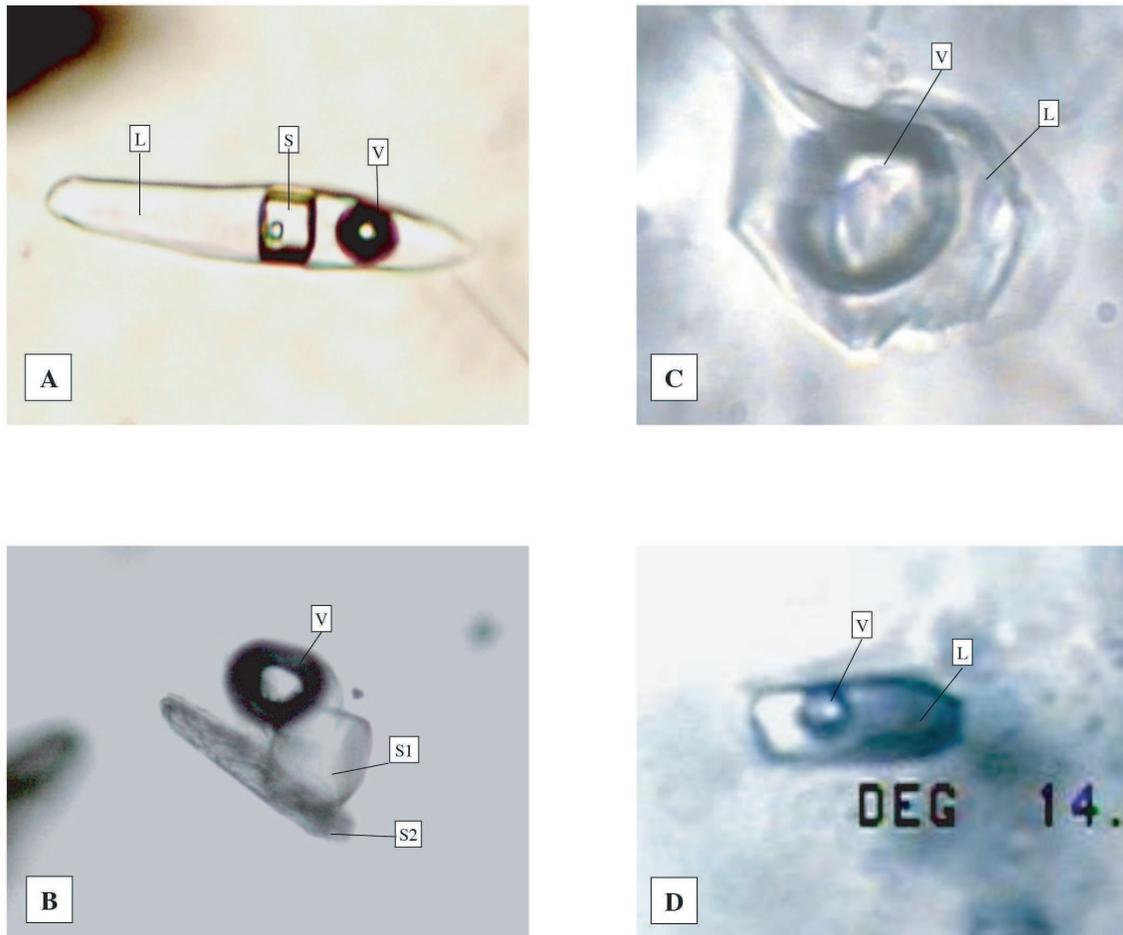


Figura 5.4. Microfotografías de inclusiones fluidas analizadas en el área de Antares. (A) y (B) Inclusiones fluidas multifásicas con NaCl (S1), mineral atrapado (S2), líquido (L) y vapor (V). (C) y (D) Inclusiones fluidas que contienen fluidos subsaturados bifásicos a L+V. LN 10x2x40.

características de los fluidos más tardíos son reveladas por las IF en calcita, fluorita y esfalerita de las vetas.

Los ensayos a baja temperatura resultaron en una distribución multimodal de la T_F , diferenciándose claramente tres modas (Figura 5.6):

(a) Uno muy significativo para las dos áreas entre -14° y -15° C (17"18 % NaCl eq.), concordante con las salinidades típicas de los yacimientos de tipo skarn, mayor a 15%, de acuerdo con Megaw (1998).

(b) otro entre -18° y -19° C (22"23 % NaCl eq.), que representaría una salmuera

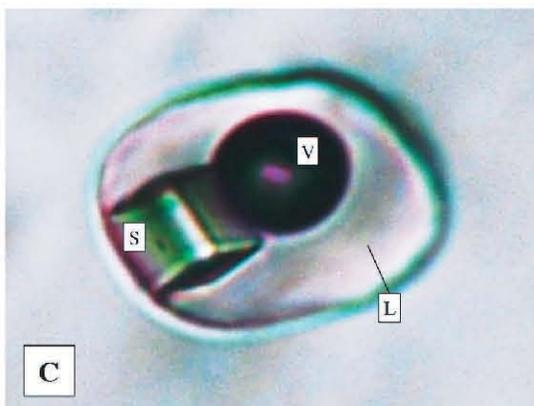
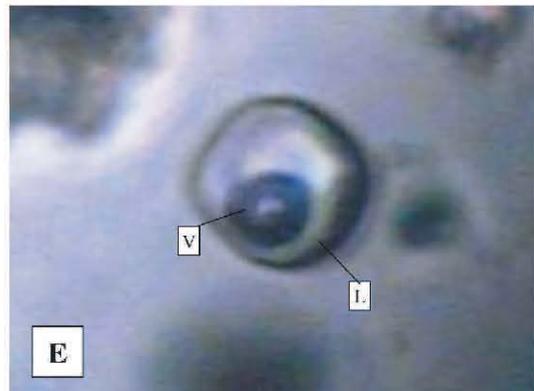
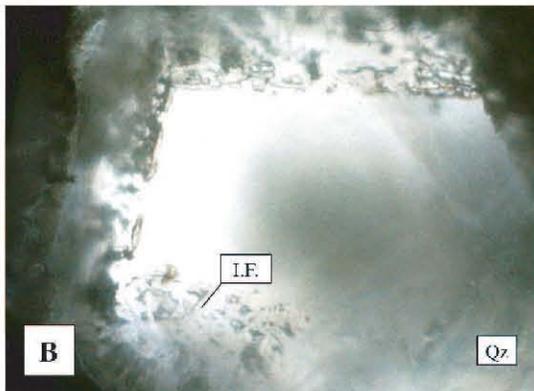
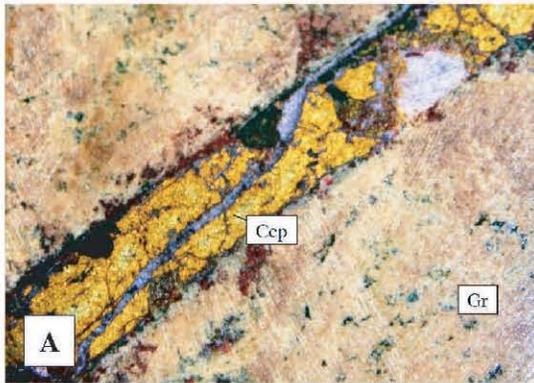


Figura 5.5. Muestras analizadas correspondientes al área de Reyna de Cobre. (A) Vetilla de calcopirita (Ccp) y calcita encajonada en skarn de granates (Gr). (B) Cuarzo con microzonamiento de asociaciones de inclusiones fluidas primarias. (C) y (D) Detalle de IF saturada a S = NaCl, V = vapor, y L = líquido. (E) y (F) Inclusiones subsaturadas a L+V. 10x2x40 LN.

Tabla 5.2. Resumen de los datos microtermométricos obtenidos del análisis de inclusiones fluidas (los resultados detallados se presentan el Anexo 4).

#	muestra	mineral	n	T _{FF} (°C)			Salinidad (% NaCl eq.)			T _H (°C)		
				max.	mix.	prom.	min.	max.	prom.	min.	max.	prom.
1	V-36-C	Q	9	-14.0	-14.0	-14.0	18	18	18	130	138	134
2	V-81-S	Cc(1)	16	-18.0	-23.0	-20.0	30	33	32	400	458	413
3	V-81-S	Cc(2)	17	-18.0	-21.0	-19.5	21	23	22	120	184	148
4	V-129-6	Cc	18	-13.0	-19.8	-14.4	17	21	18	289	420	343
5	V-02-AD	Cc	13	-7.0	-15.5	-12.4	11	19	16	230	268	250
6	VE-200-T	Cc	11	-11.0	-16.0	-13.5	15	19	17	365	468	413
7	VE-200-T	Fl	10	-11.0	-15.4	-13.4	15	18	17	300	420	377
8	VW-158-AB	Cc	18	8.1	6.1	7.2		CO ₂		144	179	156
9	C-02-E	Cc	32	-16.8	-21.0	-17.6	20	23	21	288	346	324
10	C-02-E	Sp	10	-17.0	-20.0	-18.9	20	22	22	170	196	186
11	C-02-E	Grt	11	-13.0	-18.0	-14.9	17	21	19	337	376	352
12	C-04-F	Cc	11	-13.0	-14.9	-13.7	17	19	18	240	256	249
13	C-04-F	Sp	8	-12.0	-14.0	-13.1	16	18	17	310	390	345
14	C-07-M	Cc	21	-10.8	-14.0	-12.5	15	18	16	236	286	260
15	C-07-M	Q	12	-17.7	-21.0	-19.9	21	23	22	296	334	318
16	RC-N9 # 5	Q	28	-14.5	-14.5	-14.5	18	18	18	395	400	376
17	RC-N9 # 5	Cc	15	-22.0	-35.0	-27.5	32	40	35	260	480	370
18	RC-N9 # 5	Sp	10	-	-	-	-	-	-	390	418	400
19	RC-N8#6	Cc(2)	15	-12.0	-12.0	-12.0	16	16	16	259	295	269
20	RC-bno 718	Ep	2	-	-	-	-	-	-	380	381	380.5
21	RC-N6#3	Grt	14	-	-	-	-	-	-	550	640	585
22	RC-N7#4	Cc	3	-8.7	-8.7	-8.7	13	13	13	295	300	297
23	RC-N5#5	Cc(1)	8	-8.0	-13.3	-9.9	12	17	14	290	390	340
24	RC-N5#5	Cc(2)	16	-23.2	-29.2	-24.8	33	36	34	295	306	299
25	RC-N5#1	Cc(1)	20	-4.5	-9.5	-5.2	7	13	8	232	297	269
26	RC-N5#2	Cc	4	-4.2	-14.7	-10.2	7	18	14	220	244	229
27	RC tunel #1	Cc	18	-21.0	-26.0	-23.4	31	35	34	234	353	315
28	RC tunel #2	Q	23	-6.9	-6.9	-6.9	10	10	10	294	396	386
29	RC tunel #2	Ep	9	-14.7	-14.7	-14.7	18	18	18	375	675	455
30	RC tunel #3	Cc	20	-1.0	-7.0	-6.7	2	11	10	284	388	370
31	RC tunel #3	Q	22	-8.8	-8.8	-8.8	13	13	13	305	378	353
32	RC #7 superf	Cc	7	5.0	1.3	3.3		CO ₂		100	148	120

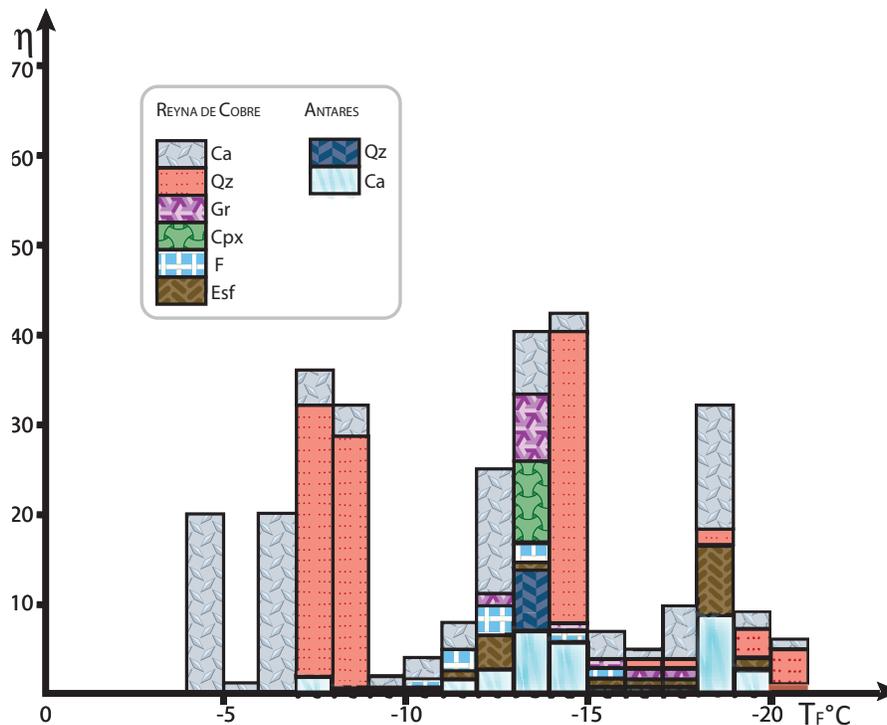


Figura 5.6. Histograma de los resultados microtermométricos a baja temperatura del distrito minero de Velardeña (Antares y Reyna de Cobre). Donde: Ca = calcita, Qz = cuarzo, Gr = granate, Cpx = clinopiroxeno, F = fluorita, Esf =esfalerita, T_F °C = temperatura de fusión final del hielo.

al límite de la saturación, formada, probablemente, como un fluido residual a partir de ebullición, y

(c) un tercero entre -5° y -8° C (7"1 1 % NaCl eq.), que sugiere un fluido tardío en proceso de dilución.

En la Figura 5.7 se presenta un histograma que muestra la distribución de las T_H de las IF previamente analizadas a baja temperatura. De manera general, se observa que los granates y los clinopiroxenos se formaron a altas temperaturas (T_H de 530 - 600° C), mientras que la mineralización metálica se relaciona con T_H de 460 - 240° C (con un pico a los $\sim 400^\circ$ C), y el proceso termina con un evento más frío (T_H de 100 - 200° C) que coincide con los valores más bajos de salinidad.

Para los fluidos saturados, correspondientes a IF de tipo S+L+V, se han determinado dos tipos de datos:

(a) Temperatura de solubilización del cubo de sal (T_{SNaCl}), y

(b) Temperatura de homogenización (T_H).

Los resultados han sido proyectados en un diagrama T_{SNaCl} vs. T_H (Fig. 5.8), en el que se aprecia una tendencia al enfriamiento de la salmuera una vez que ésta ha sufrido ebullición.

La mayoría de estas IF presentan T_{SNaCl} de 200 " 250° C y T_H de 420 " 250° C, (Fig. 5.8). En la gráfica también se observa que en la mayoría de los datos, para cada muestra, se definen un enfriamiento progresivo, con excepción de la muestra RC-N9#5, la cual en general mantiene una T_{SNaCl} entre los 230° y los 270° C, con dos

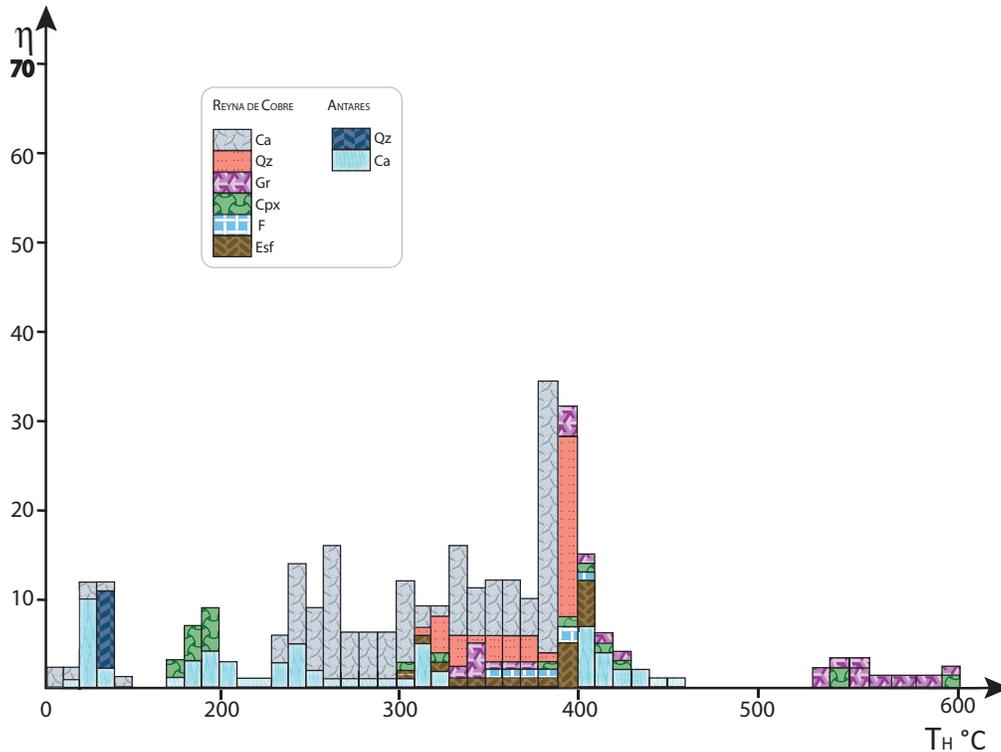


Figura 5.7. Histograma de los resultados microtermométricos a alta temperatura del distrito minero de Velardeña (Antares y Reyna de Cobre). Donde: Ca = calcita, Qz = cuarzo, Gr = granate, Cpx = clinopiroxeno, F = fluorita, Esf =Esfalerita; T_H °C = temperatura de homogeneización.

picos de 340° y 400° C, respectivamente. Por otra parte, en cuanto a la T_H, el intervalo de valores es muy amplio y va desde los 250° C hasta 500° C, la anterior observación puede ser corroborada al proyectar los valores promedio de salinidad vs. T_H (Fig. 5.9).

En la Figura 5.9 se pueden apreciar los intervalos de T_H y salinidad (promedio) de los minerales en los que fueron analizadas FIA, tanto del área de Antares como de Reyna de Cobre. En el área de Antares el intervalo de T_H se encuentra entre 130° y 420° C, mientras que la salinidad se encuentra entre 15 y 22 % NaCl eq., con un pico en 32%. En Reyna de Cobre existe mayor dispersión de los datos; el intervalo de T_H va de 185° C hasta ~500° C, y la salinidad entre 8 y 22 %, con 3 valores de mayor salinidad alrededor de 35%.

El campo indicado con la letra a reportado por Gilmer y colaboradores (1988), en este estudio queda sin datos incluidos, debido a que las condiciones analíticas no permiten medir temperaturas magmáticas (mayores a 500 °C), por otra parte, en el análisis de inclusiones fluidas solo se seleccionaron minerales correspondientes con el skarn, por lo que los minerales formados previo a este evento, tanto de los intrusivos como de las rocas encajonantes) no fueron considerados para su estudio, debido a que no están directamente ligados con el desarrollo del mismo.

En el análisis de los datos por especie mineral puede observarse que para el cuarzo la T_H varía entre 130° y 390° C y la salinidad entre 10 y 22 % NaCl eq. En cuanto a la calcita, se analizaron cristales tanto del skarn como de

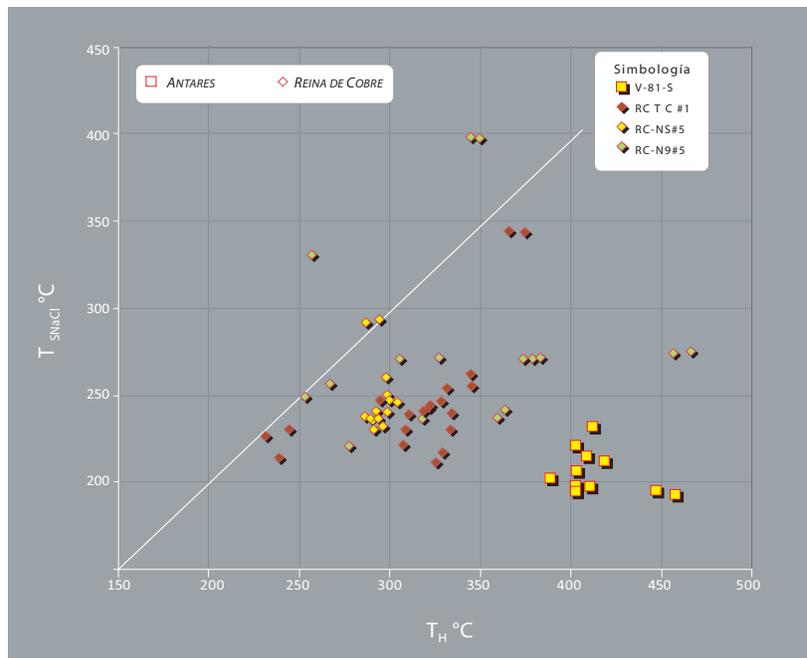


Figura 5.8. Diagrama que muestra la relación entre la temperatura de solubilización del cubo de sal y la temperatura de homogeneización de la misma inclusión (T_{SNaCl} y T_{H} , respectivamente), en calcita. Los rombos representan las muestras correspondientes de Reyna de Cobre, mientras que los cuadros corresponden a IF en muestras provenientes de Antares, la línea blanca corresponde a la bisectriz de enfriamiento.

vetas, por lo que los valores se distribuyen en un intervalo amplio; la T_{H} se encuentra entre 120° y 415° C, y la salinidad entre 10 y 35 % de NaCl eq. La esfalerita muestra dos etapas de precipitación en la primera la T_{H} es a los 345° C y salinidad de 17 % de NaCl eq. y el segundo es a los 186° C y salinidad de 21.5 % de NaCl eq.; los granates muestran una T_{H} de 352° C y salinidad de 18.5% de NaCl eq.; la fluorita una T_{H} de 377° C y salinidad de 17.1% de NaCl eq., y por último, el clinopiroxeno muestra una T_{H} de 455° C y 18.4% de NaCl eq..

Los diagramas presentados en las Figuras 5.10 y 5.11 (valores promedio) muestran los procesos señalados en los párrafos anteriores. En la Figura 5.10 se

evidencia, de manera general, una caída de presión; los valores de presión son muy consistentes para las 2 zonas. En Antares la presión va desde los 400 hasta <50 bar, en Reyna de Cobre es muy similar va desde los 500 hasta <50 bar. Respecto al cuarzo, este mineral se formó en un amplio intervalo de condiciones; por una parte se encuentra en un intervalo entre los 300 y los 100 bar, habiendo un segundo evento de precipitación a baja presión (<50 bar). La calcita es el mineral que muestra un intervalo más amplio de presión de equilibrio y va desde los 500 hasta <50 bares. La esfalerita se formó en dos estadios diferentes de presión, en una fase temprana (de mayor temperatura ~350° C), a una presión cercana a los 200 bares, y

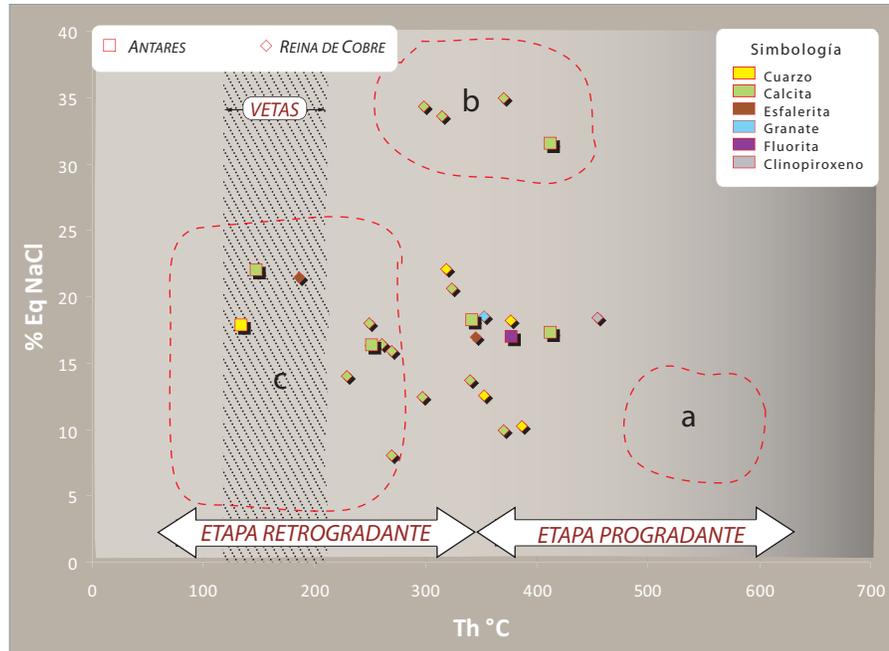


Figura 5.9. Diagrama que relaciona la salinidad (en % NaCl eq.) y la temperatura de homogeneización. Se han proyectado únicamente valores promedio (de todas las muestras analizadas). Los rombos representan las muestras correspondientes de Reyna de Cobre, mientras que los cuadros corresponden a IF en muestras provenientes de Antares. Los campos indicados con la línea discontinua roja representan los campos señalados por Gilmer *et al.* (1988): (a) etapa progradante (fluidos proto-hidrotermales); (b) etapa de precipitación de sulfuros de la etapa hidrotermal y (c) a la etapa retrogradante (fluidos epitermales-hidrotermales).

un segundo evento (a menor temperatura, <200° C), de menor presión (<50 bar) La fluorita y el granate se formaron en condiciones de presión, temperatura y salinidad similares entre si, (etapa progradante del skarn), la presión de formación de estos minerales se encuentra en un rango entre ~200 y ~300 bar; por último, el clinopiroxeno es el mineral que se forma a mayor temperatura (~500° C), y a una presión de ~500 bar.

En la Figura 5.11 se muestra la relación entre presión y temperatura de atrapamiento; en este mismo diagrama se correlacionan con estos parámetros curvas isosalinas, al graficar los valores promedios obtenidos en todas las muestras analizadas se ha definido una curva general para el yacimiento de Velardeña (curva

punteada gruesa). Por otra parte, la profundidad de formación varía respecto al mineral analizado; el clinopiroxeno se formó cerca de los 2 km de profundidad, los minerales asociados a la etapa progradante como granate, fluorita y la esfalerita asociada a este es de alrededor de 1 km, posteriormente el sistema muestra una tendencia de despresurización y dilución a profundidades someras <500 m.

Comparativamente, Antares y Reyna de Cobre son similares si se considera que, para las 2 etapas de mineralización metálica (esfalerita) y la fase tardía, los dos cuerpos presentan la misma tendencia, lo que sugiere que los fluidos mineralizantes son similares y provienen de un mismo sistema magmático.

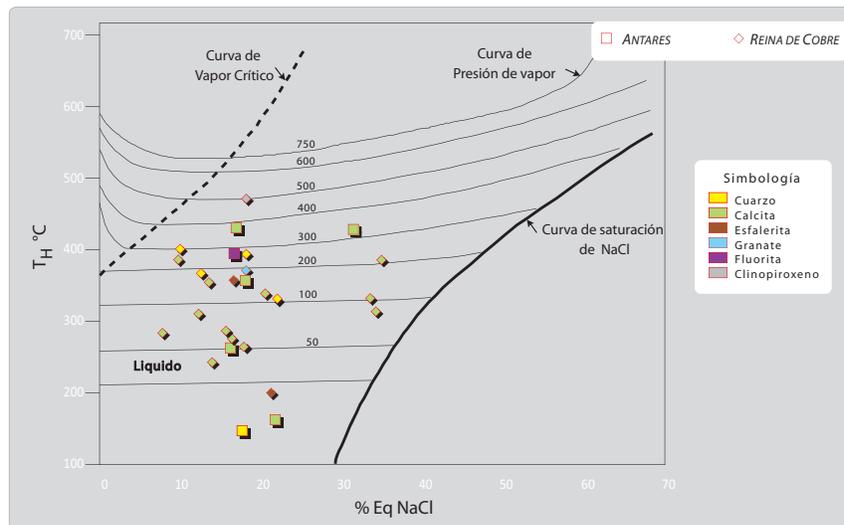


Figura 5.10. Diagrama que muestra la relación entre la temperatura de homogeneización y la salinidad, para los valores promedio de todas las muestras analizadas (T_H = temperatura de homogeneización). En el diagrama se muestran curvas de isobaras (750"50 bar). Los rombos representan las muestras correspondientes de Reyna de Cobre, mientras que los cuadros corresponden a Antares.

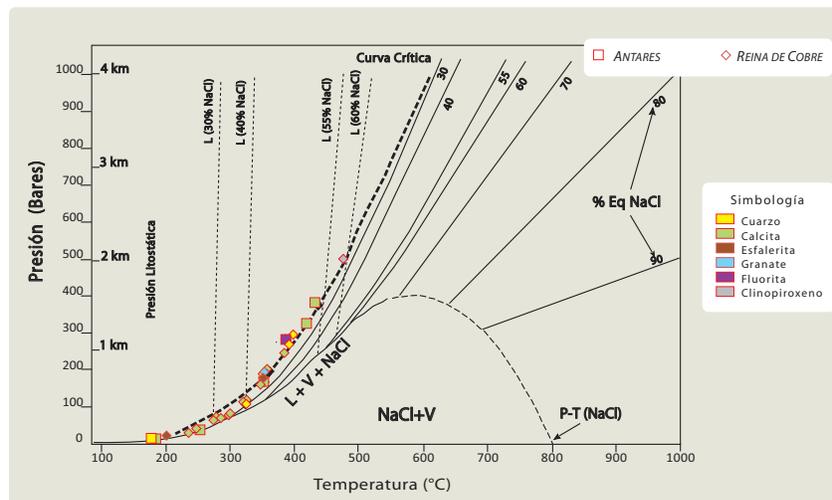


Figura 5.11. Diagrama que muestra la relación entre presión (bar) v. temperatura de homogeneización (T_H , en °C), donde los puntos proyectados corresponden a los valores promedio de las muestras analizadas en este trabajo. Los rombos representan las muestras correspondientes de Reyna de Cobre, mientras que los cuadros corresponden a Antares.

Capítulo 6

Geoquímica isotópica del azufre

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del
Skarn de Velardeña, Durango

6. Geoquímica Isotópica del Azufre

La geoquímica de isótopos de azufre tiene gran importancia en el estudio de los depósitos minerales, ya que aporta información acerca del origen de los fluidos mineralizantes y de las condiciones fisicoquímicas de los mismos. El estudio de los isótopos de azufre de un depósito mineral puede ser de gran ayuda para determinar con mayor precisión su modelo genético.

Las muestras fueron seleccionadas por las asociaciones de minerales metálicos

presentes: pirita, calcopirita, galena y esfalerita (Figura 6.1).

Los valores de $\delta^{34}\text{S}$ en las muestras analizadas aparecen en la Tabla 6.1. En la Figura 6.2 se observa que todos los valores se distribuyen en un estrecho rango, entre -0.7 y $+2.6$ ‰, a excepción de un valor de -3.9 ‰ correspondiente a un cristal de esfalerita, el valor modal es de 0.9 ‰.

Gilmer et al. (1988) analizaron muestras de sulfuros las rocas sedimentarias encajonantes, en las cuales obtuvieron valores variados algunos muy negativos de hasta -8 ‰, mientras que en otras los valores oscilaban entre 2 y 4 ‰.

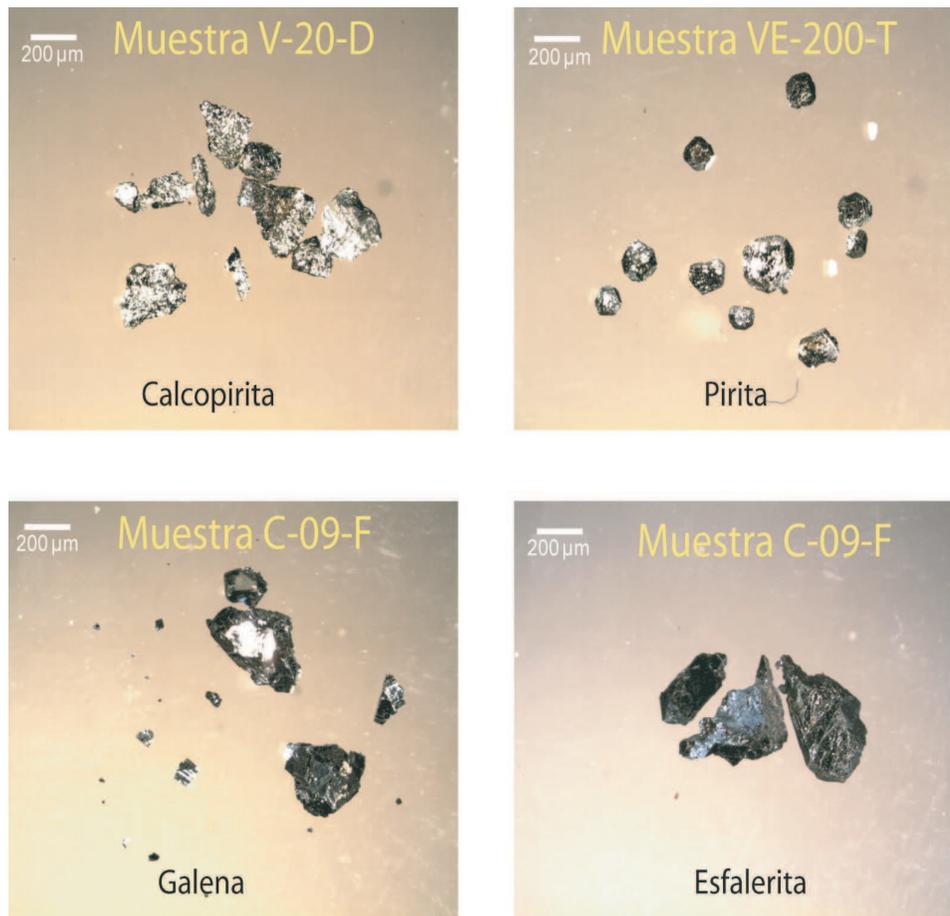


Figura 6.1. Ejemplos de muestras separadas de sulfuros para su análisis de $\delta^{34}\text{S}$. Arriba las muestras corresponden a la zona de Antares y las de abajo a Reyna de Cobre.

Tabla 6.1. Composición isotópica de azufre de los cristales de sulfuros de las muestras mineralizadas del yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CTD}}$ (‰)			
		Ccp	Ga	Sp	Py
1	C-O5-D		0.89		
2	C-O9-D				2.24
3	C-O4-F			1.33	
4	C-O9-F				2.62
5	C-O9-F		-0.04		
6	V-18-E			0.72	
7	V-20-D	0.82			
8	V-20-D		-0.92		
9	VE-26-B			-1.06	
10	V-36-C		0.91		
11	V-39-A	1.01			
12	V-39-A		-0.48		
13	VE-60-V			-0.89	
14	V-75-R			0.55	
15	V-75-R	-0.69			
16	V-78-P				-0.53
17	V-88-J				1.04
18	V-122-AC	0.86			
19	V-129-G			1.83	
20	V-200T				0.74
21	UASM-22			-3.87	

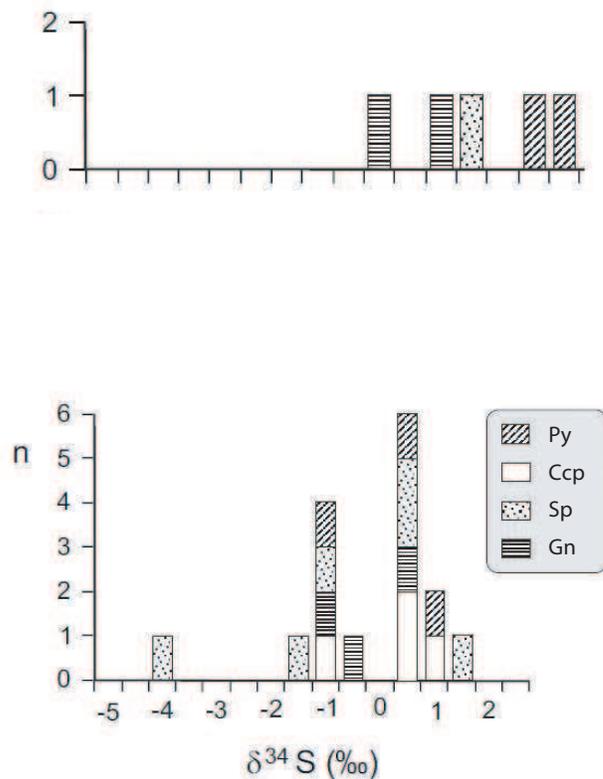


Figura 6.2. Histogramas de distribución de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ de los sulfuros del yacimiento de Velardeña (superior, Reyna de Cobre; inferior, Antares). Ccp, calcopirita; Gn, galena; Sp, esfalerita; Py, pirita.

6.1 Geotermometría

En la muestra (C-04-F) se han analizado cristales de pirita y galena, en aparente equilibrio (de acuerdo a criterios petrográficos). Por lo tanto, esta muestra es potencialmente útil como geotermómetro.

Para calcular la temperatura de formación de estos minerales se ha utilizado la siguiente ecuación propuesta por Ohmoto y Rye (1979):

$$T = \frac{(1.01 \pm 0.04) \times 10^3}{\Delta^{1/2}}$$

$$\text{Donde } \Delta = \delta^{34}\text{S}_{\text{pirita}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{galena}}$$

En el caso de la muestra **C-04-F**, $\Delta = 2.66$, con lo que se obtiene una temperatura de $346 \pm 25^\circ \text{C}$.

Discusión e interpretación de resultados

Skarns de Velardeña:
evolución y modelo de depósito

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del
Skarn de Velardeña, Durango

Discusión e interpretación de resultados

Los depósitos tipo skarn están directamente relacionados con actividad ígnea, por lo que es importante conocer el tamaño, textura, profundidad de emplazamiento, así como, el ambiente tectónico en el que se emplazaron los plutones.

En los arcos continentales es en donde se producen los volúmenes más grandes de granitoides. El estado térmico de la placa oceánica y las reacciones metamórficas que ocurren en ella, bajo condiciones distintas de presión y temperatura, propician la generación de magmas graníticos (Poli y Schmidt, 2002).

Existe una variación amplia en cuanto a la composición en el magmatismo en zonas de convergencia, aunque el predominio más típico corresponde a la serie calciocalina y a las composiciones andesíticas. No obstante, se pueden presentar también (a) rocas de la serie calciocalina pobre en potasio; (b) rocas alcalinas, en las zonas internas de arcos muy evolucionados y orógenos de márgenes activos; y (c) rocas ultraalcalinas, en zonas aún más internas de los orógenos de márgenes activos (Mori, 2007).

Por otra parte, para cada tipo de skarn existen diferencias en cuanto a su composición geoquímica; por ejemplo, los skarns de estaño y molibdeno normalmente muestran un alto contenido en sílice, lo que se atribuye a plutones muy diferenciados. Mientras que los skarns de hierro, por lo general, se asocian con muy bajo contenido de sílice, naturalmente ricos en hierro, lo que supone plutones relativamente primitivos (Meinert, 2005).

Los skarns en general se encuentran relacionados a plutones de granodiorita y cuarzo-monzonita. En ambientes de

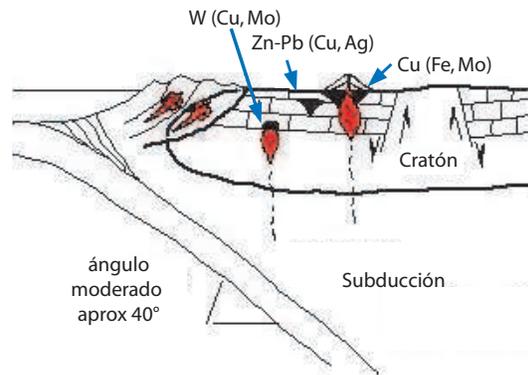


Figura 7.1. Ambiente de formación de los skarns, referido a un arco magmático donde los intrusivos de composición media-ácida entran en contacto con rocas calcáreas (modificado de Meinert, 2005).

subducción se considera que el magma se emplaza a profundidades entre los 1 a 6 km, en stocks y diques porfiríticos que comúnmente tienen rocas volcánicas cogenéticas. Los skarns asociados a este ambiente suelen ser ricos en sulfuros, cuya presencia depende de la posición respecto al arco, en la zona de ante-arco. Más cercano a la trinchera se desarrollan skarns de estaño, cobre y molibdeno, mientras que en la periferia del arco se forman skarns de Zn-Pb \pm Cu, Ag. Por último, en el arco, la mineralización corresponde a cobre, hierro y molibdeno (Meinert *et. al*, 2005, Figura 7.1).

Dentro de la tipología de los skarns, los yacimientos mexicanos son reconocidos ampliamente en todo el mundo, pues el marco geológico predominante en el norte y oriente del país permitió la formación de muchos depósitos de este tipo. Velardeña, al igual que la mayoría de los skarn de Pb-Zn-Ag representativos en el norte de México, tales como Naica, Mapimí y Real de Catorce, por citar algunos, se encuentra en el borde de un bloque (*i.e.*, elementos emergidos según la paleogeografía del

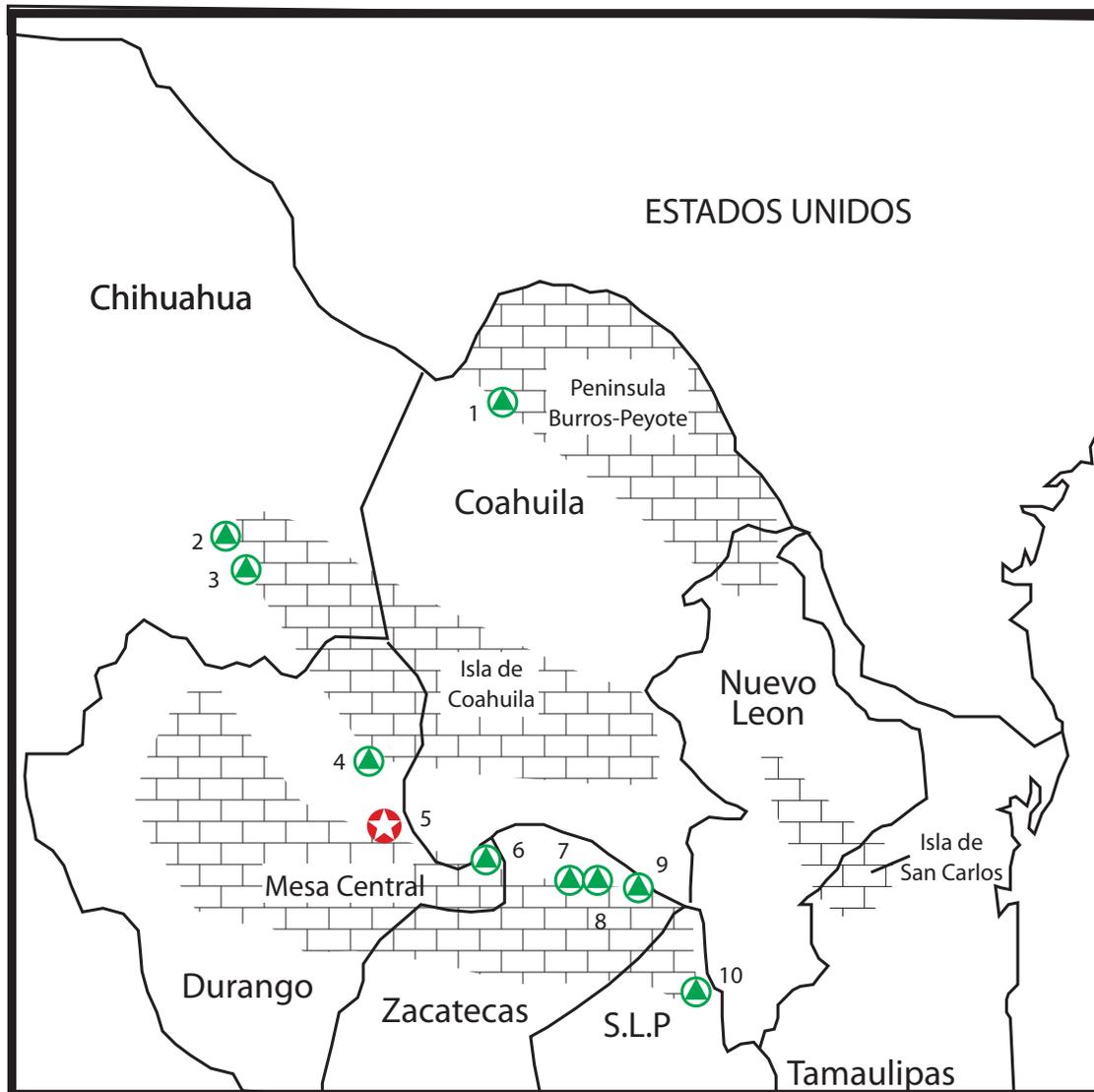


Figura 7.2. Elementos paleogeográficos del noreste de México durante el Cretácico con depósitos de tipo skarn asociados, recopilado de Humphrey (1956), Dickinson (1981), Kluth y Coney (1981), Padilla y Sánchez (1982, 1985), Goodell *et al.* (1985), Handschy (1986), Keller y Smith (1985) y Cantu *et al.* (1986). Además se muestran los depósitos skarn de Pb-Zn-Ag identificados con círculos verdes con triángulos al centro: 1= La Encantada, 2= Naica, 3= Sierra Almoloya, 4=Mapimí, 5=Velardeña (Estrella roja), 6= Sierra Ramírez, 7= Noche Buena, 8= Avalos, 9=Concepción del Oro, 10= Real de Catorce. (Modificado de Gilmer *et al.*, 1988).

Mesozoico) (Gilmer *et al.*, 1988), tal como puede apreciarse en la Figura 7.2.

El área de Velardeña ha sido interpretada como un centro volcánico por Spurr y Garrey (1908), así como por Levich (1973), evidenciado, por una parte por el domo Santa María y por otro lado,

por la secuencia de unidades volcánicas descritas en capítulos anteriores.

La mineralización metálica en el skarn fue favorecida por el fracturamiento y a la existencia de diques que sirvieron de conductos de fluidos hidrotermales.

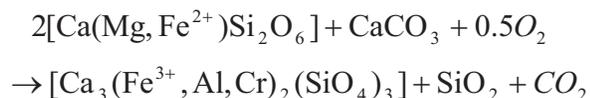
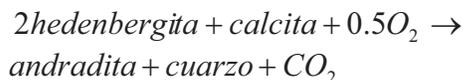
Secuencia Paragenética

Una vez que fueron caracterizados cada uno de los minerales que conforman la suite de rocas del yacimiento de Velardeña, mediante las técnicas mencionadas en capítulos anteriores, se llevó a cabo el estudio paragenético que indica que el skarn de Velardeña es el resultado de procesos complejos de mineralización, caracterizados por la sucesión de diferentes eventos mineralizantes, y por la ocurrencia de fenómenos de metasomatismo y reemplazamiento a todas las escalas (desde el yacimiento hasta el cristal).

La secuencia paragenética deducida de las asociaciones minerales de Velardeña (Fig. 7.3) muestra dos grandes estadios de formación de minerales causados por una actividad hidrotermal ligada al emplazamiento de rocas ígneas, y característicos de la mayoría de depósitos de tipo skarn (cf. Einaudi et al., 1981).

- (a) fase progradante, y
- (b) fase retrogradante.

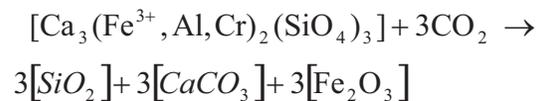
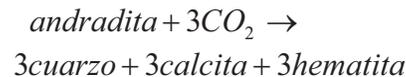
La etapa progradante está dominada por reacciones progresivas, que producen minerales de alta temperatura, esencialmente granates y piroxenos de la serie cálcica. Los cristales de piroxeno en ocasiones tienen un carácter relicto, encontrándose incluidos en cristales poiquilíticos de granate, lo que indica una reacción ocasionada por un aumento en la fugacidad de oxígeno (Logan, 2000):



Esta reacción ha sido observada en otros skarns de México (e.g. Canet et al., 2011a).

La etapa retrogradante implica la formación de fases de menor temperatura, como clinozoisita, anfíboles cálcicos, epidota y clorita. En relación a esta etapa cristalizan, además, los sulfuros (incluyendo sulfosales), cuarzo, calcita y abundante adularia. Estas fases reemplazan parcial o totalmente (pseudomorfizando) los minerales de alta temperatura. Así, los granates están alterados a una asociación de calcita-cuarzo (\pm hematita), y los clinopiroxenos a anfíboles cálcicos (ferroactinolita).

La alteración del granate se puede explicar con la siguiente reacción (Logan, 2000):



Esta reacción implica cambios bruscos de temperatura (descenso de $\sim 150^\circ\text{C}$) y en estado de oxidación (un aumento en varias unidades de la $f\text{O}_2$ en una escala logarítmica).

La fase retrogradante, en su etapa final, produce asociaciones minerales que se emplazan preferentemente en vetas y/o brechas mineralizadas, definiendo una tercera y última etapa hipogénica.

De acuerdo con Dipple y Gerdes (1998), esta serie de reacciones relacionadas a ambientes de metamorfismo de contacto se llevan a cabo en 4 etapas: 1) desgasificación, 2) precipitación de sílice, 3) disolución de calcita y 4) intercambio en isótopos estables, siendo la desgasificación la reacción a través de la cual puede generarse porosidad y permeabilidad en la roca encajonate lo que eventualmente facilita la infiltración de fluidos mineralizantes (Barrell 1902). Este modelo puede ser expresado de la manera siguiente

Desgasificación
 Precipitación de sílice
 Disolución de calcita
 Cambios isotópicos

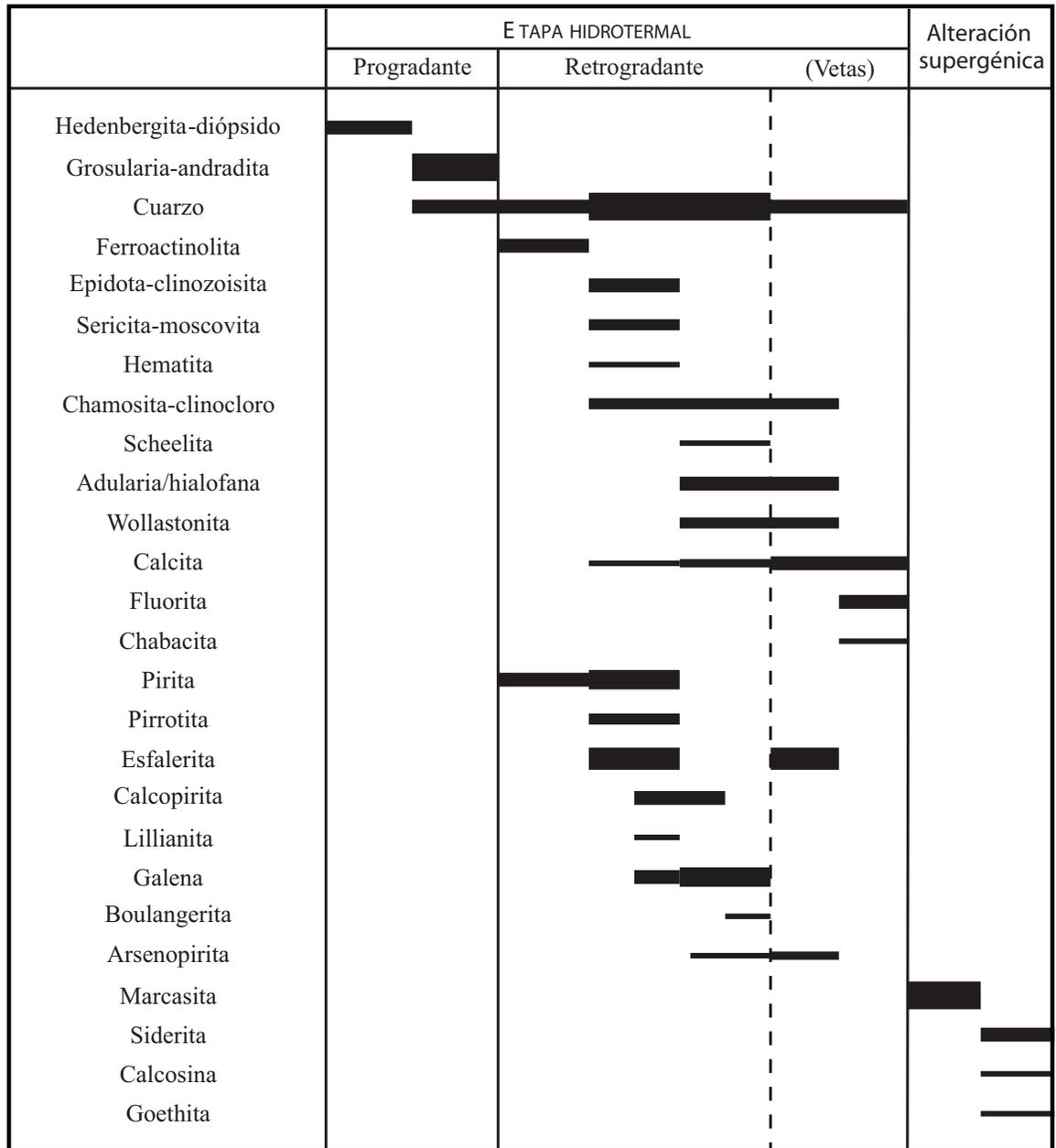
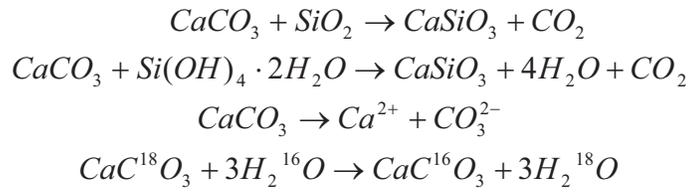


Figura 7.3. Secuencia paragenética general del yacimiento de Velardeña (Durango).

Aunado a el cambio en la permeabilidad, el cambio en la presión de los fluidos potencializan la reacción de minerales preexistentes y permite la infiltración de fluidos mineralizantes.

Los minerales de mena son tardíos respecto a la mayor parte de los silicatos, por lo que suelen ocupar posiciones intersticiales respecto a ellos. La etapa de mineralización hipogénica más tardía corresponde a la formación de vetas (y/o brechas) por fluidos tardíos relacionados con la retrogradación del skarn. Dichas vetas presentan complicadas relaciones de corte, por lo que se pueden atribuir a múltiples generaciones. En general, son muy ricas en calcita y adularia ± esfalerita, comúnmente de la variedad "acaramelada" (pobre en Fe), mientras que otras contienen en mayor proporción arsenopirita.

Además, hay vetas, aparentemente las más tardías, que contienen fluorita. Por último, en algunas muestras se observan, aunque escasamente desarrolladas, paragénesis supergénicas, constituidas por siderita y goethita.

Inclusiones Fluidas

Los datos microtermométricos determinados para el yacimiento de Velardeña, en general, son característicos de salmueras mineralizantes relacionadas con yacimientos de tipo skarn (e.g. Meinert, 1992; Canet et al., 2011b).

Como se ha determinado anteriormente en relación con la paragénesis mineral, se observa la siguiente evolución de los fluidos:

Petrográficamente se pudo apreciar que la fase de mineralización se da posterior y/o casi al finalizar la formación de granates, ya que muchos cristales de este mineral contienen en la última etapa de crecimiento calcopirita; la ebullición o un proceso análogo de separación de fases, para los dos casos de estudio (Antares y Reyna de Cobre), parece ser responsable de la mineralización, ya que en

esta etapa los fluidos pasan de L+V a S (NaCl)+L+V. La efervescencia de CO₂ se da durante la etapa tardía del skarn, quedando registrado en ganga de calcita de menor temperatura (entre 100 y 180 °C).

Comparando entre el cuerpo de Antares y de Reyna de Cobre, se considera que en Antares las temperaturas más altas de homogeneización corresponden a una salmuera del tipo clorurado sódico, en un inicio subsaturada, con T_H entre 365° y 468° C, y salinidad, la cual se expresará en %; sin embargo, este corresponde a % en peso equivalente de NaCl, de 15"19%. La ebullición registrada en los inicios de la precipitación mineral es a T_H = 420°C y persiste hasta los 365°C, con salinidades de saturación 21"33 %. Luego el fenómeno de ebullición inicia con una caída de presión registrada en P= 275 bars (a T_H=468°C). El proceso de mineralización se da con una constante despresurización y temperatura hasta llegar a los 230 °C y 140 bars. En la fase terminal de la mineralización, una dilución final es registrada a T_H= 130"138°C y salinidad media de 17 % a presión de 3.2 bar, con presencia de CO₂ en forma de clatratos. Cabe señalar que los fluidos del skarn progradante (granate"piroxeno) no fueron medidos en Antares.

Por otro lado, en Reyna de Cobre el muestreo fue complementado con información determinada con anterioridad por González-Partida (1994), por lo que se dispone datos para una mayor gama de minerales (y de muestras). Para esta mineralización, la etapa precoz (desarrollo de minerales del skarn progradante) presenta valores altos de T_H= 550"640°C con salinidades medias de 18 % y presión alta de ~400 bar. La etapa de mineralización metálica se da en el rango de T_H de 340"290°C, a salinidades altas, de 31"36 % NaCl, debido probablemente a la ebullición; la presión debió descender hasta ~130 bar. En la etapa más tardía registrada en Reyna de Cobre, la T_H llega a valores tan bajos como 100"148° C, y, como en Antares, se detecta la presencia de clatratos de CO₂.

Los fluidos mineralizantes y su evolución tanto en Antares y Reyna de Cobre son similares, aun considerando que en el primer cuerpo no fueron estudiadas las IF de los minerales del skarn en su fase progradante. Respecto a la mineralización de la etapa retrogradante, los dos cuerpos presentan la misma tendencia, lo que sugiere que los fluidos provienen de una misma cámara magmática profunda.

En los dos casos estudiados, Antares y Reyna de Cobre, la causa más probable de la precipitación de los metales es la ebullición de los fluidos o un proceso análogo, ya que éstos pasan de ser L+V a L+V+S (NaCl).

El desprendimiento de CO_2 ocurre durante la etapa más tardía de la mineralización (formación de vetas y mineralización intersticial) y ocasiona la precipitación de calcita a baja temperatura (100-148 °C).

Los datos generados en este estudio corroboran y complementan los reportados por Gilmer et al. (1988), aportando nuevos datos respecto a la secuencia paragénetica del yacimiento, pues si bien existe un primer evento de precipitación metálica debido a ebullición en fluidos saturados (>30% de salinidad, la formación de vetas con mineralización de sulfuros (principalmente esfalerita y arsenopirrita) se asocia a la última fase de la etapa retrograda.

El comportamiento térmico de los fluidos a baja temperatura es reflejo de una compleja historia de evolución de una salmuera que primero fue sometida a un proceso de ebullición, ligado con la mineralización metálica, y luego sufrió una dilución tardía

Origen del azufre

De acuerdo a Bowman (1988) y la recopilación realizada por Taylor (1987), los valores de $\delta^{34}\text{S}$ típicos en skarns de Pb-Zn-Ag oscilan entre -5 y +8 ‰

El azufre presente en un sulfuro metálico puede proceder, en última instancia, del agua del mar o de una fuente magmática profunda (Bowman, 1998). La composición isotópica del azufre de origen magmático se encuentra entre -3 y +3 ‰. En el caso de sulfuros cuyo azufre deriva del ión sulfato del agua marina, la reducción puede haber ocurrido de dos maneras:

a) Directamente en el mar o en los sedimentos cerca del fondo del mar, por acción de bacterias sulfatoredutoras;

b) El agua marina circula a través de fracturas o la porosidad hasta alcanzar zonas profundas de la corteza, donde todo o parte del sulfato en solución es transformado termoquímicamente a H_2S .

Ambos casos se diferencian por la composición isotópica del H_2S resultante, el cual se combina con metales para producir sulfuros. En el caso de H_2S obtenido a través de la acción bacteriana, éste estará fuertemente empobrecido en $\delta^{34}\text{S}$, presentando grandes fraccionamientos, con valores de $\delta^{34}\text{S}$ de alrededor de 45 ± 20 ‰ por debajo del sulfato marino (Ohmoto y Rye, 1979; Ohmoto *et al.*, 1990). En el caso de que el H_2S se forme por reducción termoquímica, el fraccionamiento producirá valores de $\delta^{34}\text{S}$ entre 0 y 20 ‰ por debajo del sulfato marino (Ohmoto y Rye, 1979; Hoefs, 1997).

Por lo tanto, para analizar la composición isotópica de azufre de un depósito en el cual pueda haber alguna influencia del sulfato marino (e.g. VMS, SEDEX), lo primero que se debe hacer es conocer la composición isotópica del sulfato inicial. La composición isotópica de azufre del sulfato marino actual es casi constante, variando dentro de unos estrechos límites, con un valor de $\delta^{34}\text{S}$ de alrededor de +20 ‰. Sin embargo, los valores de $\delta^{34}\text{S}$ de los sulfatos procedentes de evaporitas antiguas varían sistemáticamente en función de la época en que se han depositado. Esta variación

implica que ha habido cambios significativos en el ciclo del S sobre la superficie de la Tierra. Estos cambios se deben a la actividad biológica y a las variaciones relativas en el flujo de sulfuros y sulfatos y su subsecuente precipitación mineral (Ress, 1970; Holland, 1973).

A partir de un gran número de datos de $\delta^{34}\text{S}$ de sulfatos evaporíticos de diferentes procedencias y edades, diferentes autores, principalmente Claypool *et al.* (1980), reconstruyeron las variaciones históricas de la composición isotópica del S marino. Estos estudios señalan que los valores (siempre positivos) de $\delta^{34}\text{S}$ disminuyeron desde 30"35 ‰ durante el Cámbrico hasta 10"11 ‰ en el Pérmico, y después incrementaron irregularmente durante el Mesozoico hasta llegar al valor actual del +20 ‰ (Ohmoto, *et al.*, 1990).

En el caso del yacimiento de Velardeña, los valores de $\delta^{34}\text{S}$ de los sulfuros analizados se hallan en el rango de -0.6 a +2.6 ‰. Estos valores son indicativos de un origen magmático del azufre que formó los sulfuros metálicos. El único valor que se encuentra fuera del rango común de los valores magmáticos corresponde a un cristal de esfalerita con $\delta^{34}\text{S}$ de -3.9 ‰. Este valor anómalo podría ser debido a azufre incorporado a partir de la lixiviación de sulfuros (pirita) de las rocas sedimentarias encajonantes.

Presión

De acuerdo con el geobarómetro de Hutchinson y Scott (1981), calculado a partir del contenido en Fe en tres puntos de esfalerita obtenidos por análisis realizados a través de microsonda, varía entre 0.8 y 0.9 Kbar, lo cual equivale a 3"4 km de roca (presión litostática), lo que permite precisar la presión calculada a partir del estudio de las IF que se ubica entre 100 y 200 bares.

Temperatura

Como se presentó con anterioridad, **en la muestra C-04-F**, se realizaron análisis tanto de IF, así como de isotopía del azufre; con ambas técnicas fue posible obtener una temperatura de formación de la esfalerita.

El análisis de las familias de inclusiones fluidas estudiadas dio como resultado una temperatura mínima de atrapamiento del orden de 310° a 390° C (345°C, promedio ± 32 SD).

Por otro lado, el geotermómetro calculado a partir de los valores isotópicos de azufre para el par mineral pirita"galena, arroja una temperatura de 346 ± 25 ° C SD.

Ambos resultados son consistentes con un evento de mineralización de tipo hidrotermal (Bowman, 1998, Einaudi, *et al.*, 1981) en la transición entre la etapa progradante hacia a la retrogradante provocada por efecto de un proceso de ebullición en el sistema del skarn. Dichos valores son consistentes para ambientes de tipo skarn, pues se considera que su formación ocurre en cortezas poco profundas a presiones entre 200 y hasta 250 MPa y temperaturas d" 650 °C (Einaudi, *op. cit*)

"Skarns de Velardeña: evolución y modelo de depósito"

El depósito tipo skarn de Velardeña, exhibe una asociación mineral de calco-silicatos compuesto principalmente por granates de grosularia y andradita, además de minerales de manganeso tales como: diópsido, actinolita y epidota, con texturas que son características de skarns que suelen tener múltiples eventos mineralizantes (e.g. Delgado *et al.*, 1997; Einaudi *et al.*, 1981; Meinert *et al.*, 2005; Canet *et al.*, 2011a). El enriquecimiento de manganeso en clinopiroxenos cálcicos, granates, y clorita es considerado por algunos autores como una característica distintiva de la mayoría de los

skarns ricos en Zn (Canet *et al.*, 2009; Einaudi *et al.*, 1981; Meinert *et al.*, 2005; Nakano, 1998).

El skarn de Velardeña es proximal con respecto a las rocas magmáticas, ya que se ha desarrollado principalmente en la zona de contacto irregular entre los cuerpos intrusivos y la secuencia de carbonatos, en el cual se muestra una zonación mineral abundante a escala afloramiento, el cual es de origen metasomático y ha sido favorecido por infiltración y que puede ser explicada por el modelo de cromatografía (*e.g.*, Korzhinskii, 1970).

La zonación mineral puede ser descrita desde los cuerpos magmáticos proximales a las secuencias calcáreas dístales de la siguiente forma: (a) pórfidos félsicos con alteración propilítica, (b) endoskarn rico en calcosilicatos, (c) exoskarn cálcico dominado por granate, (d) exoskarn dominado por clinopiroxeno cálcico y (e) mármol. Además, la zona del skarn rico en magnesio se desarrolló probablemente como resultado de la sustitución de un sustrato rico en Mg. Por último se desarrolló una etapa retrógrada superpuesta, representada por una silicificación penetrante, como se ha descrito en otros depósitos tipo skarn en todo el mundo (*e.g.*, Canet, *et al.*, 2011a, Einaudi *et al.*, 1981).

La zonación antes descrita, también se presenta a nivel mineral, que se producen como zonación oscilatoria (Al vs. Fe) en granates cálcicos. Dicha zonificación se ha observado en muchos otros skarns y puede explicarse en términos de procesos de auto-organización catiónica en condiciones de desequilibrio (Ciobanu y Cook, 2004).

La variabilidad en los valores de $\delta^{34}\text{S}$ en los sulfuros de un depósito hidrotermal puede explicarse, de acuerdo a Ohmoto (1972), como consecuencia del aumento tanto en la fugacidad de O_2 , que provocaría un fraccionamiento sulfuro-sulfato; sin embargo, en Velardeña, a diferencia de otros yacimientos de skarn en el norte de México (*e.g.* Pérez Segura y González Partida, 2010),

puesto que la presencia de pirrotita indica condiciones muy reductoras, por lo que este fenómeno podría ser despreciable. Los valores fuera de rango que se han encontrado en este yacimiento (en esfalerita, $\delta^{34}\text{S}$ e⁻-4‰) podrían reflejar una incorporación de azufre de origen sedimentario lixiviado desde las series infrayacentes.

Por otra parte la evolución de los fluidos mineralizantes en el skarn de Velardeña es análoga a la de los depósitos de skarn en el noreste de México relacionados con magmatismo calco-alcalino (Figura 7.2) como son el depósito tipo skarn de Zn-Pb-Cu-Ag de San Martín, en Zacatecas (González-Partida y Camprubí, 2006) y La Joya Au-Cu en Guerrero (González-Partida *et al.*, 2004). Ellos muestran una fase inicial dominada por alta temperatura y fluidos de salinidad moderada, seguido de una etapa de baja temperatura y el aumento de la salinidad, correspondientes a los eventos de skarn progradante y retrógrado, respectivamente. Corresponden además, de una etapa tardía que se caracteriza por baja temperatura y fluidos de salinidad alta, similar a fluidos típicos de depósitos epitermales y representan el final del evento de mineralización en el skarn retrógradante. La tendencia evolutiva de los fluidos mineralizantes en estos depósitos es muy similar, aunque muestran rangos muy diferentes de salinidad.

Para el caso concreto del skarn de Velardeña, la evolución de los fluidos mineralizantes puede ser descrita como: (a) skarn progradante: fluidos del tipo líquido+vapor (L+V) producidos durante una fase temprana representada por los granates y piroxenos cálcicos; (b) inicio del skarn retrogradante: representado por la formación de cristales de granate, epidota, calcita y cuarzo generalmente reemplazando y/o sobrepuesto a las fases progradantes y (c) precipitación de los metales en el skarn retrogradante y formación de vetas: fluidos saturados de tipo multicomponente, L+V+S(NaCl). En la figura 7.4 se muestra el modelo evolutivo del skarn de Velardeña.

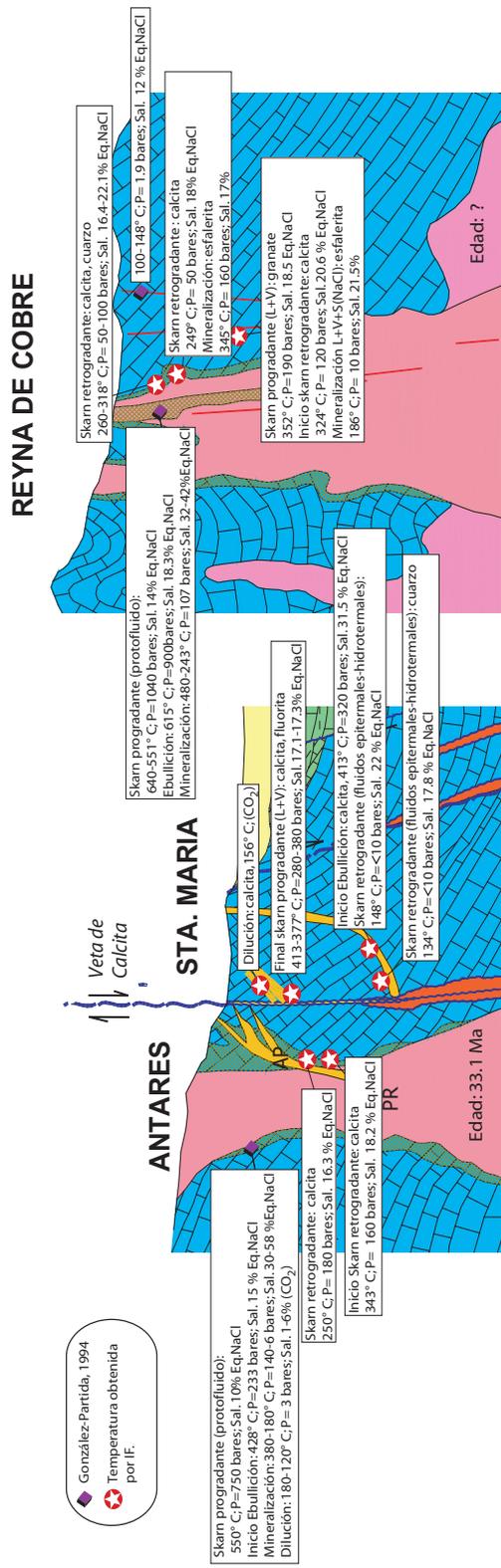


Figura 7.4. Modelo evolutivo del distrito minero Velardeña, a la derecha se muestra la zona de Antes, a la izquierda Reyna de Cobre, las estrellas blancas en círculos rojos representan los datos microtermométricos y los minerales estudiados de las muestras analizadas en este estudio, los rombos morados corresponden a los datos reportados por González-Partida, et al. (1994).

Conclusiones y recomendaciones

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del Skarn de Velardeña, Durango

Conclusiones y recomendaciones

La ocurrencia desde el punto de vista económico del domo de Santa María (Antares) en Velardeña, ha sido aprovechada en diferentes épocas, sin embargo el estudio reciente refuerza el potencial de exploración en otros sectores de este mismo depósito, principalmente en el área de Reyna de Cobre.

El skarn de Velardeña se presenta como masas irregulares en la cercanía del contacto entre las calizas mesozoicas y los cuerpos porfídicos de edad terciaria.

Su mineralogía y texturas son típicas de skarns cálcicos proximales, ricos en Zn. El predominio de las texturas de reequilibrio y zonación tanto a escala de afloramiento, como en los cristales sugieren que el skarn se formó como resultado de eventos progradantes y retrógradantes hidrotermales y metasomáticos. La etapa progradante conllevó la formación de granates cálcicos y clinopiroxenos. Posteriormente, la etapa retrógradante produjo silicificación acompañada por cristalización de silicatos hidratados (principalmente clorita y epidota). Las zonas silicificadas se caracterizan por conformar vetas con altos contenidos de sulfuros de Zn, Pb, Fe, Cu, As, asociados a sulfosales.

La temperatura de formación de la skarn progradante, calculado a partir de microtermometría en inclusiones fluidas, oscila entre 455° y finaliza con un evento de mineralización metálica, a una temperatura de 346° C, calculados a partir de los valores isotópicos de azufre. La formación las asociaciones minerales de la etapa retrógradante implica una disminución de la temperatura (en un intervalo de 230-300 ° C), acompañado por la etapa de formación de vetas a menor temperatura (130-195° C).

Estos cambios pueden ser explicados por la mezcla entre los fluidos de formación del skarn con agua meteórica diluida, más fría y en condiciones oxidantes. Posteriormente, un evento de ebullición ocurrió causando un aumento en la salinidad de los fluidos, hasta ~ 22 % NaCl eq., lo que aunado a la disminución de temperatura gradual produjo precipitación de esfalerita con calcita y cuarzo.

El presente estudio complementa los datos geoquímicos de los cuerpos intrusivos del domo de Santa María en el área de Antares y aporta datos nuevos de los cuerpos intrusivos del área de Reyna de Cobre, donde es posible distinguir diferencias entre los mismos. Así mismo, esclarece las características térmicas y composicionales de los fluidos mineralizantes, caracterizando las tres etapas de la evolución del skarn: etapa progradante, etapa retrogradante y vetas, separando así mismo, este evento de la formación de minerales previos a la formación de este depósito.

Por otra parte, en el presente estudio se han caracterizado petrográfica y geoquímicamente todas las fases minerales que conforman este depósito, así como la interpretación de la génesis y las condiciones de formación de los mismos.

Sin embargo, por quedar fuera de los objetivos específicos de este trabajo, queda pendiente un estudio para determinar la edad de los intrusivos de Reyna de Cobre y de cada fase evolutiva del yacimiento, para ello pueden datarse algunos minerales tales como la adularia y la sericita, ya que ello conllevaría obtener la edad de la mineralización asociada a cada etapa: desde el inicio de la fase progradante hasta el momento final de la formación de vetas tardías. Así mismo un estudio isotópico del carbono podría ser útil para precisar las condiciones exactas de la precipitación de algunas fases minerales específicas.

Bibliografía

- Ambriz M.D., 1979, Geología y yacimientos minerales de la mina Santa María, en Velardeña, Dgo. (resumen): en Convención Nacional, XIII, Acapulco, Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Memorias, p. 225-260.
- Barrell, J., 1902, Physical effects of contact metamorphism: American Journal Series, (13), p. 279-296
- Barboza Gudiño, J.R., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., Martínez-Macías, P.R., 2004, Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 21(3), p. 299-319.
- Bowman, J.R., 1998, Stable isotope systematics of skarns: in: Lentz, D.R. (ed.), Mineralized Intrusion-Related Skarn Systems, Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook, (26), p. 99-146.
- Burrows, R.H., 1910, Geology of Northern México, Geological Society. American Bulletin., Tomo VII, 1st. Part, p. 85-103.
- Canet, C., Camprubí, A., González-Partida, E., Linares, C., Alfonso, P., Piñeiro-Fernández, F., Prol-Ledesma, R.M., 2009, Mineral assemblages of the Francisco I. Madero Zn-Cu-Pb-(Ag) deposit, Zacatecas, México: implications for ore deposit genesis. Ore Geology Reviews, (35), p. 423-435.
- Canet, C., González-Partida, E., Camprubí, A., Castro-Mora, J., Romero, F.M., Prol-Ledesma, R.M., Linares, C., Romero-Guadarrama, J.A., Sánchez-Vargas, L.I., 2011a, The Zn-Pb-Ag skarns of Zacatepec, Northeastern Oaxaca, México: A study of mineral assemblages and ore-forming fluids: Ore Geology Reviews, (39), p. 277-290.
- Canet, C., Franco, S.I., Prol-Ledesma, R.M., González-Partida, E., Villanueva-Estrada, R.E., 2011b, A model of boiling for fluid inclusion studies: Application to the Bolaños Ag-Au-Pb-Zn epithermal deposit, Western Mexico: Journal of Geochemical Exploration, (110), p. 118-125.
- Chappell, B.J., White, A.J.R., 1974, Two contrasting granite types: Pacific Geology, (8), p. 173-174.
- Ciobanu, C.L., Cook, N.J., 2004, Skarn textures and a case study: the Ocna de Fier-Dognecea orefield, Banat, Romania, Ore Geology Reviews, (24), p. 315-370.
- Clarke, D. B., 1992, Granitoid Rocks, Chapman & Hall (ed.): New York, 283 pp.
- Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan, I.R., Sakai, H., Zak, I., 1980, The age curves of sulphur and oxygen isotopes in marine sulphates and their mutual interpretation: Chemical Geology, (28), p. 199-260.
- Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J., 1979, The interpretation of igneous Rocks., Allen, R. (ed.), Uwin London, 450 pp.
- De Santiago-C., J., Torre-B., T. de J., Payan, E.B., 2000, Carta Geológico-Minera Torreón G13-9, escala 1:250,000: Estados de Coahuila, Durango y Zacatecas, México, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa con texto.
- De la Vega E., 1968, Hoja Cuencamé, Resumen de la geología de la hoja Cuencamé, escala: 1:100,000: Estado de Durango, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 1 Mapa con texto.
- Delgado, J., Soler, A., Arcos, D., 1997, Rocas calcosilicatadas, en: Melgarejo, J.M. (ed.), Atlas de las asociaciones minerales en lámina delgada: 1er. Edición de la Universidad de Barcelona, España, p. 359-367.
- Dipple, G.M. and Gerdes, M., 1998, Reaction infiltration feedback and hydrodynamics at the skarn front, in: Lentz, D.R. (ed.), Mineralized Intrusion-Related Skarn Systems, Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook, (26), p. 71-97.

- Einaudi, M.T., Meinert, L.D., Newberry, R.J., 1981, Skarn deposits: Economic Geology, 75th Anniversary Volume, p. 317–391.
- Felder F., 1979: Estudio de algunas estructuras mineralizadas en el domo de Santa María Velardeña, Dgo. (Resumen): en Convención Nacional, XIII, Acapulco, Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Memorias, p. 192-224.
- Fries, Carl Jr., Hibbard, C.W., Dunkle, D.H., 1955, Early Cenozoic vertebrates in the Conglomerate at Guanajuato, Mexico: Smithsonian Miscellaneous Collection, 123(7), p. 25.
- Giesemann, A., Jäger, H. J., Norman, A.L., Krouse, H.R., Brand, W.A., 1994, Sulfur-isotope determination using an elemental analyzer coupled to a mass spectrometer (en línea): Analytical Chemistry. (66), p. 2816-2819.
- Gilmer, A.L., Clark, K.F., Hernandez C.I., Conde C.J., Figueroa S.J.I., 1986, Geological and mineralogical summary of the metalliferous deposits in the Santa María dome, Velardeña, Durango, in Clark, K.F., Megaw, P.K.M., and Ruiz, J., (eds.), Lead-zinc-silver carbonate hosted deposits of Northern Mexico: El Paso, Texas, Univ. Texas E. Paso, Society of Economic Geologists Guidebook, p. 143-153.
- Gilmer, A.L., 1987a, The geology and genesis of the Sierra de Santa María metalliferous deposits, Velardeña, Durango, Mexico: El Paso, University of Texas, U.S.A., tesis de maestría, 349 pp.
- Gilmer, A.L., 1987b, Tectonic controls on carbonate-replacement mineralization in the northern Mexican province: El Paso, University of Texas, Geosciences. Department Colloquium, U.S.A., p. 61-82.
- Gilmer, A.L., and Harder, V.M., 1987, Dating of hidrothermal events and implications upon fluid evolution via fluorite fission track dating, K-Ar dating, and fluid inclusion analyses within the Santa María dome, Velardeña, Durango, Mexico, (resumen) in: American Current Research Fluid Inclusions, Program and Abstracts, p. 35.
- Gilmer A.L., Keneth F.C., Hernández, C.I., Figueroa, S.J., Porter, W.E., 1988, Sierra de Santa María, Velardeña Mining District, Durango, Mexico: Economic Geology, (83), p. 1802-1829.
- Goldstein, R.H., Reynolds, T.J., 1994, Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals: SEPM short course, 31 pp.
- González-Partida, E., 1994, Estudio térmico de la mineralización del distrito minero Velardeña, Durango, México: GEOMINCO S.A. de C.V., Informe Técnico, 54 pp.
- González-Partida, E., Camprubí, A., Tritlla, G.L.J., Carrillo-Chávez, A., 2004, Fluidos asociados al skarn Au ("Cu) de La Joya, distrito de Mezcala, Guerrero, México: Implicaciones regionales para depósitos formados a partir de rocas calcoalcalinas vs. Adakíticas: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, (21), p. 371–381.
- González-Partida, E., Camprubí, A., 2006, Evolution of mineralizing fluids in the Zn–Pb–Cu ("Ag±Au) skarn and epithermal deposits of the world-class San Martín district, Zacatecas, Mexico: Journal of Geochemical Exploration, (89), p. 138–142.
- Hoefs, J., 1997, Stable isotope geochemistry: 4th edition., Springer, Berlin. 201pp.
- Holland, H.D., 1973, Systematics of the isotope composition of sulfur in the oceans during the Phanerozoic and its implications for atmospheric oxygen: Geochimica et Cosmochimica Acta, (37), p. 2605-2616.
- Humphrey, W.E., Diaz, G.T., 1956, Jurassic and lower Cretaceous stratigraphy and tectonics of northeast Mexico: Informe geológico.
- Hutchison, M.N., Scott, S.D., 1981: Sphalerite geobarometry in the Cu–Fe–Zn–S system.: Economic Geology, (76), p. 143–153.

Imlay, R.W., 1936, Evolution of the Coahuila Peninsula, México. Part. IV Geology of the Western Part of the Sierra de Parras: Geological Society of America Bulletin (47), p. 1091-1152.

Imlay, R.W., 1937, Geology of the Middle Part of the Sierra de Parras Coahuila, México: Geological Society of America Bulletin, (48), p. 587-630.

Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks: Canadian Journal of Earth Sciences (8), p. 523-548.

Kelly, W.A., 1936, Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico, Part II, geology of the mountains bordering the valley of Acatita and las Delicias: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, (47), p. 1009-1038.

Korzhinskii, D.S., 1970, Theory of Metasomatic Zoning: Clarendon Press, Oxford, UK., 162 pp.

Le Maitre, R.W., 1989, A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of igneous Rocks: Blackwell, Oxford, 193 pp.

Levich, R.A., 1973, Geology and ore deposits of the Sierra de Santa María, Velardeña, Durango, Mexico: Austin, University of Texas, U.S.A., tesis de maestría, 148 pp.

Logan, M.A.V., 2000, Mineralogy and geochemistry of the Gualilán skarn deposit in the Precordillera of western Argentina: Ore Geology Reviews, (17), p. 113-138.

Lozano, R., Bernal, J.P., 2005, Assessment of a new set of geochemical referente materials for XRF major and trace element analysis: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, (22), p. 329-344.

Lusk, J., Scott, S.D., Ford, C.E., 1993, Phase relations in the Fe-Zn-S system to 5kbars and temperatures between 325° and 150 °C: Economic Geology (88), p. 1880-1903.

Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids; Geological Society of America Bulletin, (101), p. 635-643.

Meinert, L.D., 1992, Skarn and skarn deposit: Geoscience Canada Reprint Series 6, p. 117-134.

Meinert, L.D., Dipple, G.M., Nicolescu, S., 2005, World Skarn Deposits: Economic Geology 100th Anniversary Volume, p. 299-336.

McElroy, D.F., Clemons, R.E., 1966, Hoja Pedriceñas 13R-I (14), escala 1:100,000: Estado de Durango, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 1 mapa con texto.

Meinert, L.D., 2005, Skarn and skarn deposit: Geoscience Canada Reprint Series 6, p. 117-134.

Moore, D.M., Reynolds, R.C., 1997, X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals: Oxford University Press, Oxford, UK. 332 pp.

Mori, L., 2007, Origen del magmatismo miocénico en el sector central de la FVTM y sus implicaciones en la evolución del sistema de subducción mexicano: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, Campus Juriquilla. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Tesis Doctoral, 130 pp.

Nakano, T., 1998, Pyroxene geochemistry as an indicator for skarn metallogenesis in Japan, *in*: Lentz, D.R. (Ed.), Mineralized Intrusion-Related Skarn Systems: Mineralogical Association of Canada Short Course, (26), p. 147-167.

Nieto-Samaniego Ángel Francisco, Alicia Alaniz-Álvarez Susana, Camprubí Cano Antoni, 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen Conmemorativo del Centenario Temas Selectos de la Geología Mexicana Tomo LVII, núm. 3, p. 285-318.

Ohmoto H., Rye, R.O., 1979, Isotopes of sulfur and carbon, *in*: Barnes H.L. (ed.) Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 2nd ed., Willey, New York, p. 509-567.

- Ohmoto, H., Kaiser, C.J., Geer, A., 1990, Systematics of sulphur isotopes in recent marine sediments and ancient sediment hosted base metal deposits, *in*: Herbert, H.K., Ho, S. (eds.), *Stable isotopes and fluid processes in mineralization* 23, Perth, University of Western Australia Publ., p. 70-120.
- Petróleos Mexicanos (PEMEX), 1988, *Estratigrafía de la República Mexicana: Mesozoico*, Subdirección de Producción Primaria, Coordinación Ejecutiva de Exploración, pp. 229.
- Pérez De la C., J.A., Arzabala-M., J., Tarín-Z., G., De los Santos-M., J., 2000, *Carta Geológico-Minera Ocampo, G13-3*, escala 1:250,000 Estado de Coahuila y Chihuahua, Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1 mapa con texto.
- Pérez Segura, E., González Partida, E., 2010, *Mineralogía de skarn y fluidos asociados a los yacimientos de Cu-Zn-Ni-Co de La Esperanza, Sonora, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 1 (27), p. 1-17
- Perry, D.V., 1969, Skarn genesis at the Christmas mine, Gila County, Arizona: *Economic Geology*, (64), p. 255-270.
- Poli, S., Schmidt, M.W., 2002, Petrology of subducted slabs: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, (30), P. 207-235.
- Raisz, E., 1964, *Landforms of Mexico (chart): Geography Branch of the Naval Research*. 2° ed. Cambridge, Massachusetts, USA.
- Rees, C.E., 1970, The sulphur isotope balance of the ocean: an improved model; *Earth Planetary Sciences*, (7), p. 366-70.
- Roedder, E., 1984, Fluid inclusions *in*: Ribbe, P.H. (Ed.), *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy*, (12), 644 pp.
- Rogers, C.L., Cserna, Z., Van-Vloten, R., Tavera-Amezcu, E., Ojeda-Rivera, J., 1961, Reconocimiento geológico y depósito de fosfato en norte de Zacatecas y áreas adyacentes en Coahuila, Nuevo León y San Luis Potosí: *Boletín del Consejo de Recursos Naturales no Renovables*, (56), 332 pp.
- Romo R., J.R., Herrera M., J., Rodríguez R., J.S., Larrañaga O., G., 2002, *Carta Geológico-Minera San Miguel, H13-12*, escala 1:250,000, Estados de Coahuila y Chihuahua, Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1 mapa con texto.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), *Carta Geológica Minera Velardeña G13-D44*, escala 1:50000, Estados de Durango, Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1 mapa con texto.
- Sorby, H.C., 1858, On the microscopic structure of crystals, indicating the origin of minerals and Rocks: *Geological Society*, London, 14 (1), p. 453-500.
- Spurr, J.E., 1898, *Geology of the Aspen mining district, Colorado: U.S.: Geological Survey Monograph* 31, (35), atlas, 260 pp.
- Spurr, J.E., Garrey, G.H., 1908, Ore deposits of the Velardeña district, México: *Economic Geology*, (3), p. 688-725.
- Taylor, B.E., 1987, Stable isotope geochemistry of ore-forming fluids, *in*: stable isotope geochemistry of low-temperature fluids. *Short Course Min Ass Canada* (13), p. 337-445.
- Tristán Gonzáles, M., Torres Hernández, J.R., 1994, *Geología de la Sierra de Charcas, Estado de San Luis Potosí, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11 (2), p. 117-148.
- Williams H., Turner F.J., Gilbert C.M., 1982, *Petrography: an introduction to the study of rocks in thin sections*. (Ed: Freeman, W.H.), San Francisco, 626 pp.
- Wilson, M., 1989, *Igneous Petrogenesis a global tectonic approach*, Unwin Hyman, London, 466 pp.
- Zen, E., 1985, An oxygen buffer some peraluminous granites and metamorphic rocks: *American Mineralogist*, 70 (1-2), p. 65-73.

Anexo 1

Descripción y relación de muestras

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del
Skarn de Velardeña, Durango

Área Antares							
Barrenos Superficiales							
#	Barreno	Muestras Laboratorio	Consecutivo Muestras	De	A	Descripción	
1	PV-06-01		1	366.00	366.15	Dique aplítico	
			2	373.83	374.00	skarn	
			3	393.95	394.10	veta de calcita	
2	PV-07-15		4	536.15	536.35	skarn con vetilleo de calcita	
			5	541.95	542.05	Dique aplítico	
3	PV-07-18	V-18-E	6	486.75	486.95	caliza en zona de contacto con vetilleo, óxidos y sulfuros diseminados	
		V-18-E	7	488.30	488.50	caliza en zona de contacto con vetilleo, óxidos y sulfuros diseminados	
		V-18-E	8	490.35	490.55	caliza en zona de contacto con vetilleo, óxidos y sulfuros diseminados	
		V-18-E	9	491.60	491.80	caliza en zona de contacto con vetilleo, óxidos y sulfuros diseminados	
4	PV-07-20		10	586.55	586.75	Mineralización de sulfuros en veta de cuarzo	
			V-20-D	11	588.90	589.10	zona de mineralización de sulfuros
				12	590.80	590.95	veta de calcita
5	PV-07-26	V-26-B	13	321.20	321.40	skarn con mineralización de sulfuros	
6	PV-07-28		14	423.20	223.40	vetillas de cuarzo con mineralización de sulfuros, en skarn	
			15	521.60	521.85	vetillas de cuarzo con mineralización de sulfuros, en skarn	
			16	523.40	523.55	vetillas de cuarzo con mineralización de sulfuros, en skarn	
7	PV-07-36	V-36-C	17	546.00	546.20	veta de cuarzo con mineralización de pirita, calcopirita, arsenopirita y galena	
		V-36-C	18	546.65	546.80	veta de cuarzo con mineralización de pirita, calcopirita, arsenopirita y galena	
8	PV-07-38		19	487.10	487.25	sulfuros diseminados en caliza en zona de brecha	
			20	487.25	487.35	sulfuros diseminados en caliza en zona de brecha	
9	PV-07-39	V-39-A	21	579.20	579.35	skarn con mineralización de sulfuros masivos	
10	PV-07-48		22	941.85	942.00	sulfuros diseminados: galena, esfalerita, pirita y calcopirita	
			V-48-Q	23	942.95	943.05	vetillas con microfallas y pedernal
11	PV-07-51		24	257.70	257.85	Veta de calcita con diseminación escasa de pirita	

Área Antares						
Barrenos Superficiales						
#	Barreno	Muestras Laboratorio	Consecutivo Muestras	De	A	Descripción
12	PV-08-63		25	41.00	41.20	Skarn
		V-63-O	26	55.00	55.20	Brecha silicificada con clastos subángulosos con mineralización de sulfuros
			27	58.35	58.60	Veta de calcita con diseminación escasa de sulfuros
			28	62.15	62.30	skarn en zona de brecha con vetillo y micro fracturas, con mineralización de sulfuros en bandas
			29	68.45	68.60	Mineralización de sulfuros bandeados
			30	75.40	75.60	skarn con mineralización de sulfuros y veta de calcita
			31	76.35	76.50	Veta de calcita con mineralización de pirita en caliza
13	PV-08-75	V-75-R	32	399.00	399.20	skarn con mineralización de sulfuros, cristales de cuarzo y calcita recristalizada
			33	401.35	401.55	Veta de calcita con mineralización de sulfuros: pirita y esfalerita
14	PV-08-78	V-78-P	34	62.10	62.35	Contacto entre dique aplítico y skarn con mineralización de sulfuros
			35	72.00	72.30	Dique aplítico (?)
			36	80.00	80.25	Dique aplítico
			37	146.70	146.90	Veta de calcita con desarrollo de cristales en drusas
15	PV-08-81	V-81-S	38	418.75	419.00	Veta de calcita con cristales desarrollas y zona de brecha silicificada
			39	440.40	440.60	Sílice bandeada con sulfuros masivos
16	PV-08-85		40	380.90	381.00	Sílice bandeada con sulfuros masivos
			41	382.55	382.80	Dique aplítico en contacto con zona de falla al parecer contiene materias asimilado (de la falla (?))
17	PV-08-86		42	188.56	188.66	Skarn con óxidos de Fe
			43	208.05	208.20	Dique aplítico con horizontes (laminas) con sulfuros diseminados y veta de fluorita
		V-86-I	44	208.20	208.40	Dique aplítico con horizontes (laminas) con sulfuros diseminados y veta de fluorita
			45	216.50	216.60	Vetas de calcita con mineralización de sulfuros (cristales muy finos)
			46	223.40	223.60	Caliza en contacto con skarn (exoskarn)

Área Antares						
Barrenos Superficiales						
#	Barreno	Muestras Laboratorio	Consecutivo Muestras	De	A	Descripción
18	PV-08-88	V-88-J	47	486.85	487.00	Zona de falla con mineralización de sulfuros masivos
19	PV-08-90	V-90-K	48	234.65	234.85	Dique aplítico con diseminación de sulfuros, fracturado, al parecer la mineralización se aloja en una zona de falla (?)
20	PV-08-92		49	371.90	372.05	Dique aplítico con diseminación de sulfuros, al parecer la mineralización se aloja en una zona de falla (?)
			50	372.05	372.15	Dique aplítico con diseminación de sulfuros, al parecer la mineralización se aloja en una zona de falla (?)
			51	373.40	373.55	Mineralización de sulfuros masivos en zona de falla
			52	375.40	375.50	Veta de calcita con cristales bien desarrollados
			53	375.50	375.60	Veta de calcita con cristales bien desarrollados
21	PV-07-97		54	422.10	422.20	Dique aplítico con diseminación de sulfuros, al parecer la mineralización se aloja en una zona de falla (?)
		V-97-L	55	422.20	422.30	Dique aplítico con diseminación de sulfuros, al parecer la mineralización se aloja en una zona de falla (?)
			56	422.30	422.45	Dique aplítico con diseminación de sulfuros, al parecer la mineralización se aloja en una zona de falla (?)
22	PV-08-102	V-102-N	57	0.00	0.20	Pórfido riolítico en zona de oxidación
			58	0.20	0.40	Pórfido riolítico en zona de oxidación
			59	8.85	9.00	Skarn con diseminación de sulfuros y veta de calcita
23	PV-08-104		60	173.00	173.05	Mineralización de sulfuros masivos
		V-104-M	61	173.05	173.25	Zona de brecha con vetas de calcita
24	PV-08-105		62	321.15	321.35	zona de contacto entre caliza y skarn
25	PV-08-106		63	174.90	174.95	Veta de calcita
			64	174.95	175.05	Caliza con sulfuros diseminados
			65	175.45	175.65	Veta de calcita en caliza
26	PV-08-110		66	78.65	78.90	Contacto entre caliza con skarn con mineralización de sulfuros masivos
			67	78.90	79.10	Contacto entre caliza con skarn con mineralización de sulfuros masivos
			68	86.60	86.80	Contacto entre caliza con skarn con mineralización de sulfuros masivos
			69	91.80	91.90	Contacto entre caliza con skarn con mineralización de sulfuros masivos
			70	98.80	98.95	Contacto entre caliza con skarn con mineralización de sulfuros masivos

Área Antares						
Barrenos Superficiales						
#	Barreno	Muestras Laboratorio	Consecutivo Muestras	De	A	Descripción
27	PV-08-113		71	194.0 0	194.2 0	Pórfido riolítico
			72	199.7 5	200.0 0	Pórfido riolítico
			73	206.0 0	206.1 5	Skarn con mineralización de sulfuros masivos
			74	304.8 0	305.0 0	Skarn con mineralización de sulfuros masivos, esta asociación se extiende por mas de 30 m
28	PV-08-116		75	131.7 0	131.8 5	Veta de calcita con mineralización de sulfuros
			76	132.3 0	132.3 5	Veta de calcita en caliza
			77	132.3 5	132.5 0	Veta de calcita en caliza
			78	132.8 0	132.9 0	Veta de calcita en caliza
			79	132.9 0	133.0 0	Veta de calcita en caliza
29	PV-08-122		80	155.9 0	156.1 0	Brecha con clastos de angulosos a subangulosos en calizas
			81	157.9 0	158.2 0	Skarn con mineralización de sulfuros masivos
		V-122-F	82	158.5 0	158.8 0	Veta de calcita
			83	164.4 5	164.6 5	Dique aplítico con intersección de vetas de calcita
30	PV-08-127		84	57.80	58.05	Skarn con mineralización de sulfuros masivos, esta asociación se extiende por mas de 30 m
31	PV-08-129		85	139.5 0	139.6 5	Zona de mineralización de sulfuros masivos
			86	139.6 5	139.7 0	Veta de calcita
		V-129-G	87	139.7 0	139.9 0	Veta de calcita
32	PV-09-178	V-178-H	88	335.2 0	335.3 5	Toba andesítica (?)
			89	335.3 5	335.5 0	Toba andesítica (?)

Área Antares					
Muestreo Superficial					
#	Muestra	Muestras Laboratorio	Nombre	Descripción	Localidad
1	PVSAN-01		Dique Aplítico	Dique aplítico mineralizado, similar a la muestra UASM-20	Dique Santa María
2	PVSAN-02		Pórfido Riolítico	Pórfido en la zona de contacto con el skarn y el dique Santa María	Dique Santa María
3	PVSAN-03		Skarn	Skarn con mineralización de sulfuros diseminados asociado al dique Santa María	Dique Santa María
4	PVSAN-04		Pórfido Riolítico	El mismo cuerpo que se encuentra en contacto con el dique Santa María, en otra zona	Antares Norte
5	PVSAN-05	V-05-AF	Tomado en el dique	Otro dique aplítico sin mineralización y/o cobertura volcánica	Cerro Blanco
6	PVSAN-06	V-06-AG	Jaspe	Jasperoides en contacto con caliza en zona de falla de "calcita regional"	Falla de calcita
7	Industria-1		Fluorita	Cristales de fluorita con mineralización metálica en material de rezago	La Industria
8	Industria-2		Boulangeita (?)	Cristales con mineralización metálica en material de rezago	La Industria

Área Reina de Cobre					
Muestreo Superficial					
#	Muestra	Muestras Laboratorio	Nombre	Descripción	Localidad
1	RCCV-20		Veta de Calcita	Veta de calcita en la zona de contacto con skarn e intrusivo	Cobre Viejo
2	RCCV-21		Intrusivo	Intrusivo con mineralización de sulfuros diseminados	Cobre Viejo
3	RCCV-22		Intrusivo	Intrusivo con mineralización de sulfuros diseminados	Cobre Viejo. Corresponde con 150702
4	RCCV-23	C-23-N	Rezago	Muestra en el terrero	Cobre Viejo
5	RCCV-24		Dique aplítico	Dique muy alterado. Muestra de esquirlas	Reina de Cobre

Mina Santa María

Nivel 1240

#	Muestra	Muestras Laboratorio	Descripción	Localidad
1	UASM-01		Zona de skarn con valores bajos o nulos de Zn, con diseminación de Cu +/- Au	Nivel 7 Antares, crucero 59. Corresponde a CIW059SW209
2	UASM-02		Zona de contacto (transición) entre dique y skarn.	Nivel 7 Antares, crucero 59.
3	UASM-03		Intrusivo con valores bajos o nulos de Zn	Nivel 7 Antares, crucero 59. Corresponde a CIW059SW194
4	UASM-04		Skarn con diseminación de sulfuros	Nivel 7 Antares, crucero 59. Entre CIW059SW069 y CIW059SW067
5	UASM-05		Skarn con diseminación de sulfuros, antes de la zona de falla	Nivel 7 Antares, crucero 59. Corresponde a CIW059SW045
6	UASM-06		Skarn con diseminación de sulfuros, en zona de falla	Nivel 7 Antares, crucero 59. Corresponde a CIW059SW036
7	UASM-07		Skarn con diseminación de sulfuros, próximo al contacto con calizas	Nivel 7 Antares, crucero 59. Corresponde a CIW059SW010
8	UASM-08		En zona de transición	Nivel 7 Antares, entre crucero 59 y 60
9	UASM-09		Zona de contacto (transición) entre mineralización de sulfuros y caliza, con veta de calcita con mineralización de sulfuros.	Nivel 7 Antares. Crucero NW60 SUR
10	UASM-10		Skarn al bajo de la estructura (dique). Zona de transición entre skarn e intrusivo	Nivel 7 Antares. Crucero NW60 SUR. Corresponde a CIE060SW013
11	UASM-11		Cristales de calcita y esfalerita	Nivel 7 Antares. Crucero NW60 SUR.
12	UASM-12		Veta-falla (?) de calcita. Espesor aprox. 0.50m	Nivel 7 Antares. Crucero NW60 SUR. Corresponde a CIE060SW020
13	UASM-13		Zona de granates en contacto entre skarn y dique aplítico	Nivel 7 Antares. Crucero NW60 SUR. Corresponde a CIE060SW131
14	UASM-14		Similar a la muestra UASM-20	Nivel 7 Antares. Crucero NW60 SUR. Corresponde a CIE060SW146
15	UASM-15		Skarn con diseminación de sulfuros, al alto de la estructura (dique)	Nivel 7 Antares. Crucero NW60 SUR. Corresponde a CIE060SW062
16	UASM-16		Pórfido con diseminación, cerca de la zona de contacto con el skarn	Nivel 7 Antares. Crucero NW60 SUR. Corresponde a CIE060SW091
17	UASM-17		Pórfido poco alterado. Similar a la muestra UASM-16	Nivel 7 Antares. Crucero NW60 SUR. Corresponde a CIE060SW198

**Mina Santa María
Nivel 1240**

#	Muestra	Muestras Laboratorio	Descripción	Localidad
18	UASM-18		Intersección de vetas de calcita en zona de skarn	Nivel 7 Antares. Crucero NW60 SUR. Corresponde a CIEF060SE046
19	UASM-19		Veta-falla (?) de calcita, cercana a la zona de contacto	Nivel 7 Antares.
20	UASM-20		Dique aplítico con diseminación de sulfuros	Nivel 7 Antares. Corresponde a CIEF060SE074
21	UASM-21		Skarn con mineralización de sulfuros masivos	Nivel 7 Antares. Crucero SE200 SUR. Corresponde a CIE200SW008
22	UASM-22		Veta de calcita, galena y esfalerita, en skarn al alto de la estructura (dique)	Nivel 7 Antares. Crucero SE200 SUR. Corresponde a CIE200SW042
23	UASM-23		Skarn con vetilleo	Nivel 7 Antares. Crucero SE200 SUR. Corresponde a CIE200SW051
24	UASM-24		Skarn: asociación de calcosilicatos	Nivel 7 Antares. Corresponde a CIEF060SE120
25	UASM-25		Dique aplítico con diseminación de sulfuros	Nivel 7 Antares. Crucero SE300 NORTE. Corresponde a CIE300NE009
26	UASM-26		Veta de calcita en skarn con diseminación de sulfuros	Nivel 7 Antares. Crucero SE300 NORTE. Corresponde a CIE300NE026
27	UASM-27		Skarn con mineralización de sulfuros masivos	Nivel 7 Antares. Crucero SE400 NORTE. Corresponde a CIE400NE008
28	UASM-28		Skarn en el tope del crucero	Nivel 7 Antares. Crucero SE400 NORTE. Al fondo del crucero

Mina Cobre Viejo Niveles 5 y 7				
#	Muestra	Muestras Laboratorio	Descripción	Localidad
1	STNRC-019-01		Intrusivo alterado con skarn	Reina de Cobre. Nivel 5
2	STNRC-019-02		Intrusivo sin alteración. Similar a muestra STNRC-019-01	Reina de Cobre. Nivel 5
3	STNRC-018-03		Zona de skarn con mineralización de sulfuros: esfalerita, bornita, pirita y calcopirita	Reina de Cobre. Nivel 5
4	STNRC-017-04		Zona de skarn: asociación de calcosilicatos, concentrados en zonas de fractura	Reina de Cobre. Nivel 5
5	STNRC-021-05	C-05-L	Intrusivo que presenta líneas de flujo, poco alterado	Reina de Cobre. Nivel 5
6	STNRC-021-06		Zona de contacto entre intrusivo y skarn mineralizado	Reina de Cobre. Nivel 5
7	STNRC-021-07	C-07-M	Endoskarn alterado	Reina de Cobre. Nivel 5
8	STNRC-021-08		Intrusivo alterado. Muestra de esquirlas	Reina de Cobre. Nivel 5
9	STNFN5-04-09		Alteración en zona de veta de calcita de aprox. 0.50 m de espesor (zona de falla (?)). Muestra de esquirlas	Reina de Cobre. Nivel 5
10	STNFN5-04-10		Veta de calcita	Reina de Cobre. Nivel 5
11	STNFN5-04-11		Alteración en zona de brecha. Muestra de esquirlas	Reina de Cobre. Nivel 5
12	STNFN5-05-12		Intrusivo con alteración argílica. Tipo pórfido (?)	Reina de Cobre. Nivel 5
13	STNFN5-05-13		Veta de cuarzo con mineralización de pirita y calcopirita. Tipo pórfido (?)	Reina de Cobre. Nivel 5
14	STNFN5-05-14		Intrusivo alterado. Tipo pórfido (?). Muestra de esquirlas	Reina de Cobre. Nivel 5
15	STNFN5-05-15		Intrusivo alterado con vetilleo tipo stockwork y mineralización de sulfuros	Reina de Cobre. Nivel 5
16	FRC-38-16		Intrusivo sin alteración, dique (?). Similar a muestra STNRC-021-05	Reina de Cobre. Nivel 7. Aproximadamente 50 m más debajo del nivel 5
17	FRC-38-17		Aparentemente parte del endoskarn	Reina de Cobre. Nivel 7. Entre FRC-38 y 39 Aproximadamente 50 m más debajo del nivel 5
18	FRC-36-18		Skarn con mineralización de sulfuros masivos	Reina de Cobre. Nivel 7. Aproximadamente 50 m más debajo del nivel 5
19	FRC-36-19		Veta de calcita con drusas	Reina de Cobre. Nivel 7. Aproximadamente 50 m más debajo del nivel 5

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

PV-07-39	INTERCALACIONES IRREGULARES ONDULADAS DE ROCA CALCOSILICATADA Y MINERALIZACIÓN DE SULFUROS	<i>núcleo</i>
<p>Roca calcosilicatada con un bandeo mineralógico muy irregular y burdo, de escala centimétrica, definido por la alternancia de bandas de sílice coloidal. Mineralización de sulfuros: (~75% modal). Con clastos de carbonatos</p>		
PV-07-26	DISEMINACIÓN DE SULFUROS (GN Y SP) EN ROCA CALCOSILICATADA	<i>núcleo</i>
<p>Skarn con bandeo mineralógico irregular definido por la alternancia de bandas de color gris y bandas de color verde a marrón, de calcosilicatos y epidota (Ep?) y disseminación de sulfuros principalmente esfalerita (Sp) y galena (Gn), (~25% modal). En contacto con encajonante con agregados verdes posiblemente de clorita (Chl), y agregados irregulares de calcita (Cal).</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

PV-07-36	SKARN CON VETA DE CUARZO	<i>núcleo</i>
<p>Skarn de color verde con tonalidades marrón, con veta de cuarzo con mineralización de pirita (Py), calcopirita (Cpy), arsenopirita (Spy) y galena (Gn). La textura muestra oquedades producto de corrosión (exsolución?) donde se observan cristales eudrales de pocos milímetros.</p>		
PV-07-20	DISEMINACIÓN DE SULFUROS EN EXOSKARN	<i>núcleo</i>
<p>Exoskarn que presenta un bandeo mineralógico irregular y burdo, definido por la alternancia de zonas claras, de verdosas a marrón, intercaladas con zonas de caliza de tonalidades grises de textura microcristalina y oquedades producto de corrosión.</p> <p>Contiene sulfuros diseminados (~5% modal).</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

PV-07-18 CONTACTO ENTRE CALIZA Y SKARN

núcleo

Contacto muy franco entre zona de skarn con calcosilicatos y mineralización muy fina de sulfuros de color verde a gris y marrón oscuro, se observa vetillo fino y Caliza (Cal) de color blanco a beige claro con marmolización incipiente y fracturas y microfalla que disloca y desplaza cristales de calcita anedral, estructuras oblicuas al plano de contacto.



PV-08-122 CALIZA BRECHADA CON VETAS

núcleo

Caliza brechada con clastos de colores que van de gris a beige claro de tamaño centimétrico, los clastos vas de angulosos a subangulosos, se observan además vetas de calcita hidrotermal con cristales eudrales bien desarrollados en drusas de aproximadamente 1 cm de crecimiento perpendicular a la disposición de la estructura que los aloja.



Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

PV-08-129	EXOSKARN CON VETA DE CUARZO	<i>núcleo</i>
<p>Exoskarn con veta de calcita que exhibe desarrollo de cristales euedrales en drusas y algunos anedrales con mineralización de sulfuros, predominantemente de galena (Gn) y esfalerita (Sp), con textura brechada.</p>		
PV-09-178	DISEMINACIÓN DE SULFUROS (PY Y SP) EN ROCA PORFÍDICA	<i>núcleo</i>
<p>Roca ígnea hipabisal, de tonalidades gris claro a marrón claro, con textura porfídica, de composición que va de ácida a intermedia compuesta por cristales de feldespatos que se observan alterados a sericita (?) y cuarzo, con algunos cristales (> 5 %) de epidota (Ep ?)</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

PV-08-86	INTRUSIVO APLÍTICO	<i>núcleo</i>
<p>Dique aplítico de color gris claro, con horizontes (laminas) de tonalidades que van del gris al morado, con sulfuros diseminados y veta de fluorita. Se observan lentes de feldspatos, en tonos mas claros con una elongación alineada en una misma dirección, con microestructuras (fallas y fracturas) que dislocan a las vetillas</p>		
PV-08-88	DISEMINACIÓN DE SULFUROS EN SKARN	<i>núcleo</i>
<p>Skarn que presenta un bandeo mineralógico irregular y burdo, definido por la alternancia de zonas de coloración verdosa a marrón, intercaladas con zonas de tonalidades marrón a gris oscuro, con oquedades producto de corrosión. Exhibe una textura fibrosa, radial, poco común, con cristales elongados de aproximadamente 1 cm de longitud.</p> <p>Contiene sulfuros diseminados (~35% modal) los cuales se encuentran concentrados debido a una estructura de falla.</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

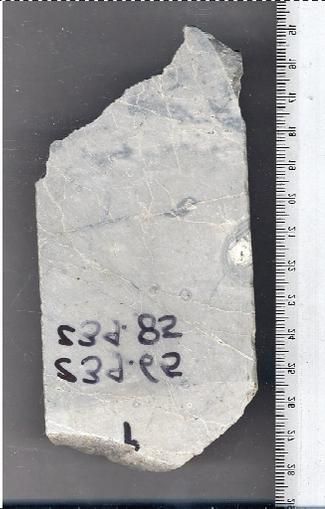
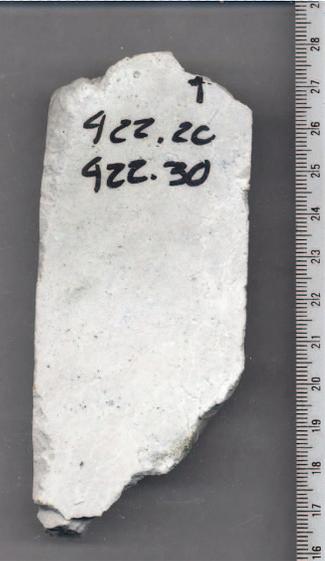
PV-08-90	INTRUSIVO APLÍTICO	<i>núcleo</i>
<p>Dique aplítico de color gris claro, muy fracturado con vetillas en diferente disposición, de tonalidades que van del gris al morado. Se observan pocos lentes de feldespatos, en tonos más claros, con microestructuras (fallas y fracturas) que dislocan a las vetillas.</p>		<p>Al parecer la mineralización se aloja en una zona de falla (?). Contiene sulfuros muy finos diseminados (~5% modal)</p>
PV-07-98	INTRUSIVO. PÓRFIDO RIOLÍTICO	<i>núcleo</i>
<p>Pórfido félsico gris claro, con una matriz afanítica y fenocristales (~15% modal), milimétricos, anedrales de feldespato y cuarzo. La roca se encuentra afectada por alteración de tipo silícica. Presenta fracturación de orden diverso.</p>		<p>Localmente, además, hay oxidación y disseminación muy fina de sulfuros (>5% modal)</p>

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

<p>PV-08-104</p>	<p>BRECHA CEMENTADA POR CALCITA (CAL)</p>	<p><i>núcleo</i></p>
<p>Brecha hidrotermal formada por fragmentos centimétricos angulosos a subángulosos, correspondientes a una caliza micrítica, parcialmente alterada, con clastos conformados de calcosilicatos, cementados por un agregado de Cal milimétrica. Se observan cristales eudrales, en oquedades.</p>		
<p>PV-08-102</p>	<p>INTRUSIVO. PÓRFIDO RIOLÍTICO</p>	<p><i>núcleo</i></p>
<p>Pórfido félsico gris claro, con una matriz afanítica y fenocristales (~30% modal), milimétricos, anedrales de cuarzo y en menor proporción feldespatos. La roca se encuentra afectada por alteración de tipo silícica..</p> <p>Se aprecia un marcado cambio de coloración de un tono claro a un tomo rojizo producto probablemente de oxidación y disseminación muy fina de sulfuros (>5% modal)</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

PV-08-63	CALIZA BRECHADA	<i>núcleo</i>
<p>Caliza micrítica, brechada con clastos de diferentes coloraciones que van de verde grisáceo a marrón claro de tamaño diverso, en general mayor a 5 cm en promedio, los clastos van de subangulosos a subredondeando, los cuales se encuentran cementados por micrita (?) y sílice. Se observan micro fracturas afectando a la misma y sulfuros finos diseminados (> 5% modal)</p>		
PV-08-78	CONTACTO ENTRE DIQUE APLÍTICO Y ROCA CALCOSILICATADA CON SULFUROS	<i>núcleo</i>
<p>Contacto entre el dique aplítico y skarn con asociación de calcosilicatos y diseminación de sulfuros (~10% modal), con bandeamiento mineralógico muy incipiente y burdo. El contacto se observa muy irregular y en ocasiones un tanto difuso. Se aprecia fracturamiento preferencial en 2 direcciones y algunas vetillas de calcita cortando a ambas rocas.</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

PV-07-48	VETA DE SULFUROS GN, SP, PY, EN CALIZA	<i>núcleo</i>
<p>Veta de cuarzo y calcita con mineralización de galena y esfalerita en proporción similar (~40% modal) cristales de tamaños de 1 cm aproximadamente, con algunos cristales de pirita, de tamaño milimétrico, en menor proporción, alojada en Caliza micritica con fracturas bidireccionales rellenas con calcita.</p>	 A photograph of a rock sample labeled '942 95' and '943 05' with an upward-pointing arrow. The sample is a light-colored, crystalline material with darker, mineralized zones. A ruler is placed vertically to the right of the sample for scale, showing centimeter markings.	<i>núcleo</i>
<p>Exoskarn que presenta alternancia de zonas claras, de verdosas a marrón, intercaladas con zonas de caliza de tonalidades grises de textura microcristalina. Se observan oquedades rellenas por calcita (cal) y oxidación concentrada en zonas de fracturas.</p> <p>Contiene sulfuros diseminados (~5% modal).</p>	 A photograph of a rock sample labeled '1399.0' and '399.20' with an upward-pointing arrow. The sample is a vertical, elongated piece of rock showing alternating light and dark zones. A ruler is placed vertically to the right of the sample for scale, showing centimeter markings.	<i>núcleo</i>

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

PV-08-81	DISEMINACIÓN DE SULFUROS EN EXOSKARN	<i>núcleo</i>
<p>Exoskarn que presenta alternancia de zonas calcosilicatos de coloración marrón, intercaladas con zonas de caliza de tonalidades grises de textura microcristalina. Se observan oquedades rellenas por calcita (cal) con desarrollo de cristales eudrales, bien desarrollados, de 0.5 cm de longitud en promedio y oxidación concentrada en zonas de fracturas.</p>		<p>Contiene sulfuros diseminados (~5% modal).</p>
E200-B7	CONTACTO ENTRE CALIZA Y EXOSKARN	<i>Núcleo de interior mina</i>
<p>Contacto transicional entre zona de exoskarn con calcosilicatos de tamaño milimétrico y mineralización muy fina de sulfuros de color verde a gris y marrón oscuro y Caliza (Cal) de color blanco a gris claro con marmolización incipiente y fracturas y microfallas por zona de cizalla.</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

<p>W59-B1</p>	<p>SKARN CON VETILLAS</p>	<p><i>Núcleo de interior mina</i></p>
<p>Skarn de color verde grisáceo con tonalidades marrón, con calcosilicatos de tamaño milimétrico, con vetillas de calcita, se observa poco fracturado, no se aprecia bandeada ni alineación mineral preferencial.</p>		
<p>E60-A1</p>	<p>CONTACTO ENTRE CALIZA Y SKARN</p>	<p><i>Núcleo de interior mina</i></p>
<p>Contacto marcado entre zona de skarn con asociación de calcosilicatos y mineralización fina de sulfuros (~20 modal) de color verde a gris y marrón oscuro, de tamaño milimétrico, se observa vetilleo fino y Caliza (Cal) de color blanco a gris claro y microestructuras que dislocan a ambas rocas.</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

E200-A4	DISEMINACIÓN DE SULFUROS EN EXOSKARN	<i>Núcleo de interior mina</i>
<p>Exoskarn que presenta alternancia de zonas de calcosilicatos de coloración marrón, intercaladas con zonas de caliza de tonalidades grises de textura microcristalina. Con bandeo mineralógico incipiente y vetilleo de calcita con oxidación concentrada en zonas de fracturas.</p> <p>Contiene sulfuros diseminados (~30% modal).</p>		
<p>Dique aplítico de color gris claro, muy fracturado con vetillas de calcita y fluorita en 2 direcciones preferenciales que se intersectan entre si, de tonalidades que van del gris al morado con mineralización de sulfuros predominantemente pirita (Py) y calcopirita (Cpy). Se observan pocos fenocristales de feldespatos alterados.</p> <p>Al parecer la mineralización se aloja en una zona de falla. Con sulfuros diseminados (~15% modal)</p>		<i>Núcleo de interior mina</i>

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

E60-D2	CONTACTO ENTRE CALIZA Y SKARN	<i>Núcleo de interior mina</i>
<p>Contacto muy contundente entre Caliza (Cal) de color blanco a gris claro de textura micrítica y zona de skarn con asociación de calcosilicatos y mineralización de sulfuros (~25 modal) de color marrón oscuro, los cristales son de tamaño milimétrico, se observa vetilleo en diferentes direcciones, se encuentra muy oxidada, los óxidos se concentran predominantemente en fracturas y la zona de contacto.</p>		
E122-B6	DISEMINACIÓN DE SULFUROS EN ENDOSKARN	<i>Núcleo de interior mina</i>
<p>El endoskarn (dique aplítico) presenta textura porfídica fina en matriz afanítica, con fenocristales esencialmente de cuarzo. Está intensamente silicificado, se aprecia un bandeo mineralógico incipiente de calcosilicatos.</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

<p>E122-B6</p>	<p>INTRUSIVO. PÓRFIDO RIOLÍTICO</p>	<p><i>Núcleo de interior mina</i></p>
<p>Pórfido félsico gris muy claro, con una matriz afanítica y fenocristales euédrales de cuarzo y en menos proporción de feldespatos los cuales se observan alterados (sericitizados ?).</p> <p>La roca presenta fracturación de orden diverso, a través de la cual se desarrolla alteración hidrotermal. Piritización diseminada de la matriz, con cristales euédrales y subedrales de Py (>1 cm). Localmente, además, hay oxidación.</p>		
<p>W158-B1</p>	<p>SKARN CON VETA DE CALCITA Y FLUORITA</p>	<p><i>Núcleo de interior mina</i></p>
<p>Veta de calcita y fluorita en proporción similar (~40% modal) cristales de tamaños de 1 cm aproximadamente, con algunos cristales de pirita diseminada, de tamaño milimétrico, en menor proporción, alojada en zona de skarn con fracturas rellenas con calcita.</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

<p>E122-B3</p>	<p>CONTACTO ENTRE CALIZA Y SKARN</p>	<p><i>Núcleo de interior mina</i></p>
<p>Contacto muy franco entre Caliza (Cal) de color blanco a beige claro de composición micrítica, poco fracturada y zona de skarn con calcosilicatos y mineralización de sulfuros de color verde a gris y marrón oscuro, que se observa fracturada, con zonas de oxidación concentrada principalmente en los planos de fracturas.</p>		
<p>E60-A2</p>	<p>MINERALIZACIÓN DE SULFUROS EN SKARN</p>	<p><i>Núcleo de interior mina</i></p>
<p>Skarn que presenta un bandeo mineralógico, definido por la alternancia de zonas de coloración verdosa a marrón, intercaladas con zonas de tonalidades marrón a gris oscuro, con bandas de sulfuros principalmente pirita y calcopirita con cristales eudrales y subdrales los cuales se encuentran concentrados en diferentes proporciones y existe una gradación en el tamaño de los cristales más finos en la parte más somera y de mayor tamaño a mayor profundidad.</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Antares.

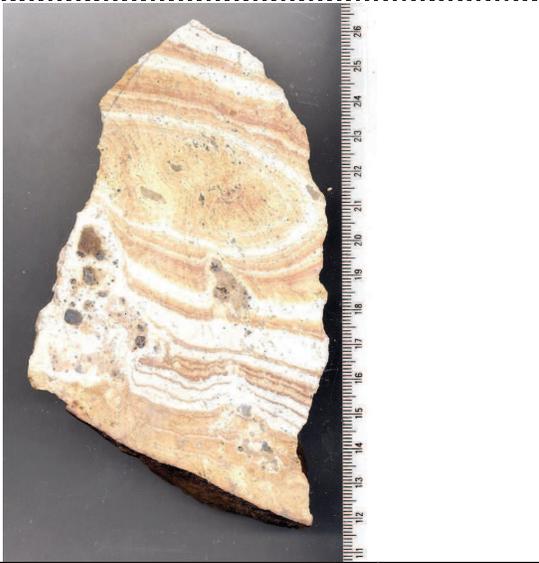
PVSAN-05	DIQUE CON COBERTURA VOLCÁNICA	<i>Superficial</i>
<p>Contacto entre dique porfídico e ignimbrita con líticos accidentales, asimilados de caliza, se observan líneas de flujo y fenocristales de cuarzo en una matriz afanítica alterada.</p>		
PVSAN-06	CALIZA CON ALTERACIÓN SILICA	<i>Superficial</i>
<p>Caliza microcristalina remplazada en su mayoría por sílice coloidal en tonalidades de rojo, ocre y marrón, que se concentra en zonas de fallas y fracturas. Probablemente jasperiode (?), la roca se observa brechada asociada a una estructura de falla de carácter regional.</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Reina de Cobre.

PRC-09-06	INTRUSIVO. PÓRFIDO RIOLÍTICO	<i>núcleo</i>
<p>Pórfido félsico gris claro, silicificado, con una matriz afanítica y fenocristales (~20% modal), milimétricos, anedrales de cuarzo y en menor proporción feldespatos alterados a sericita (?), y alteración de epidota, con vetilleo, con fracturas multidireccionales y sulfuros diseminados (~5 modal).</p>		
<p>Contacto marcado entre zona de skarn con asociación de calcosilicatos finos, de tamaño milimétrico de color verde a gris y marrón oscuro, se observa vetilleo fino y Caliza (Cal) de color blanco a gris claro y microvetillas de calcita, poco fracturada.</p>		<i>núcleo</i>

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Reina de Cobre.

PRC-09-05	MINERALIZACIÓN DE SULFUROS EN EXOSKARN	<i>núcleo</i>
<p>Exoskarn que presenta un bandeo mineralógico incipiente y burdo, definido por la alternancia de zonas de coloración verdosa a marrón, intercaladas con zonas de tonalidades marrón a gris oscuro, con mineralización de sulfuros principalmente pirita y calcopirita con cristales eudrales y subdrales los cuales se encuentran concentrados en diferentes proporciones, sin ninguna disposición preferencial.</p>		<i>núcleo</i>
PRC-09-05	CALIZA CON VETAS DE CALCITA Y GALENA	<i>núcleo</i>
<p>Veta de calcita con mineralización de galena y esfalerita en menor proporción, con cristales de tamaño de 1 cm aproximadamente, con algunos cristales de pirita, de tamaño milimétrico, en menor proporción, alojada en Caliza micritica con fracturas alineadas rellenas con calcita.</p>		<i>núcleo</i>

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Reina de Cobre.

PRC-09-02	MINERALIZACIÓN DE SULFUROS EN ENDOSKARN	<i>núcleo</i>
<p>Endoskarn (pórfido riolítico) presenta textura porfídica fina en matriz afánítica, con fenocristales esencialmente de cuarzo. Está intensamente silicificado y se observan cristales de epidota secundaria, se aprecia un bandeo mineralógico incipiente de calcosilicatos, además de mineralización de sulfuros, principalmente galena (Gn) y esfalerita (Sp) en bandas.</p>		<i>núcleo</i>
PRC-09-04	SKARN CON VETA DE SULFUROS GN, SP. PY	<i>núcleo</i>
<p>Skarn con sulfuros masivos, cristales de tamaño centimétrico, principalmente esfalerita, con galena en menor proporción y pirita, concentrados por la intersección de vetas y vetillas de calcita bandeada, con intercalación de óxidos.</p>		<i>núcleo</i>

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Reina de Cobre.

PRC-10-13	EXOSKARN CON DISEMINACIÓN DE SULFUROS	<i>núcleo</i>
<p>Skarn con bandas finas, con una disposición alineada en una dirección preferencial, con lentes de calcosilicatos y zonas de alteración producto de remplazamiento con mineralización muy fina de sulfuros (~5% modal) y fracturas que cortan el bandeamiento transversalmente.</p>		
PRC-10-12	INTRUSIVO. PÓRFIDO RIOLÍTICO	<i>núcleo</i>
<p>Pórfido félsico gris claro, silicificado, con una matriz afanítica y fenocristales (~15% modal), milimétricos, anedrales de cuarzo y en menor proporción feldespatos alterados a sericita (?), con vetilleo, con fracturas multidireccionales y sulfuros diseminados, principalmente pirita (Py) (~10 modal). Localmente se encuentra se observe en aparente relación de corte con otro cuerpo intrusivo.</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Reina de Cobre.

PRC-10-10	SKARN	<i>núcleo</i>
<p>Skarn (endoskarn?) con bandeo mineralógico muy pobre, irregular y burdo, definido por la alternancia de dos zonas diferentes en su color: blanca, microcristalina, rica en cuarzo microcristalino y en mayor proporción una zona de coloración marrón a verdosa, rica en calcosilicatos.</p>		
PRC-10-08	ENDOSKARN	<i>núcleo</i>
<p>El endoskarn (dique aplítico ?) presenta textura porfídica fina en matriz afánítica, con fenocristales esencialmente de cuarzo. Está intensamente silicificado, se aprecia un bandeo mineralógico en una dirección preferencial muy marcado, con bandas de hasta 1 cm de espesor y disseminación muy incipiente de sulfuros (>5% modal)</p>		

Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Reina de Cobre.

PRC-10-08	SKARN	<i>núcleo</i>
<p>Skarn (endoskarn?) con bandeado mineralógico, de espesor >2 cm, definido por la alternancia de dos zonas diferentes en su color: blanca, microcristalina, rica en cuarzo microcristalino y una zona de coloración marrón a gris, rica en calcosilicatos, con algunos cristales de epidota .</p>		
STNRC-021-05	INTRUSIVO. PÓRFIDO RIOLÍTICO	<i>Interior Mina</i>
<p>Pórfido félsico gris claro, silicificado, con una matriz afanítica y fenocristales (~25% modal), milimétricos, anedrales de cuarzo y en menor proporción feldespatos alterados a sericita (?), y alteración de epidota, con vetilleo, con fracturas multidireccionales y sulfuros diseminados (~10 modal). Localmente presenta líneas de flujo.</p>		

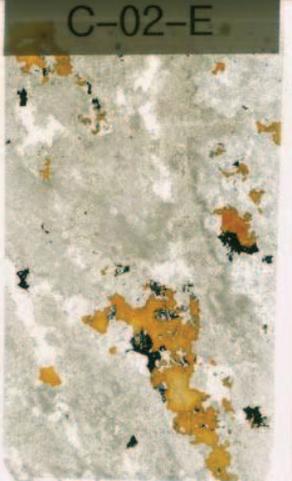
Tabla. 1.2. Descripción macroscópica de las muestras de Reina de Cobre.

<p>STNRC-021-07</p>	<p>SKARN CON VETA DE CUARZO Y CALCITA</p>	<p><i>Interior mina</i></p>
<p>Skarn con vetas de cuarzo y calcita, que presenta mineralización de sulfuros, principalmente esfalerita (Sp) y óxidos, que se encuentran concentrados en planos de falla.</p>		
<p>RCCV-23</p>	<p>SKARN</p>	<p><i>Superficial</i></p>
<p>Skarn (exoskarn ?) con bandeo mineralógico irregular y burdo, milimétrico, definido por la alternancia de dos zonas diferentes en su color: blanca, microcristalina, rica en cuarzo anedral con cantidades y zona verde a ocre, rica en granate y diseminación de sulfuros oxidados.</p>		

Anexo 2

Petrografía

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del
Skarn de Velardeña, Durango

C-02-E	Skarn de granate con mineralización (Zn-Cu-Pb)	
METÁLICOS	Esfalerita, calcopirita, galena, pirita (scheelita, arsenopirita)	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> granate-Ca, calcita, cuarzo <i>Accesorios:</i> clorita, epidota, adularia, titanita (?), zeolitas	
MODO	Gt 50 %; Cal 20 %; Q 10 %; Sph+Cpy 20 %	
TEXTURAS	Fanerocristalina (250 μm – 1 mm), granular, masiva. Evidencias de reemplazamiento y mineralización en etapas (progradante \rightarrow retrogradante).	

DESCRIPCIÓN

Los granates son euedrales, con anisotropía anómala, y presentan zonación concéntrica. El tamaño de grano predominante es fanero- a micro-cristalino (250 μm – 1 mm). Intersticialmente y como reemplazamiento parcial de los granates, se halla una asociación retrogradante de cuarzo-calcita-clorita y sulfuros, con otras fases minoritarias asociadas (epidota, scheelita, adularia).

El cuarzo y la calcita son anedrales y alcanzan 2 mm de longitud. Incluyen microcristales euedrales de adularia, de $\sim 50 \mu\text{m}$.

La clorita forma agregados radiales de hasta $\sim 50 \mu\text{m}$. La epidota se encuentra principalmente alterando los cristales de granate, y forma agregados micro-criptomicrocristalinos.

La esfalerita es el mineral metálico más abundante y forma agregados irregulares de granos anedrales. Incluye microcristales de calcopirita en una textura tipo “*chalcopyrite disease*”.

La arsenopirita, la pirita y la galena se encuentran diseminadas, y la scheelita se encuentra asociada al cuarzo.

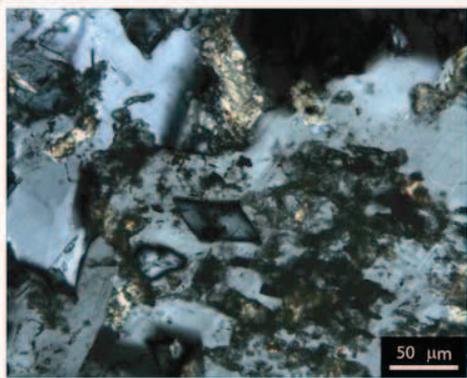


Figura 1. Cristales de adularia (euedral, en el centro) asociados calcita y cuarzo. Luz transmitida, con analizador.

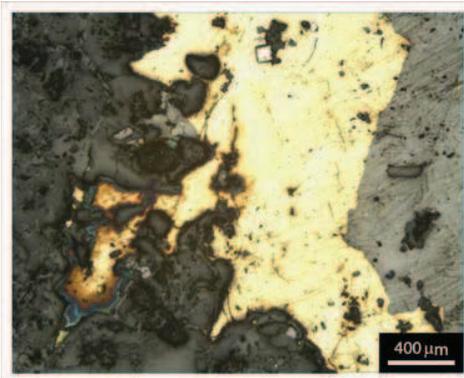
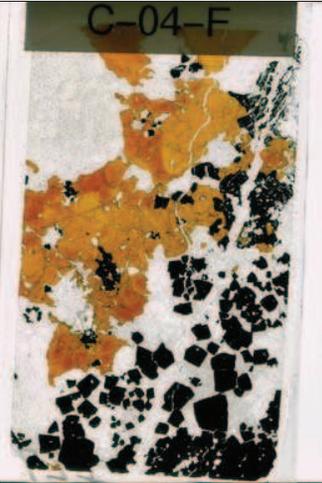


Figura 2. Cristales de esfalerita y calcopirita en aparente equilibrio petrográfico, con pirita (euedral) incluida. Luz reflejada.

C-04-F	Mineralización metálica (Zn-Fe-Pb) semimasiva (~50 %)	
METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> Calcita, cuarzo <i>Accesorios:</i> Adularia, clorita, sericita (?)	
NO METÁLICOS	Esfalerita, pirita, galena, calcopirita	
MODO	Cal 25 %, Q 20 %, Sph 30 % Py 20 %, Gn-Cpy 5 %	
TEXTURAS	Fanerocristalina (<4 mm) Inequigranular, masiva	

DESCRIPCIÓN

La pirita forma granos subedrales a euedrales de hasta 4 mm, que incluyen escasos granos de calcopirita y galena (por su carácter poiquilítico).

La esfalerita es anedral y forma agregados irregulares. Contiene inclusiones de calcopirita (“*chalcopyrite disease*”) y está paragenéticamente asociada a galena en cantidades subordinadas (también anedral).

La calcita forma mosaicos de cristales anedrales de hasta 5 mm de longitud, que incluyen a los sulfuros y los cortan en vetillas. Incluyen, además, abundantes cristales euedrales de adularia, de hasta 500 μm .

El cuarzo se presenta en cristales subedrales (prismáticos bipiramidales, de hasta 1 mm), usualmente incluidos una matriz de esfalerita.

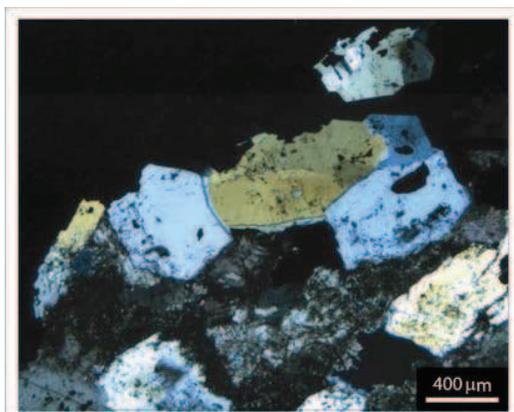


Figura 1. Cristales de cuarzo (subedral) asociados a esfalerita (opaco) y calcita. Luz transmitida, con analizador.

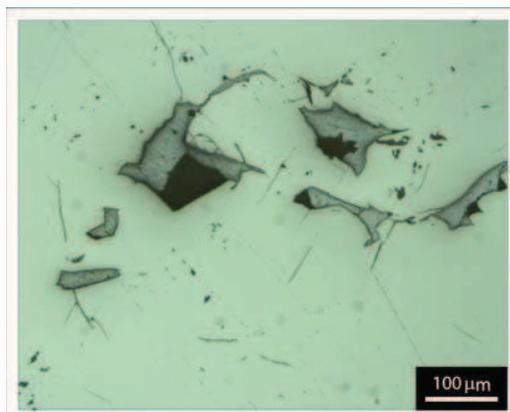


Figura 2. Inclusiones de galena en fanerocristal de pirita de carácter poiquilítico. Luz reflejada.

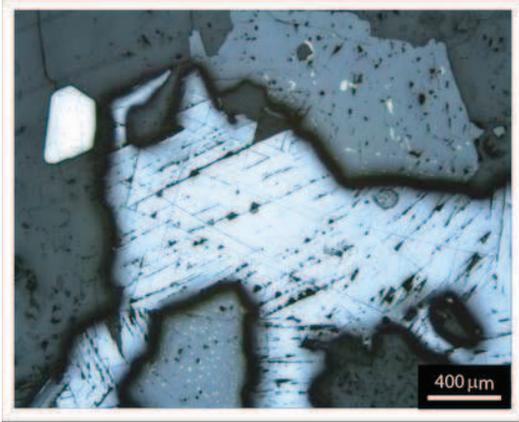
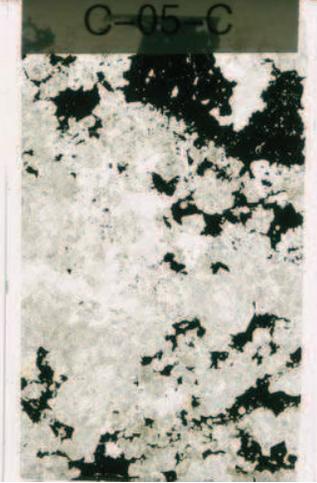


Figura 3. Galena asociada a esfalerita rica en inclusiones de calcopirita. Los bordes de grano son curvilíneos y regulares. Luz reflejada

C-05-C	Skarn de granate con mineralización (Cu-Pb)	
METÁLICOS	Calcopirita > galena pirita > sulfosal de Pb (?)	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> granate-Ca, calcita, cuarzo <i>Accesorios:</i> adularia, clorita, epidota	
MODO	Gt 50 %, Cpy (± otros sulfuros) 20 % Cal 20 %, Q 10 % Fanerocristalina (< 3mm) Inequigranular, masiva	
TEXTURAS	Evidencias de reemplazamiento (pseudomorfismo) Mineralización en etapas (progradante → retrogradante).	

DESCRIPCIÓN

Los cristales de granate son euedrales, con anisotropía anómala, y presentan zonación concéntrica. El tamaño de grano predominante es fanerocristalino (<3 mm). Intersticialmente e incluyendo a los cristales de granate, se halla una asociación retrogradante de cuarzo-calcita-adularia (+sulfuros). En algunos casos, los cristales de granate están parcialmente pseudomorfizados por clorita con otras fases como epidota y calcita. Localmente muestran una textura relicta radial que podría corresponder a clinopiroxeno reemplazado.

El cuarzo y la calcita son de euedrales a anedrales y forman una textura en mosaico.

La clorita forma agregados radiales de hasta ~50 µm de diámetro.

La epidota se encuentra principalmente alterando los núcleos de los cristales de granate.

La principal fase opaca es calcopirita, y forma agregados irregulares de granos anedrales. En cantidades subordinadas hay esfalerita y galena, principalmente formando inclusiones en la calcopirita. Además se ha hallado una fase minoritaria de alta reflectividad, baja dureza, morfología prismática y elevada anisotropía, que podría ser una sulfosal de plomo.

La pirita se halla diseminada y forma agregados de granos subedrales.

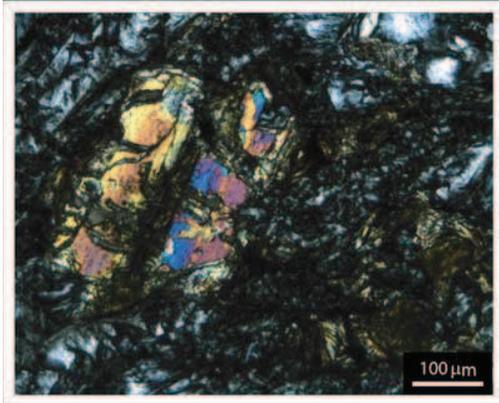


Figura 1. Cristal de epidota en el núcleo de un cristal de granate (alteración). Luz transmitida con analizador

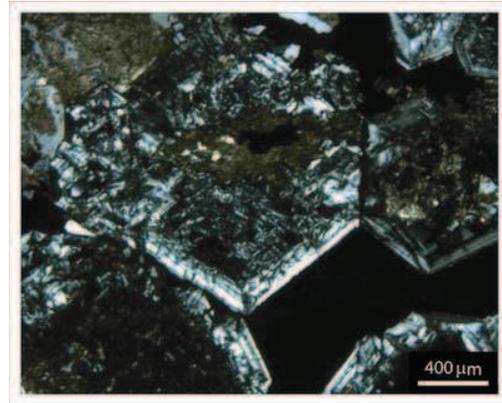


Figura 2. Cristales de granate parcialmente alterados, con zonación concéntrica y anisotropía anómala hacia los bordes de los cristales. Luz transmitida con analizador

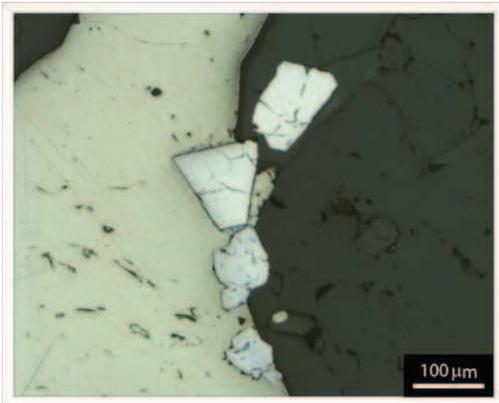


Figura 3. Granos subedrales de pirita en el límite entre un grano de calcopirita y uno de cuarzo. Luz reflejada

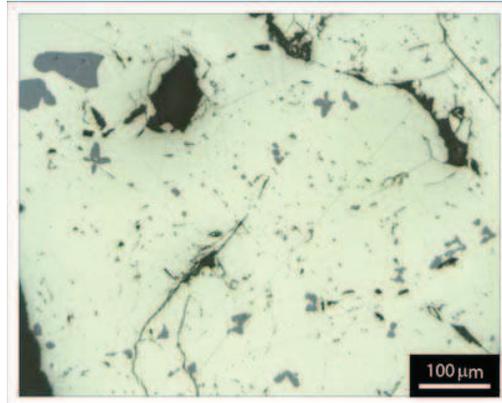


Figura 4. Esfalerita formando inclusiones en calcopirita. Luz reflejada



Figura 5. Cristales de una posible sulfosal de Pb, incluidos en calcopirita. Luz transmitida

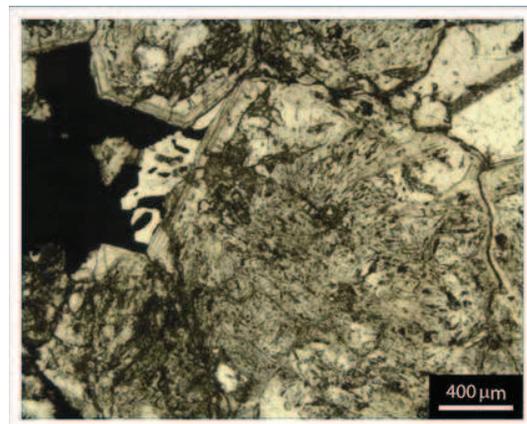


Figura 6. Cristales de granate con una textura relict (fibras). Luz transmitida sin analizador

C-05-L	Pórfido dacítico propilitizado	
METÁLICOS	(diseminados) calcopirita, galena, pirita, arsenopirita, marcasita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> plagioclasa > cuarzo <i>Accesorios:</i> biotita, K-feldespato > circón <i>De alteración:</i> calcita, anfíbol-Ca	
MODO	-	
TEXTURAS	Porfídica-holocristalina Mineralización metálica diseminada (<1 %) Alteración tipo propilitización	

DESCRIPCIÓN

Textura porfídica-holocristalina, consistente en fenocristales de hasta 4 mm de plagioclasa y biotita, en una matriz microcristalina y anedral rica en cuarzo y plagioclasa.

La plagioclasa presenta maclado (polisintético) y zonación concéntrica, y está parcialmente alterada a epidota-sericita. Tiene antipertitas.

La biotita es euedral y está poco alterada (solo los bordes de grano).

La matriz presenta propilitización, pues está afectada por una asociación de alteración de calcita-epidota-anfíbol (de la serie tremolita-actinolita). La alteración se desarrolla principalmente en vetillas irregulares que también cortan los fenocristales.

Los sulfuros se hallan diseminados en la matriz y forman granos y agregados de hasta 100 μm .

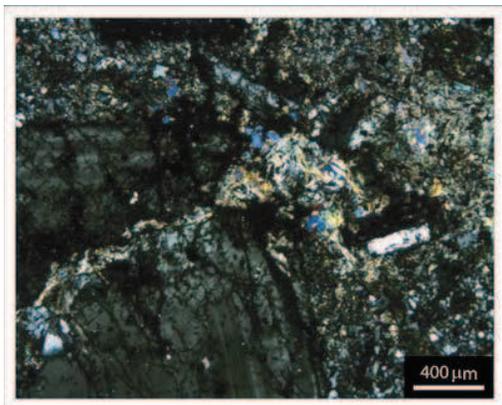


Figura 1. Fenocristal de plagioclasa con una asociación de alteración de anfíbol y epidota emplazada en una vetilla. Luz transmitida, con analizador.

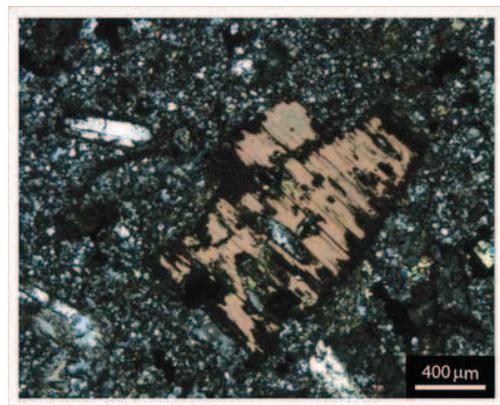


Figura 2. Fenocristal de biotita (colores de interferencia enmascarados a café-rojizo), en una matriz cuarzo-feldespática. Luz transmitida, con analizador.

C-07-B	Contacto entre el mármol y skarn de clinozoisita	
METÁLICOS	(diseminados) pirita > pirrotita, marcasita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> calcita, clinozoisita, cuarzo <i>Accesorios:</i> epidota, clinopiroxeno-Ca	
MODO	-	
TEXTURAS	<i>Mármol:</i> Granular, microcristalino (con relictos sedimentarios como intraclastos) <i>Contacto:</i> abrupto <i>Skarn:</i> Inequigranular, decusada, con evidencias de reemplazamiento, fanerocristalino	

DESCRIPCIÓN

Contacto abrupto entre un mármol microcristalino y un skarn fanerocristalino de clinozoisita.

Los sulfuros se hallan diseminados principalmente en el skarn. El más abundante, la pirita, es de subedral a euedral y su tamaño de grano va de 50 a 500 μm . En cantidades subordinadas se hay pirrotita y marcasita asociadas a la pirita.

La clinozoisita forma cristales euedrales prismáticos de hasta 5 mm de longitud, desorientados. Se encuentra asociada a cuarzo y calcita anedral. El clinopiroxeno es escaso (prismas de hasta 500 μm de longitud), estando concentrado en la zona de contacto.

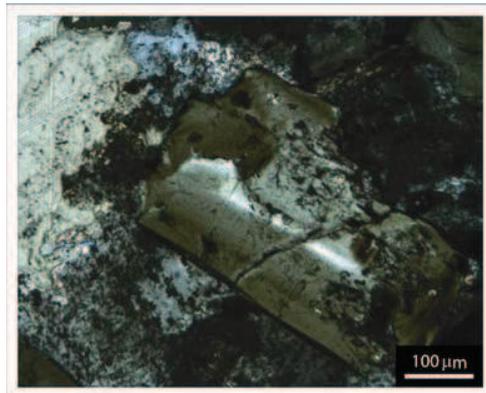


Figura 1. Cristal zonado de clinozoisita euedral, asociado a calcita y cuarzo. Luz transmitida con analizador.

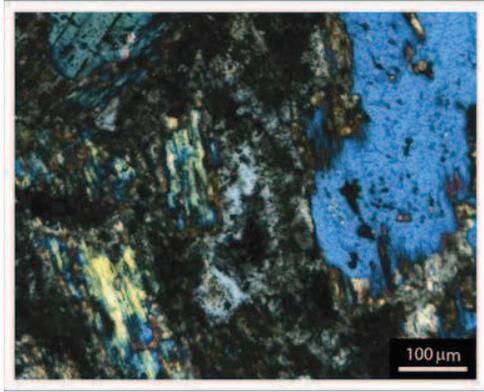


Figura 3. Fenocristales de clinopiroxeno con cuarzo. Luz transmitida con analizador.

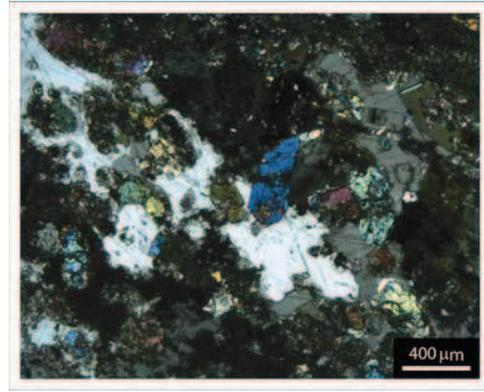


Figura 4. Cristales de clinopiroxeno (colores de interferencia azul-morado), con calcita. Luz transmitida con analizador.

C-08-J	Dique silicificado	
METÁLICOS	(diseminados) Pirita, rutilo (?)	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> cuarzo <i>Accesorios:</i> calcita	
MODO	-	
TEXTURAS	Bandeada relict (posibles pseudomorfos) Reemplazamiento masivo (silicificación)	

DESCRIPCIÓN

Silicificación casi total; consiste en cuarzo anedral micro-criptocristalino. Los relictos que marcan el bandeamiento podrían ser granates pseudomorfizados. Hay micro-vetillas de calcita, y cristales euedrales de pirita (<200 μm) diseminados con inclusiones de calcopirita.

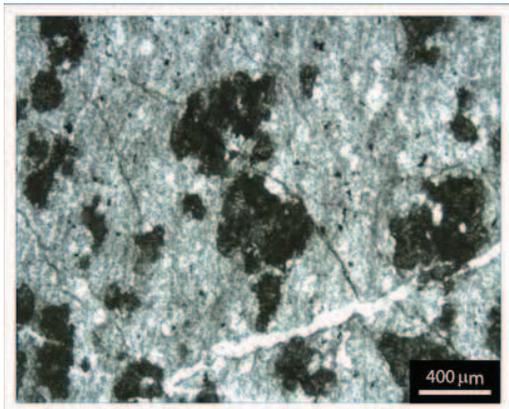


Figura 1. Posibles cristales relictos de posibles granate, en una matriz de cuarzo criptocristalino. Luz transmitida sin analizador.

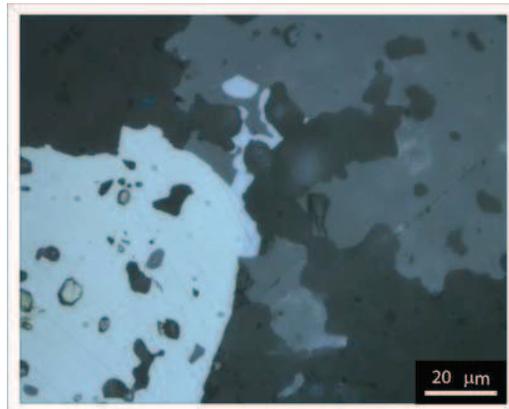


Figura 2. Pirita y óxidos (¿rutilo?). Luz reflejada.

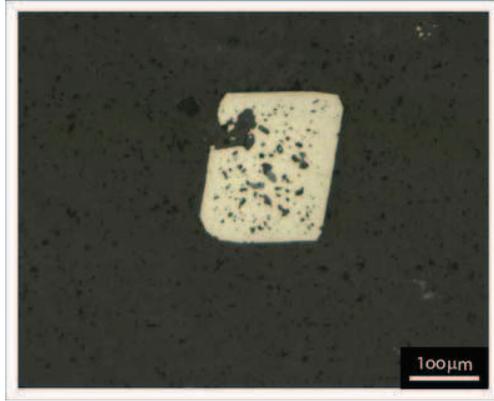


Figura 3. Cristal de pirita subedral de carácter poiquilítico. Luz reflejada.

C-10-i	Skarn de granate (estéril)	
METÁLICOS	(diseminados) pirita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> calcita, granate-Ca, clinozoisita <i>Accesorios:</i> cuarzo	
MODO	-	
TEXTURAS	Micro-fanerocristalina, ~granular Evidencias de mineralización en etapas (progradante → retrogradante)	

DESCRIPCIÓN

Cristales de granate subedrales, mayoritariamente entre 100 y 300 μm , sin alterar. Son prácticamente isótopos y no muestran zonación.

Intersticialmente respecto a los cristales de granate hay calcita en mosaico (anedral, inequigular), asociada con clinozoisita euedral (y epidota anedral), de hasta 700 μm de longitud.

El cuarzo es muy escaso y se halla también en la paragénesis "intersticial". Hay una generación de carbonato microcristalino que podría ser siderita o ankerita (*¿supergénico?*).

La pirita es el único mineral opaco. Se encuentra diseminada (< 1 %), en forma de granos anedrales dispuestos intersticialmente respecto a los granates.

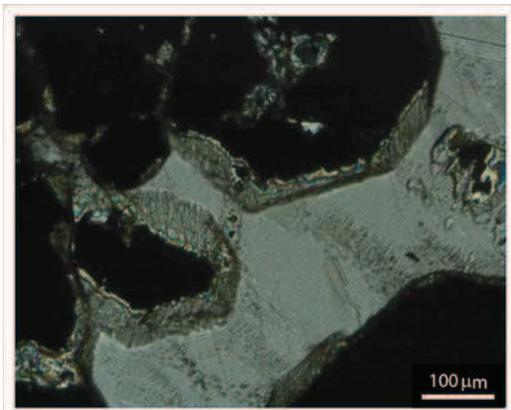


Figura 1. Cristales de granate con zonación concéntrica. Luz transmitida con analizador.

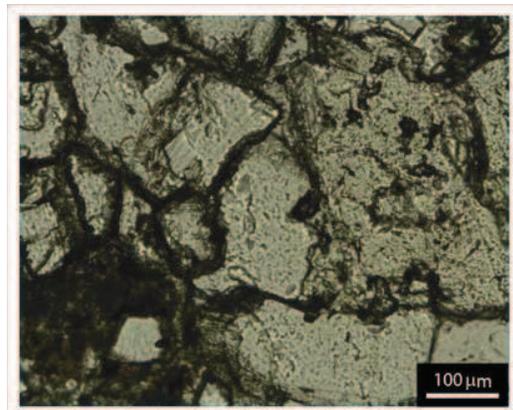


Figura 2. Cristales de siderita microcristalinos. Luz transmitida sin analizador.

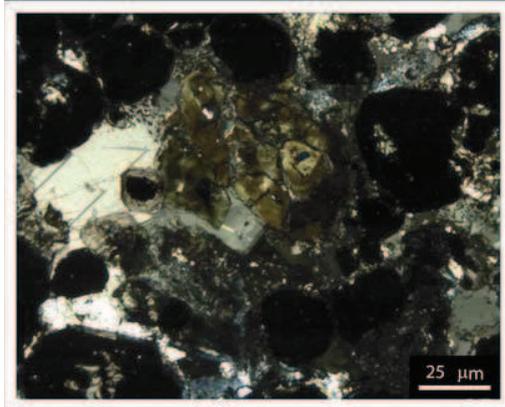


Figura 3. Cristales de granate, con calcita intersticial y clinozoisita (al centro).
Luz transmitida con analizador.

C-12-H	Monzogranito	
METÁLICOS	Pirita (en las vetas)	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> cuarzo, plagioclasa, feldespato-K <i>Accesorios:</i> biotita <i>Vetas:</i> calcita, cuarzo	
MODO	Q 30%, Pl 30 %, KF 25 %, Biot 15 %	
TEXTURAS	Granítica inequigranular (~porfídica) Vetas de calcita-cuarzo-pirita Poca alteración sericitica	

DESCRIPCIÓN

Fenocristales de cuarzo, plagioclasa, feldespato-K y biotita, generalmente de 2-3 mm, en una matriz microcristalina cuarzo-feldespática de ~200 μm. Los fenocristales muestran poca o nula alteración; únicamente la biotita presenta reemplazamiento local a clorita y la plagioclasa una sericitización incipiente.

Hay una vetilla de 4 mm de espesor de calcita, en textura de mosaico (anedral, inequigranular), con cristales de cuarzo en los bordes de la fractura, y pirita anedral en el centro.

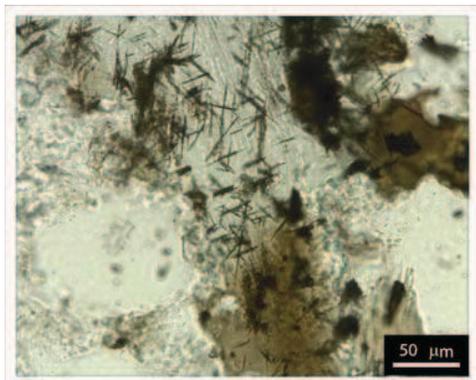


Figura 1. Cristales aciculares de hematita (?) incluidos en cristales de cuarzo. Luz transmitida con analizador.

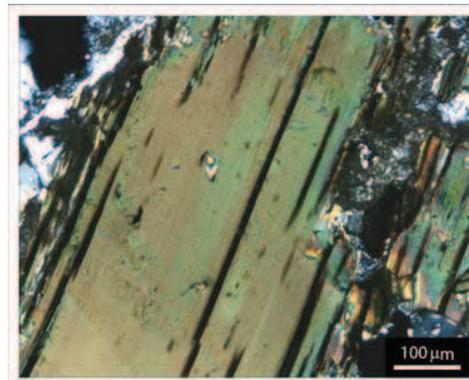


Figura 2. Fenocristales de biotita (color de interferencia enmascarado a café-rojizo). Luz transmitida con analizador

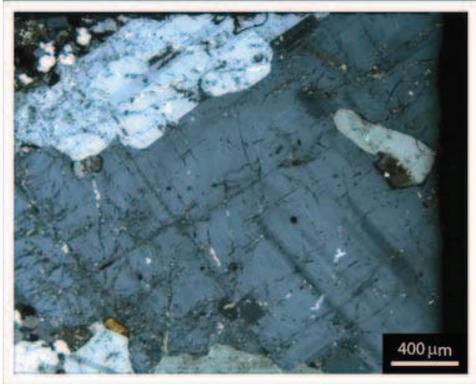


Figura 3. Fenocristales de plagioclasa.
Luz transmitida con analizador.

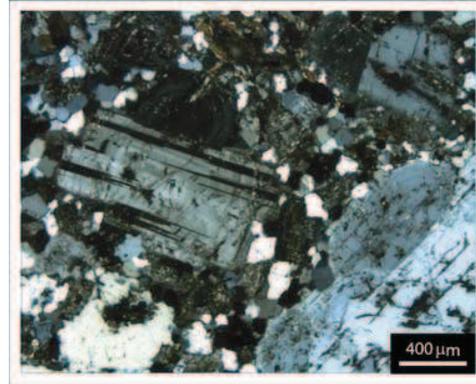


Figura 4. Fenocristales de plagioclasa, en una
matriz rica en cuarzo.
Luz transmitida con analizador.

C-13-G	Endoskarn criptocristalino (estéril)	
METÁLICOS	(diseminados) pirita, arsenopirita, marcasita, calcopirita, covelita, esfalerita, goethita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> plagioclasa, clinopiroxeno-Ca, wollastonita <i>Accesorios:</i> epidota, cuarzo, granate (?)	
MODO	-	
TEXTURAS	Criptocristalina (de calcosilicatos) Alteración casi total (skarnificación) Porfídica relictiva (pseudomorfo) Bandeado tenue	

DESCRIPCIÓN

Fenocristales relictos de plagioclasa, en su mayoría reemplazados por epidota y clorita.

Hay pseudomorfos rellenos por calcita, que se encuentran incluidos en una matriz criptocristalina, probablemente calcosilicatos secundarios (¿granate o piroxeno?).

La clorita también se encuentra relleno microfracturas.

La wollastonita presenta un hábito acicular y forma agregados radiales (de hasta 1 mm de longitud), dispuestos preferentemente en planos de fractura o pseudomorfizando cristales de plagioclasa.

El cuarzo se encuentra de manera accesoria en vetillas.

Los sulfuros se encuentran de manera diseminada (<1 % modal), forman agregados de hasta ~1 mm, y se concentran en fracturas y pseudomorfizando fenocristales.

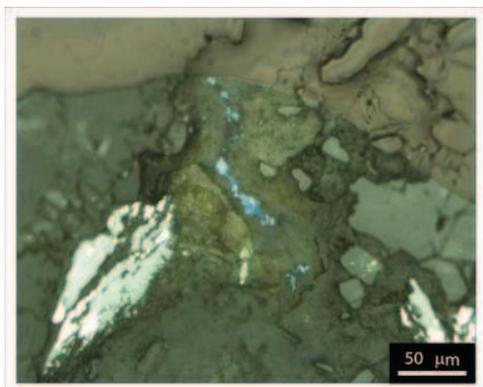


Figura 1. Covelita, pirita y esfalerita, pseudomorfizando fenocristales relictos. Luz reflejada.

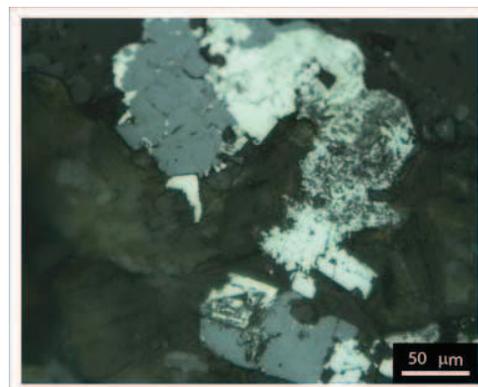


Figura 2. Pirita con marcasita asociada a esfalerita. Luz reflejada

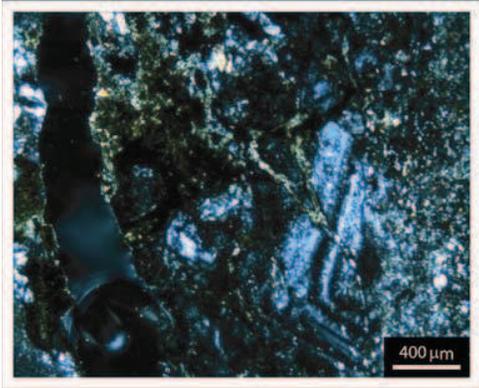


Figura 3. Fenocristales relictos de plagioclasa, con maclado polisintético, en un matriz calcosilicatada con vetillas de calcita-clorita. Luz transmitida con analizador.

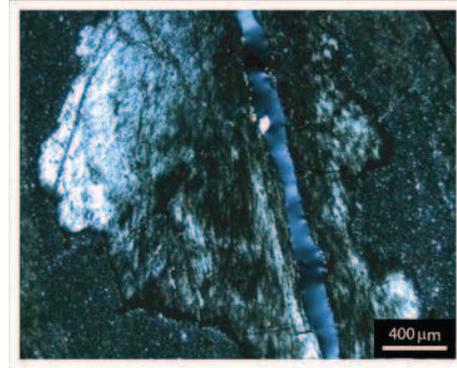


Figura 4. Cristales fibrosos de wollastonita. Luz transmitida con analizador.

C-23-N	Skarn de granate (estéril)	
METÁLICOS	(diseminados) pirrotita, hematita, goethita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> granate-Ca, calcita, cuarzo, piroxeno-Ca <i>Accesorios:</i> Clorita, sericita	
MODO	Gt 50 %, Cal 20 %, Q 20 %, Cpx 5 % Fanerocrystalina (100 μm – 2 mm) Granular, masiva	
TEXTURAS	Evidencias de reemplazamiento Mineralización en etapas (progradante \rightarrow retrogradante)	

DESCRIPCIÓN

Cristales de granate euedrales con zonación concéntrica y alteración incipiente a clorita, preferentemente en los núcleos.

Textura ~granular, con paragénesis retrogradante en posición intersticial, la cual consiste en calcita y cuarzo (en mosaico) con cristales diseminados de hematita microcristalina de hábito tabular.

Los cristales de granate incluyen granos de piroxeno anedral-subedral, generalmente de menos de 100 μm .

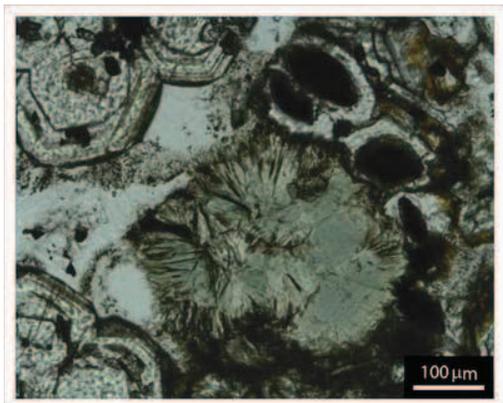


Figura 1. Agregados radiales de clorita y cristales de granate.
Luz transmitida con analizador

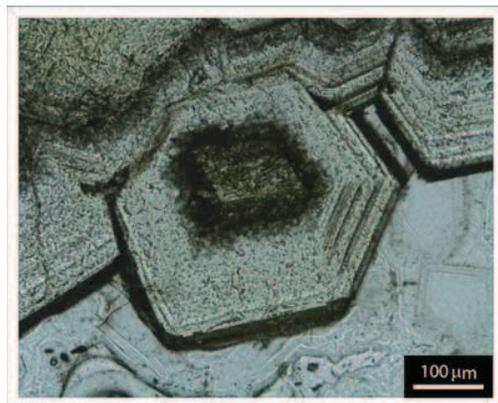


Figura 2. Cristales de granate con zonación concéntrica.
Luz transmitida sin analizador.

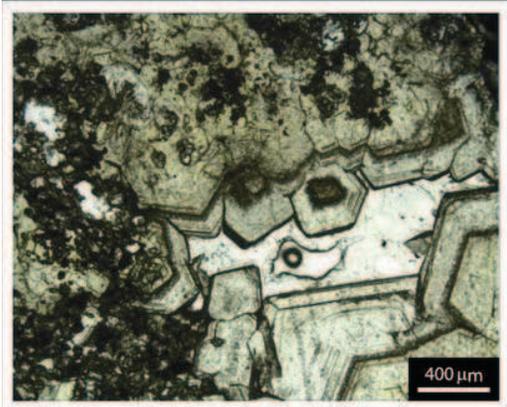


Figura 3. Cristales eudrales de granate con inclusiones de piroxeno.
Luz transmitida sin analizador.

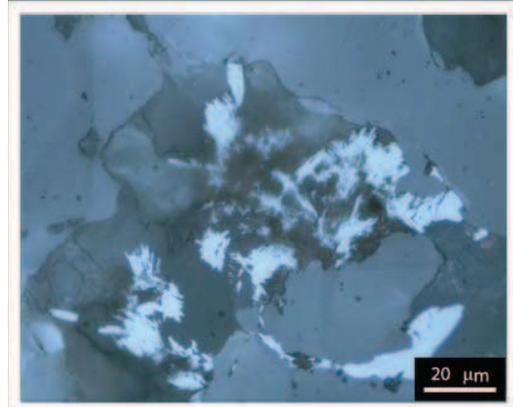


Figura 4. Cristales tabulares de hematita.
Luz reflejada

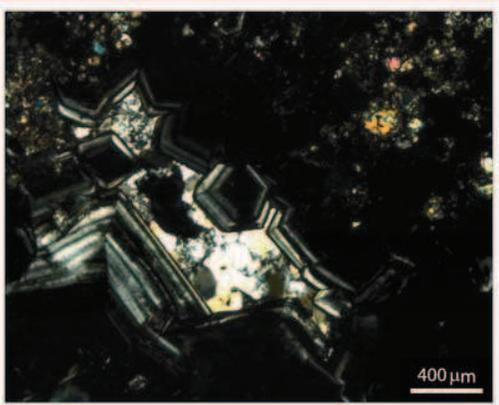


Figura 5. Cristales eudrales de granate con zonación e inclusiones de piroxeno.
Luz transmitida con analizador.

V-06-AG	Jasperoide (sedimentario)	
METÁLICOS	(diseminado) goethita	
NO METÁLICOS	cuarzo, calcita	
MODO	-	
TEXTURAS	Micro-criptocristalina Vetilleo primario (¿diagenético?) Alteración parcial a calcita Teñida a oxihidróxidos de Fe (alteración supergénica)	

DESCRIPCIÓN

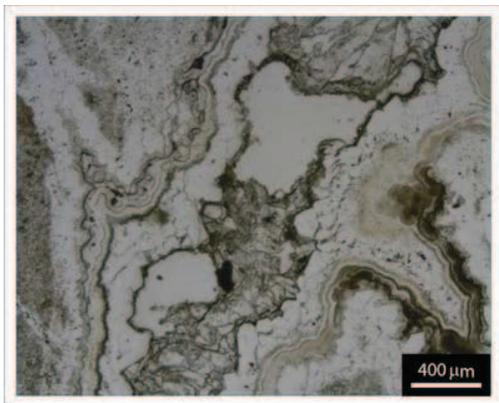


Figura 1. Agregado micro-criptocristalino de cuarzo. Luz transmitida sin analizador

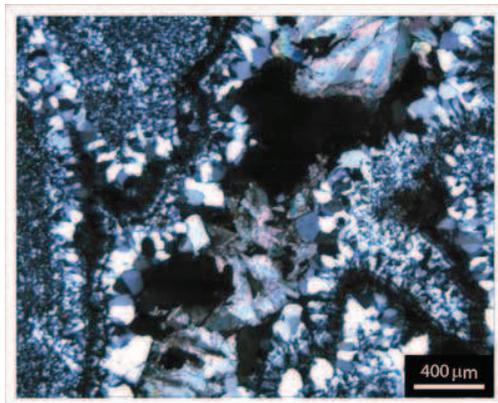


Figura 2. Agregado micro-criptocristalino de cuarzo. Luz transmitida con analizador

V-18-E	Mineralización masiva (Zn-Pb-Fe) en contacto con caliza skarnificada	
METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> marcasita-pirita, esfalerita <i>Accesorios:</i> galena, pirrotita, calcopirita	
NO METÁLICOS	Calcita, cuarzo, adularia, epidota (?)	
MODO	-	
TEXTURAS	Mineralización masiva, con ganga diseminada (paragenéticamente asociada) Vetillas de caltita (tardías)	

DESCRIPCIÓN

La marcasita forma agregados microcristalinos en asociación con pirita, siendo posiblemente secundaria.

La esfalerita forma agregados masivos e irregulares de granos anedrales, ricos en inclusiones (~25 µm) de pirrotita, y, mucho más escasas, de calcopirita. Estos agregados contienen microcristales subedrales de cuarzo.

La galena forma granos con bordes regulares y curvilíneos (de equilibrio) con la esfalerita.

La calcita se encuentra esencialmente como relleno de vetillas irregulares.

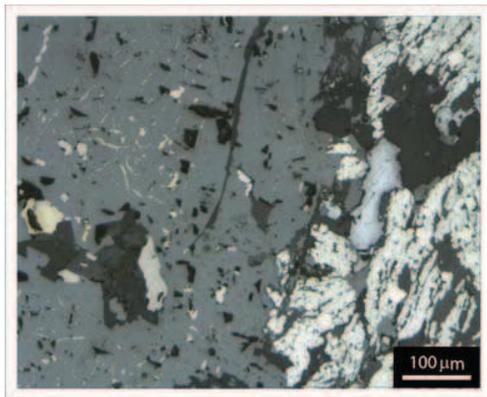


Figura 1. Agregados microcristalinos de marcasita en asociación con pirita, galena y esfalerita. La pirrotita y la calcopirita forman inclusiones en la esfalerita. Luz reflejada.

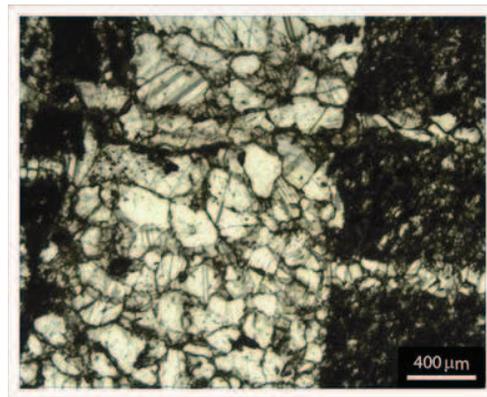
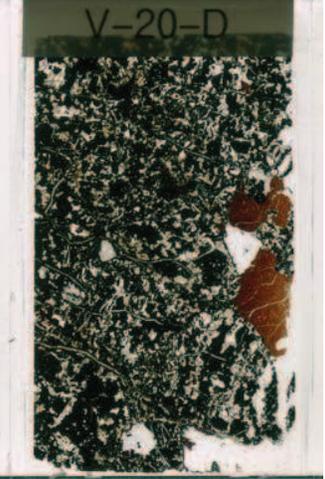


Figura 2. Veta de calcita. Luz transmitida sin analizador.

V-20-D	Mineralización masiva (Fe-Zn ±Pb-Cu)	
METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> Pirita, esfalerita, galena, calcopirita <i>Accesorios:</i> pirrotita, marcasita, arsenopirita	
NO METÁLICOS	Cuarzo, calcita	
MODO	Py 50 %, Sp 20 %, Gn 10 % Cpy 10 %, Mrc-Apy 10 %	
TEXTURAS	Masiva Sucesión pasiva Cristales poiquilíticos de pirita	

DESCRIPCIÓN

Pirita masiva subedral, con marcasita de grano fino (<100 μm) y eudral en los bordes, y con inclusiones de pirrotita (carácter poiquilítico).

La esfalerita es rica en Fe, y se encuentra en paragénesis con la pirita con bordes grano regulares. Contiene inclusiones de calcopirita (textura “*chalcopirite disease*”).

La galena ocurre diseminada, a veces en contacto con calcopirita, y paragenéticamente asociada a la esfalerita.

La pirrotita también se presenta diseminada, en menor proporción que el resto de los sulfuros, y a veces incluida en la pirita.

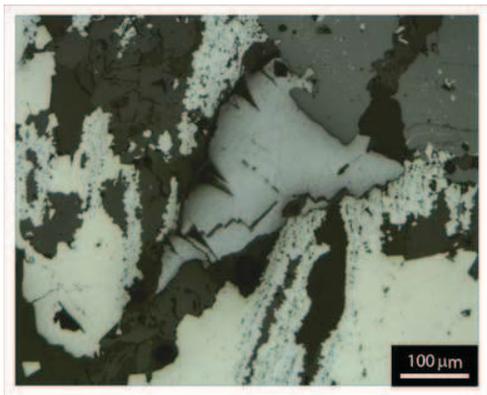


Figura 1. Agregados de pirita alterados a marcasita, con galena y esfalerita. Luz reflejada

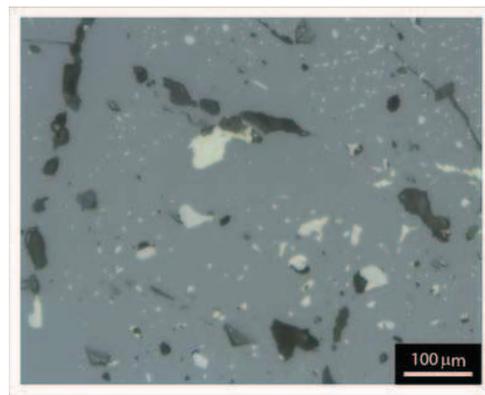


Figura 2. Inclusiones de calcopirita y pirrotita en cristal de esfalerita. Luz reflejada

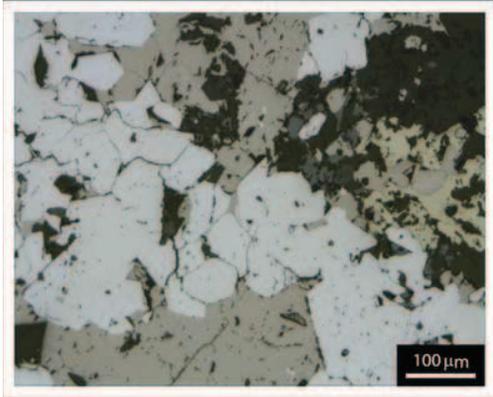


Figura 3. Cristales de pirrotita, arsenopirita, pirita y calcopirita en paragénesis. Luz reflejada.

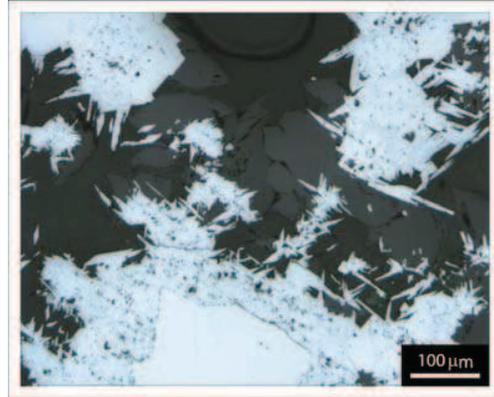
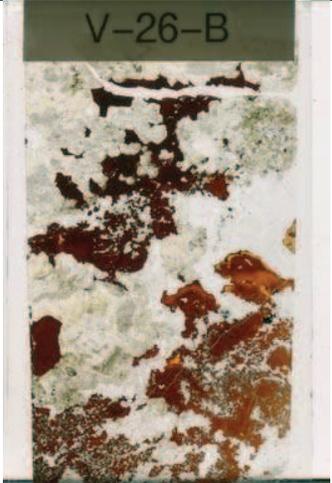


Figura 4. Cristales de arsenopirita y marcasita sobrecreciendo pirita. Luz reflejada

V-26-B	Skarn de granate mineralizado (Zn ±Cu)	
METÁLICOS	Esfalerita, calcopirita, pirita, marcasita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> granate-Ca, calcita, piroxeno-Ca <i>Accesorios:</i> cuarzo, anfíbol-Ca, wollastonita, clorita, adularia	
MODO	Gt 30 %, Cal 30 %, Sph 30 %, Cpx 10 % Fanerocristalina (500 µm – 3 mm) Reemplazamiento	
TEXTURAS	Mineralización en etapas (progradante → retrogradante)	

DESCRIPCIÓN

Granates euedrales (anisótropos), de 500 µm a 3 mm, con zonación concéntrica y alteración incipiente preferente de los núcleos a clorita y calcita. Textura de los granates inequigranular, con paragénesis retrogradante en posición intersticial, la cual consiste en calcita y cuarzo (en mosaico), y una asociación de sulfuros y anfíbol. Los cristales de granate incluyen granos de piroxeno subedrales (prismas cortos), generalmente de menos de 100 µm.

Los cristales de anfíbol son euedrales, de hábito prismático-acicular (<1 mm de longitud), y se encuentran principalmente incluidos en los agregados de esfalerita, asociados a calcita y a cuarzo subedral (bipiramidal, rico en inclusiones fluidas).

La wollastonita se encuentra en agregados de cristales fibrosos, de ~1 mm de longitud.

Los sulfuros, principalmente esfalerita, forman agregados irregulares.

La calcopirita se halla tanto formando granos anedrales diseminados (de hasta 100 µm) en los bordes de la esfalerita, como en inclusiones (“*chalcopyrite disease*”).

La pirita forma granos euedrales diseminados, de hasta 500 µm. Como alteración de la pirita hay marcasita.

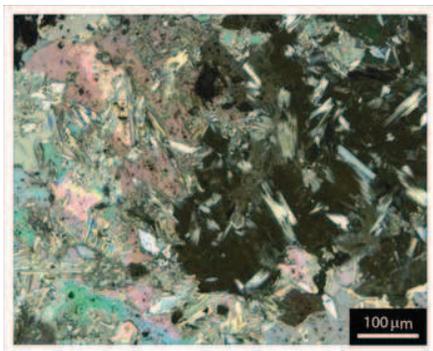


Figura 1. Cristales de wollastonita con calcita y adularia.
Luz transmitida con analizador.

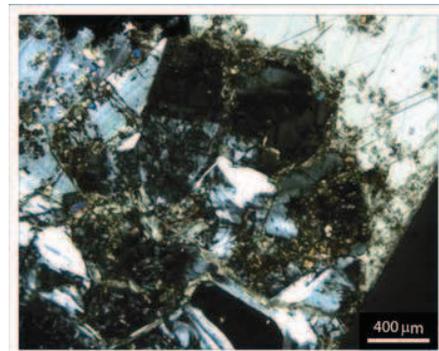


Figura 2. Cristales de granate con inclusiones de piroxeno, englobados por calcita.
Luz transmitida con analizador

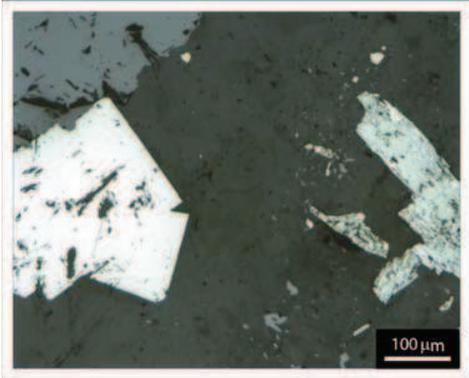


Figura 3. Pirita euedral con marcasita.
Luz reflejada

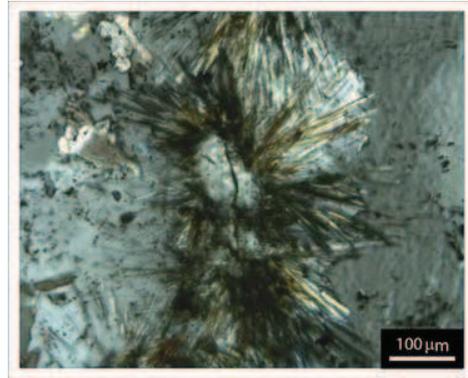


Figura 4. Cristales aciculares de anfíbol.
Luz transmitida con analizador.

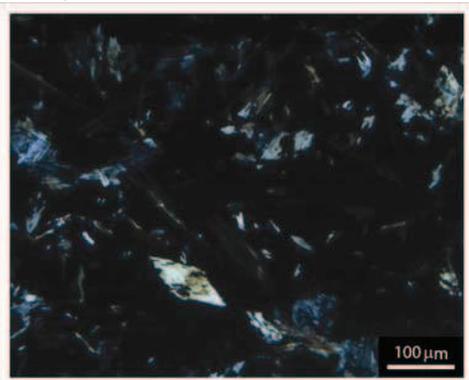


Figura 3. Los cristales de anfíbol incluidos en
esfalerita.
Luz transmitida con analizador

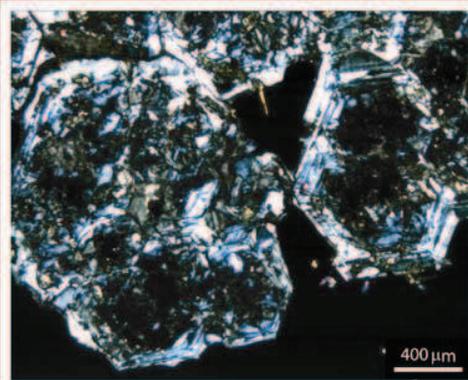


Figura 4. Cristales de granate, con cristales de
piroxeno, incluidos.
Luz transmitida con analizador

V-39-A	Mineralización masiva (Zn-Pb-Cu)	
METÁLICOS	Esfalerita, galena, calcopirita, pirita-marcasita, arsenopirita	
NO METÁLICOS	Cuarzo y calcita	
MODO	Sph 30 %, Gn 30 %, Cpy 15 % Apy 10 %, Py-Mrc 15 %	
TEXTURAS	Bandeado burdo (por granulometría) Sucesión pasiva (sulfuros) Fragmento de encajonante pelítico relictos	

DESCRIPCIÓN

La esfalerita es rica en Fe, e incluye cristales de cuarzo subedrales (bipiramidales; ricos en inclusiones fluidas), de hasta 400 μm de longitud.

La galena, tan abundante como la esfalerita, forma bordes de grano regulares y curvilíneos con ella.

La calcopirita y la marcasita se encuentran generalmente incluidas en la esfalerita, y su tamaño de grano no excede las 100 μm .

La pirita forma cristales euedrales, con marcasita de grano fino (<100 μm) y siderita como alteraciones.

Hay vetillas de calcopirita y marcasita cortando cristales de esfalerita y galena. A veces con arsenopirita. Los cristales de arsenopirita son euedrales y se encuentran preferentemente incluidos en galena, al igual que los cristales de pirrotita. El tamaño de estas inclusiones es de ~150 μm .

La mineralización incluye un fragmento relictos de roca pelítica.

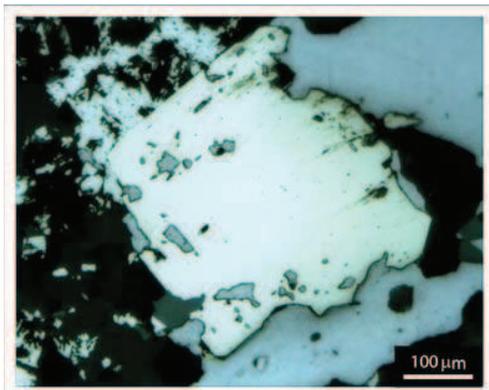


Figura 1. Cristal de pirita con bordes corroídos englobada en galena, con cantidades subordinadas de esfalerita. Luz reflejada.

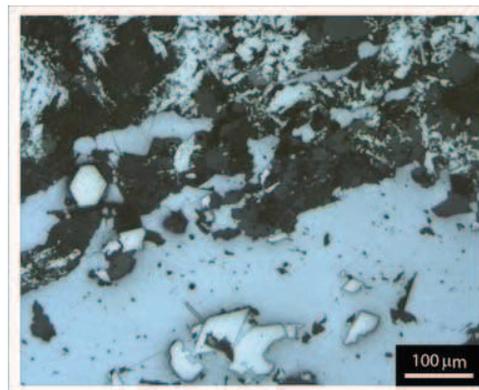


Figura 2. Cristales euedrales de arsenopirita incluidos en galena. Luz reflejada

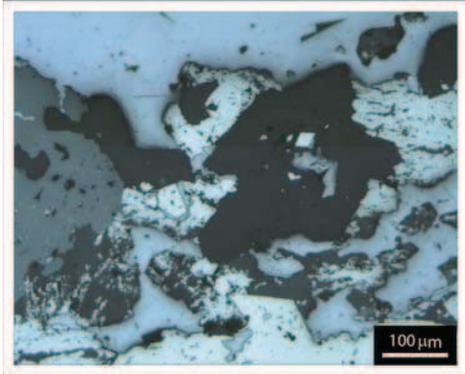


Figura 3. Galena, arsenopirita (incluida en cuarzo), y esfalerita con inclusiones de calcopirita. Luz reflejada

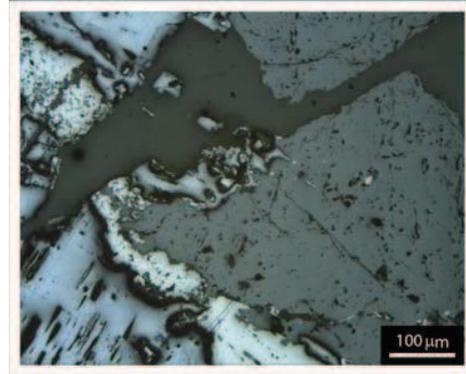


Figura 4. Paragénesis de galena, esfalerita y pirita. Luz reflejada

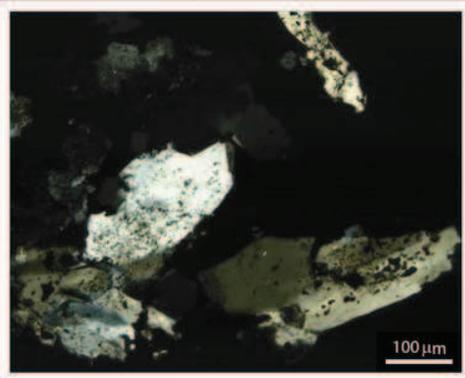
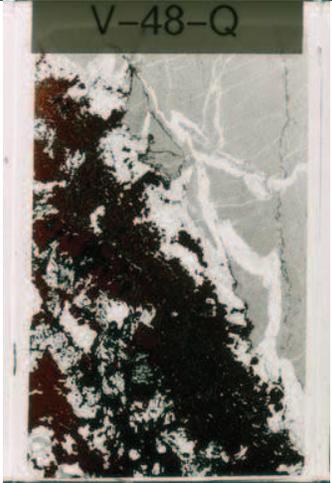


Figura 5. Cristales subedrales (bipiramidales) de cuarzo, en una matriz de esfalerita. Luz transmitida con analizador



Figura 6. Cristales de pirrotita incluidos en galena. Luz reflejada.

V-48-Q	Mineralización masiva (Zn-Pb-Fe) en contacto con calizas	
METÁLICOS	Esfalerita, galena, pirita arsenopirita, calcopirita y pirrotita	
NO METÁLICOS	Calcita	
MODO	-	
TEXTURAS	Recristalización de la caliza (vetillas) Piritización de la caliza Mineralización masiva Contacto abrupto e irregular	

DESCRIPCIÓN

La caliza es de tipo *mudstone*, de grano fino y masiva. Ha sufrido recristalización, por lo que presenta vetillas irregulares de calcita anedral y inequigranular (texturas de mosaico). Además, presenta pirita diseminada (de 50-100 μm).

La mineralización es masiva e irregular, y, asociado a los sulfuros hay calcita anedral de hasta 3 mm, incluida en la mineralización pero sin evidencia de reemplazamiento.

La esfalerita (rica en Fe) es predominante, está asociada a galena (en cantidades subordinadas), y contiene escasas inclusiones de calcopirita. También hay arsenopirita diseminada.

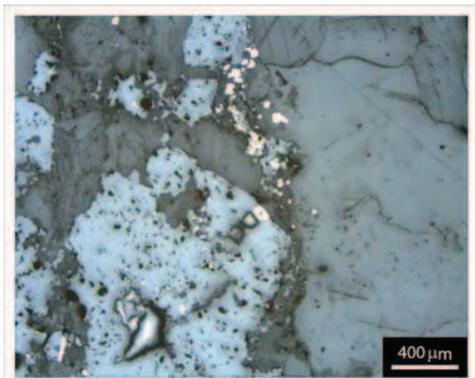


Figura 1. Cristales de pirita y galena diseminados e incluidos en esfalerita. Luz reflejada

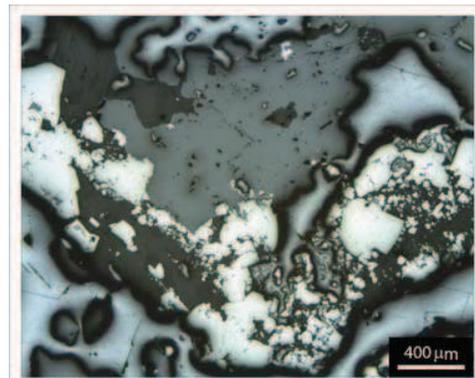


Figura 2. Paragénesis de pirita, galena y esfalerita. Luz reflejada.

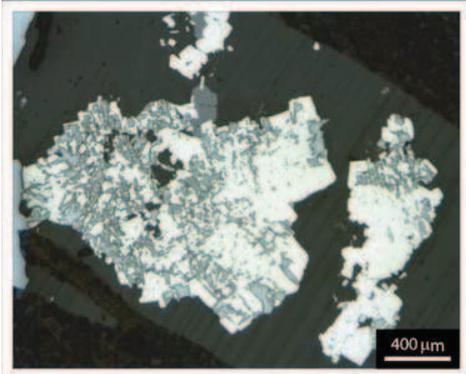


Figura 3. Cristales euedrales de pirita parcialmente reemplazados por galena. Luz reflejada

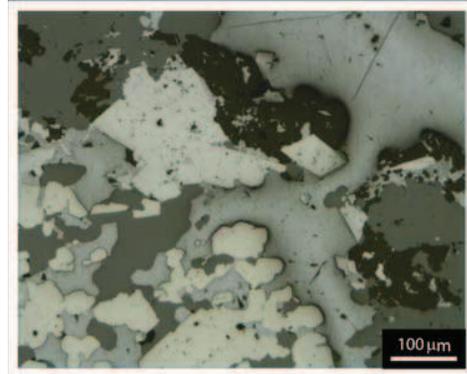
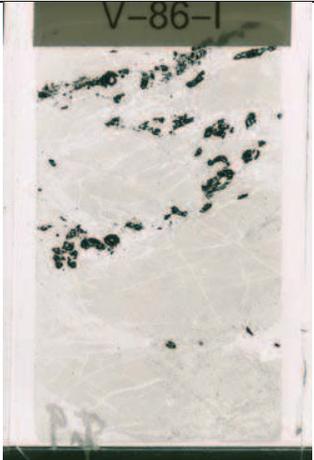


Figura 4. Cristales de arsenopirita, pirita, galena y esfalerita en paragénesis. Luz reflejada



Figura 5. Cristales de pirrotita asociados a galena, calcopirita y esfalerita. Luz reflejada.

V-86-i	Dique silicificado con mineralización (Fe-As) diseminada	
METÁLICOS	Arsenopirita, pirita, esfalerita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> cuarzo, calcita, feldespato-K (adularia) <i>Accesorios:</i> clorita-Mg (clinocloro)	
MODO	-	
TEXTURAS	Alteración Reemplazamiento Vetillas irregulares	

DESCRIPCIÓN

Silicificación casi total de la roca ígnea; consiste en cuarzo subedral micro-cristocristalino, con algunos fenocristales de adularia y calcita.

Hay micro-vetillas de calcita, y agregados diseminados de cristales euedrales (<200 μm) de arsenopirita sobrecrecidos por pirita y con inclusiones de galena.

En cantidades traza, hay granos diseminados de esfalerita con inclusiones de calcopirita.

Asociados a los sulfuros se observan cristales de clorita, en agregados radiales de aproximadamente 200 μm de diámetro.

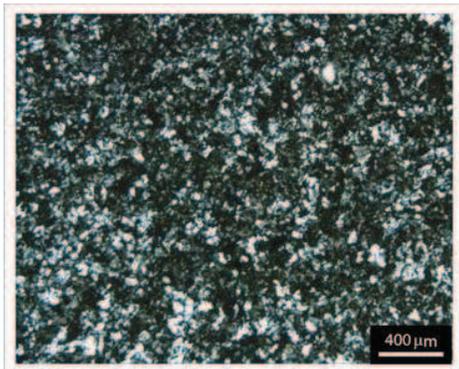


Figura 1. Silicificación.
Luz transmitida con analizador

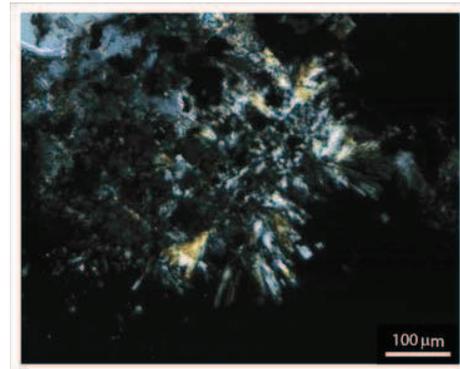


Figura 2. Agregados radiales de clorita magnesiana. Luz transmitida con analizador.

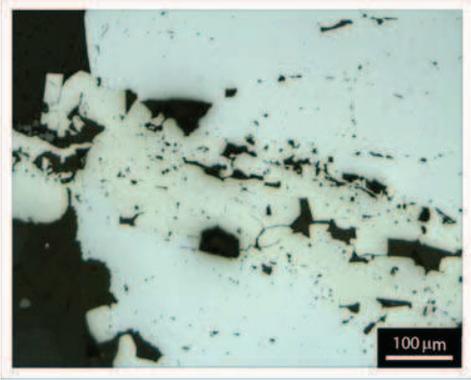


Figura 3. Cristales de pirita en vetilla que corta un agregado de arsenopirita. Luz reflejada.

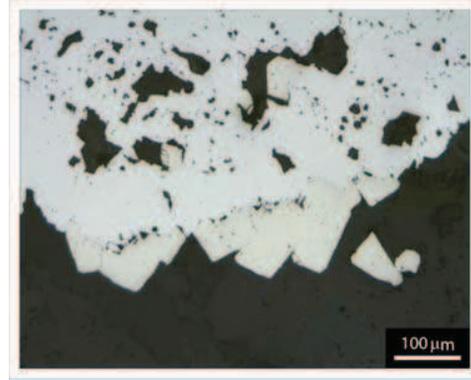


Figura 4. Cristales de arsenopirita sobrecrecidos por cristales euedrales de pirita. Luz reflejada.

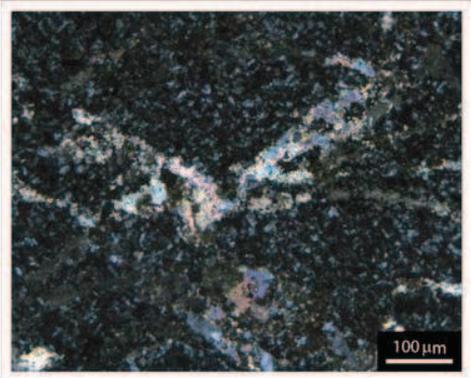


Figura 5. Cristales de calcita relleno de vetillas. Luz transmitida con analizador.

V-88-J	Mineralización masiva (Fe-Zn)	
METÁLICOS	Pirita-marcasita, esfalerita, arsenopirita, pirrotita, galena	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> siderita <i>Accesorios:</i> clorita, cuarzo	
MODO	-	
TEXTURAS	Radial (en "cola de pescado") Alteración supergénica	

DESCRIPCIÓN

Pirita masiva euedral, con marcasita en los bordes, de grano fino (<300 μm).

La esfalerita (rica en Fe) es menos abundante, con bordes redondeados.

La galena se encuentra asociada a cristales de pirita.

La pirrotita se encuentra en escasos cristales muy diseminados incluidos en la esfalerita <50 μm .

Intersticialmente respecto a los sulfuros se aprecian cristales de siderita, probablemente supergénica, e incluidos en ellos (en cantidades subordinadas) clorita y cuarzo anedral que presenta inclusiones probablemente de epidota.

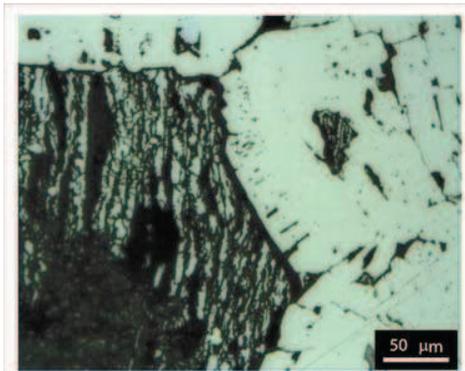


Figura 1. Cristales de pirita bordeados por cristales de marcasita. Luz reflejada.

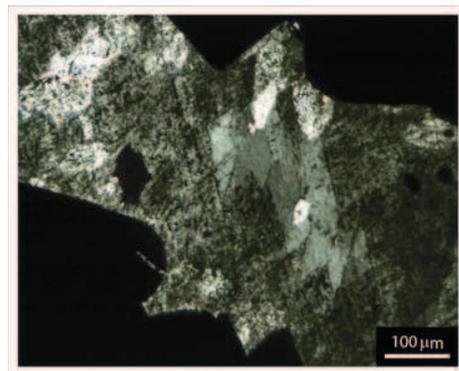


Figura 2. Agregado de siderita encajado en esfalerita. Luz transmitida con analizador.

V-97-L	Dique silicificado	
METÁLICOS	Pirita-marcasita, calcopirita, óxidos (rutilo?)	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> cuarzo	
MODO	Sulfuros ~1 %	
TEXTURAS	Porfídica relictas Reemplazamiento masivo (silicificación)	

DESCRIPCIÓN

Silicificación casi total; consiste en cuarzo anedral micro-criptocristalino.

Los fenocristales originales han sido casi totalmente reemplazados por calcita y probablemente epidota, en agregados de cristales con hábito acicular. Ocasionalmente la epidota también se presenta en fracturas.

Algunos relictos podrían ser pseudomorfos de granate.

La matriz es cuarzo-feldespática y se encuentra propilitizada-sericitizada.

Hay micro-vetillas de calcita, y cristales euedrales y subedrales de pirita (-marcasita) con calcopirita y óxidos diseminados y de grano fino (<200 μm).

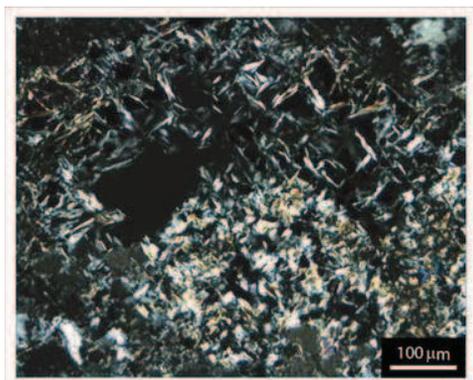


Figura 1. Cristales tabulares de sericita.
Luz transmitida con analizador

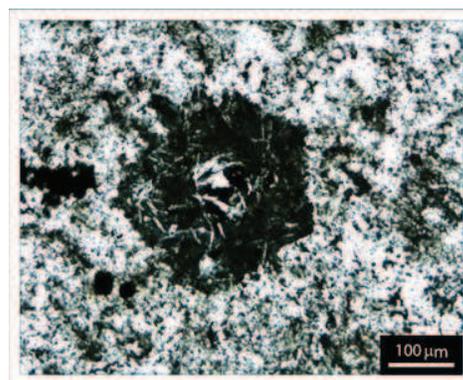


Figura 2. Cristales prismáticos de epidota pseudomorfizando granate.
Luz transmitida con analizador

V-102-N	Pórfido riolítico sericitizado	
METÁLICOS	Pirita, rutilo (diseminados)	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> cuarzo, feldespato-K, plagioclasa <i>Alteraciones:</i> sericita, goethita, clorita	
MODO	Q 50 %, KF 25 %, PI 5 % alteraciones ~20 %	
TEXTURAS	Porfídica-holocristalina Corrosión de los fenocristales de Qz Alteración hidrotermal (sericitización)	

DESCRIPCIÓN

Textura porfídica-holocristalina, consistente en fenocristales de hasta 4 mm de cuarzo y feldespato potásico, en una matriz microcristalina cuarzo-feldespática.

Los fenocristales de feldespato están alterados a sericita, epidota y clorita (clinocloro), principalmente en los núcleos.

El cuarzo se encuentra corroído con morfologías engolfadas, sobrecreciendo algunas veces a cristales alterados de feldespato potásico y plagioclasa.

Los sulfuros (pirita) se hallan diseminados en la matriz y forman granos y agregados de hasta 50 μm .

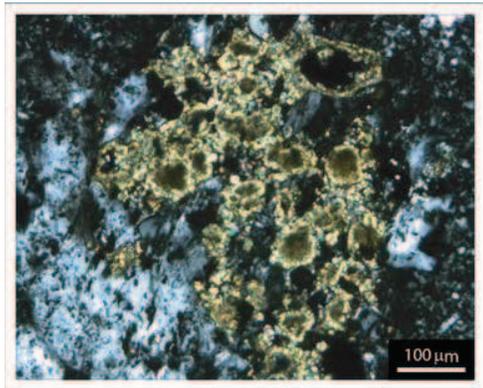


Figura 1. Carbonato probablemente supergénico relleno de oquedades. Luz transmitida con analizador.

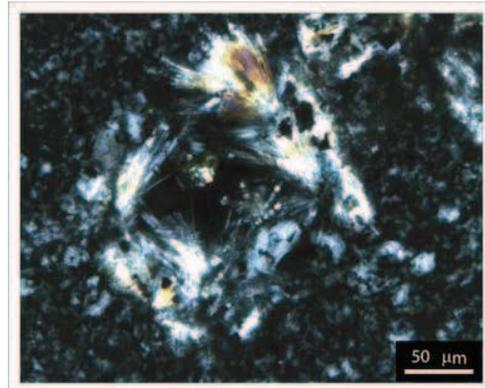


Figura 2. Cristales prismáticos de epidota. Luz transmitida con analizador

V-104-M	Veta-brecha de calcita y cuarzo con mineralización (Fe-As)	
METÁLICOS	Pirita, arsenopirita > esfalerita, galena	
NO METÁLICOS	Calcita, cuarzo y zeolitas (?)	
MODO	~5 % (Apy+Py)	
TEXTURAS	Brechificación y vetilleo	

DESCRIPCIÓN

Clastos de caliza cementados por calcita y cuarzo.

Se distinguen al menos 3 generaciones de vetillas: (a) la primera, predominantemente de calcita, (b) vetillas con mayor abundancia en cuarzo, y (c) la última generación (corta a las dos anteriores), compuesta por cuarzo, calcita y zeolitas.

La mineralización metálica es diseminada y consiste principalmente en cristales euedrales de pirita, de hasta 2 mm, y de arsenopirita, de hasta 500 μm .

La galena se halla asociada a los cristales de pirita, principalmente rellenando oquedades y microfracturas.

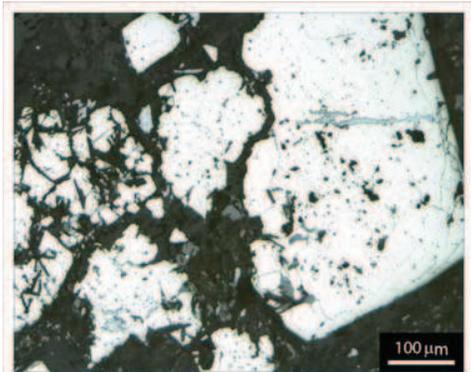


Figura 1. Cristales subedrales de pirita con galena rellenando microfracturas y oquedades. Luz reflejada.

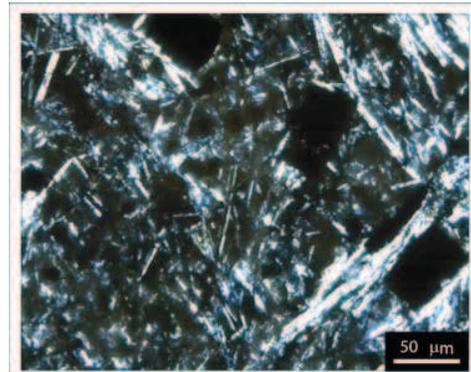


Figura 2. Cristales aciculares de zeolitas. Luz transmitida con analizador.

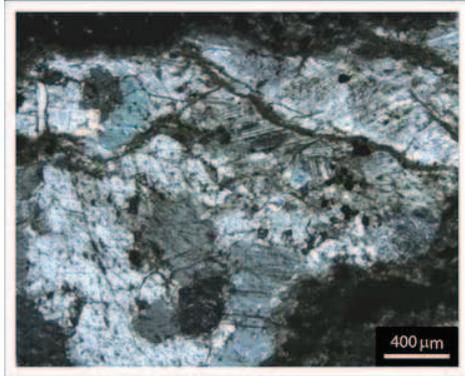


Figura 3. Calcita en mosaico.
Luz transmitida con analizador.

V-122-F	Clastos de skarn de granate (clasto en brecha)	
METÁLICOS	Pirita, calcopirita, esfalerita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> granate-Ca (andradita), calcita, cuarzo	
MODO	Mineralización diseminada (<1 % modal)	
TEXTURAS	Brechificación Vetilleo Reemplazamiento	

DESCRIPCIÓN

Clastos de skarn de granate (andradita) masivos, de tamaño de grano muy variado. Los cristales de granate presentan zonación concéntrica y anisotropía anómala. Están parcialmente reemplazados por una asociación de calcita, cuarzo y sulfuros, que se emplaza intersticialmente respecto a ellos.

La mineralización metálica consiste principalmente en cristales euedrales diseminados de pirita, no mayores a 200 μm , con cantidades subordinadas de calcopirita y esfalerita, también diseminadas, y con un tamaño de grano inferior a 100 μm .

Los clastos de skarn (mineralizados) están cementados por calcita anedral fanerocristalina en una textura de mosaico. No existe mineralización metálica asociada a dicho cementante.

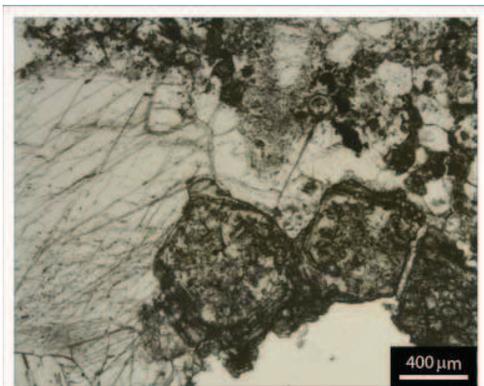


Figura 1. Cristales subedrales de granate reemplazados parcialmente por calcita. Luz transmitida sin analizador.

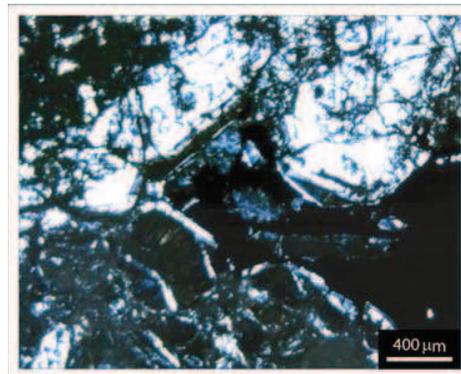
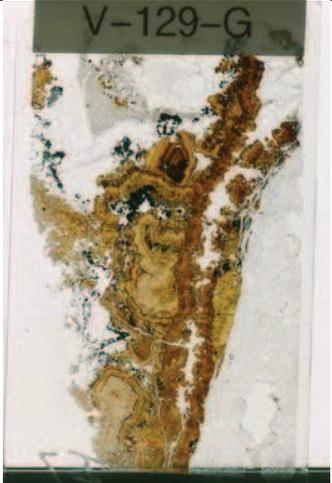


Figura 2. Cristales subedrales de granate reemplazados parcialmente por calcita y cuarzo. Luz transmitida con analizador.

V-129-G	Veta de calcita con mineralización (Zn-Pb)	
METÁLICOS	Esfalerita, galena, calcopirita	
NO METÁLICOS	Calcita, eastonita (?)	
MODO	-	
TEXTURAS	Vetilleo Zonación Calcita en mosaico	

DESCRIPCIÓN

Veta de calcita en mosaico con mineralización metálica al centro de la estructura, principalmente esfalerita de variedad “acaramelada” (pobre en Fe), con zonación concéntrica. La galena está en menor proporción, siendo ligeramente más tardía (ocupa preferentemente fracturas y bordes de grano). Además, hay cristales diseminados de calcopirita, de entre 150 μm a 300 μm , y un filosilicato (\simeq eastonita?) muy tardío, asociado a la calcita.

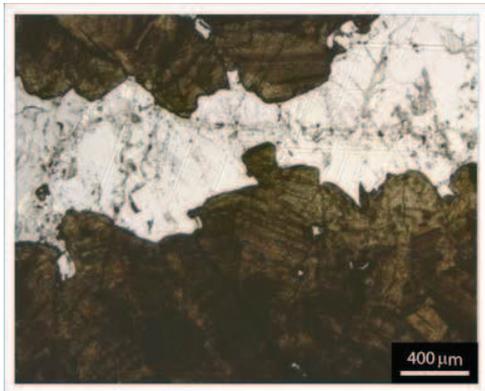


Figura 1. Cristales de esfalerita zonados a calcita. Luz transmitida sin analizador

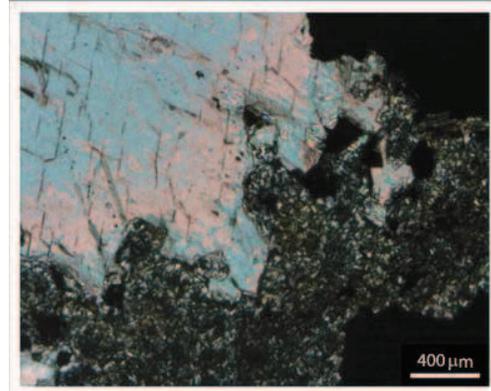


Figura 2. Agregados de eastonita (?) con calcita. Luz transmitida con analizador.

V-178-H	Pórfido alterado (sericitización-carbonitización)	
METÁLICOS	Pirita, calcopirita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> cuarzo <i>Accesorios:</i> biotita <i>De alteración:</i> calcita, clorita, sericita	
MODO	-	
TEXTURAS	Porfídica (relicta) Reemplazamiento	

DESCRIPCIÓN

Alteración casi total; consiste en el reemplazamiento pseudomórfico de los fenocristales por calcita y de la matriz por clorita (?) criptocristalina.

Se preservan algunos fenocristales de biotita muy alterados. También hay fenocristales relictos de cuarzo, corroídos y con morfología redondeada.

Hay micro-vetillas de calcita, y cristales euedrales de pirita y calcopirita (<100 μm) diseminados (<1 % modal), alojados ocasionalmente en planos de exfoliación de las micas.

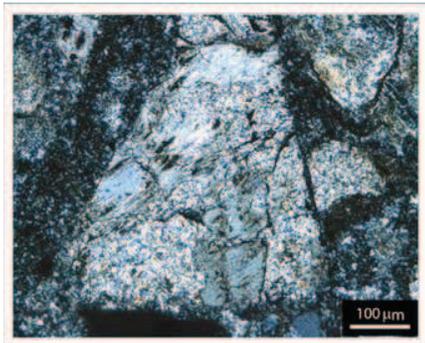


Figura 1. Alteración a clorita-sericita.
Luz transmitida con analizador.

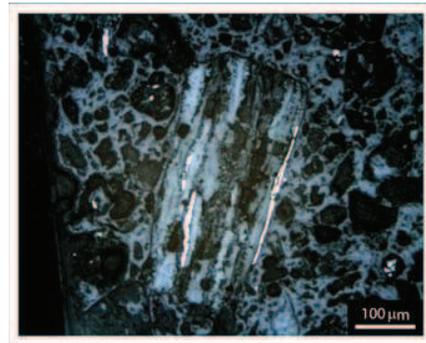


Figura 2. Cristales de pirita alojados en planos de clivaje de un fenocristal de biotita.
Luz reflejada.

VE-02-AD	Mineralización (Fe-Zn-Cu) en vetillas y diseminada en silicificación	
METÁLICOS	Pirrotita, esfalerita, calcopirita, arsenopirita, pirita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> cuarzo, feldespato-K (adularia) <i>Accesorios:</i> anfíbol-Ca (tremolita), clorita, epidota	
MODO	-	
TEXTURAS	Microcristalino decusado Vetas	

DESCRIPCIÓN

La mineralización se aloja en una roca silicificada, con cristales de cuarzo bipiramidales asociados con adularia microcristalina y calcita.

Los anfíboles se encuentran en cristales aislados en agregados incluidos en esfalerita.

La pirrotita y la esfalerita se encuentran intercrecidas, y la esfalerita presenta inclusiones de calcopirita (*“chalcopirite disease”*). La calcopirita también rellena intersticios.

La pirita y arsenopirita se hallan de manera diseminada, en cristales euedrales de ~50 μm .

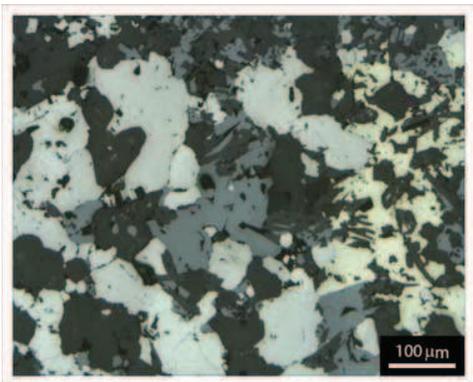


Figura 1. Asociación de pirrotita, esfalerita, calcopirita, pirita y arsenopirita. Luz reflejada.

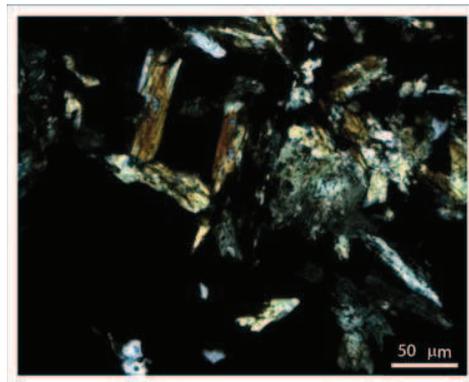


Figura 2. Cristales prismáticos de anfíbol incluidos en esfalerita. Luz transmitida con analizador.

VE-60-V	Veta de calcita con mineralización (Zn-Pb)	
METÁLICOS	Esfalerita, galena, pirita, calcopirita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales: calcita, cuarzo</i>	
MODO	-	
TEXTURAS	Vetilleo-brechificación Zonación Calcita en mosaico	

DESCRIPCIÓN

Veta de calcita en mosaico, encajonada en mármol, con mineralización metálica, principalmente esfalerita de variedad “acaramelada” (pobre en Fe), con zonación concéntrica. Los cristales aislados de esfalerita (subedrales) miden hasta 0.5 mm, con galena en menor proporción, ligeramente más tardía (ocupa preferentemente fracturas y bordes de grano).

Además, hay cristales de pirita y calcopirita, de 150 a 300 μm , diseminados en el mármol, principalmente.

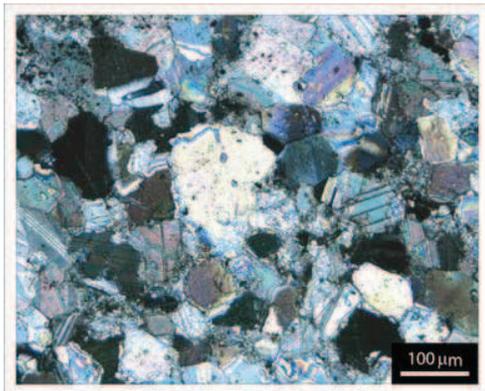


Figura 1. Mármol.
Luz transmitida con analizador.

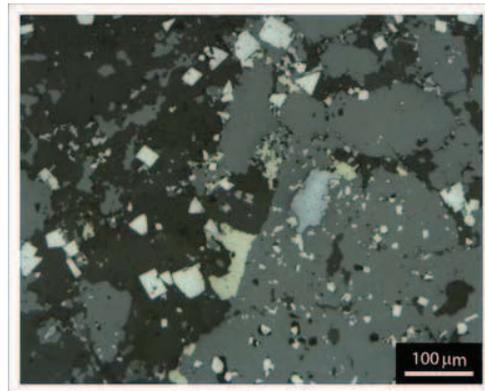


Figura 2. Esfalerita con galena en fracturas y bordes de grano, y cristales diseminados de pirita. Luz reflejada.

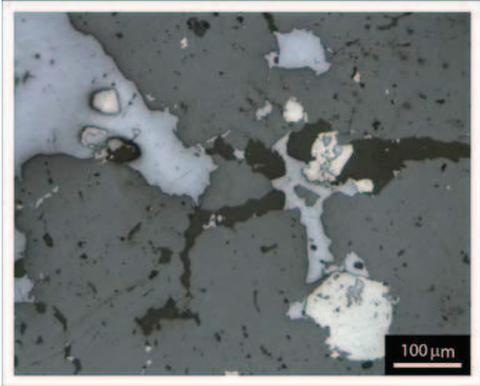


Figura 3. Cristales de esfalerita asociado con galena rellenando fracturas y cristales de pirita y calcopirita rellenando oquedades.
Luz reflejada.

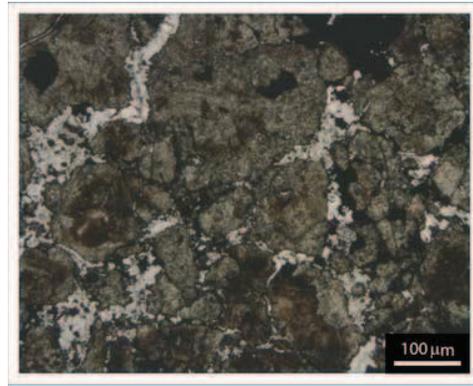


Figura 4. Cristales de esfalerita (variedad "acaramelada"), con zonación y un relleno tardío de calcita.
Luz transmitida sin analizador.

VE-60-Y	Veta de calcita con mineralización (Fe-Zn-Pb)	
METÁLICOS	Pirita, esfalerita, pirrotita, calcopirita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> Calcita, cuarzo <i>Accesorios:</i> anfíboles, clorita-Fe, siderita	
MODO	-	
TEXTURAS	Vetilleo Zonación Calcita en mosaico	

DESCRIPCIÓN

Veta de calcita en mosaico, encajonada en mármol, con mineralización metálica, principalmente pirita (250 μm) y esfalerita rica en Fe asociada a pirrotita con cristales que miden $\sim 50 \mu\text{m}$; la esfalerita presenta "*chalcopyrite disease*". La calcopirita también rellena intersticios. La esfalerita, la pirita y la pirrotita exhiben bordes de equilibrio petrológico.

Se encuentran dispuestas generaciones de vetillas posteriores que cortan la mineralización rellenas de clorita y calcita con anfíboles en cristales aislados o en agregados, principalmente incluidos en esfalerita.

Hay siderita relleno de oquedades e intersticios (supergénica).

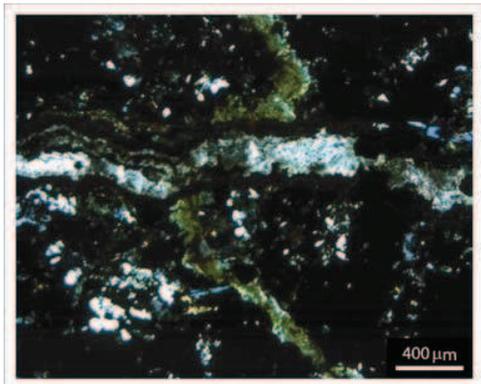


Figura 1. Veta de clorita que a su vez es cortada por una vetilla de calcita. Luz transmitida con analizador.

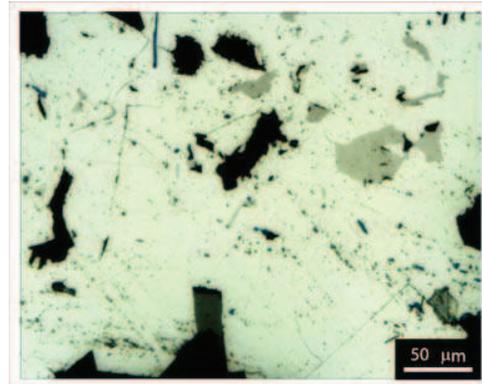


Figura 2. Cristales de pirita y pirrotita en paragénesis. Luz reflejada.

VE-122-AA	Dique silicificado con mineralización (Fe)	
METÁLICOS	Pirita-marcasita, pirrotita, calcopirita, arsenopirita, óxidos (¿rutilo?)	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> cuarzo y feldespatos <i>Accesorios:</i> calcita, siderita, anfíbol-Ca	
MODO	Sulfuros ~10 %	
TEXTURAS	Porfídica relictas Reemplazamiento masivo (silicificación)	

DESCRIPCIÓN

Silicificación casi total; consiste en cuarzo anedral micro-criptocristalino.

Los fenocristales son de cuarzo y feldespatos sericitizados, relictos, de hasta 0.5 mm.

Hay anfíbol en agregados radiales de cristales aciculares de hasta 1.5 mm de longitud, en una matriz cuarzo-feldespática propilitizada-sericitizada.

La mineralización metálica de pirita-marcasita, pirrotita y calcopirita, en estabilidad petrográfica, es diseminada (tamaño de grano ~100 µm). En ocasiones pseudomorfoza fenocristales pero también aparece como una diseminación fina (<25 µm) en la matriz y en vetillas.

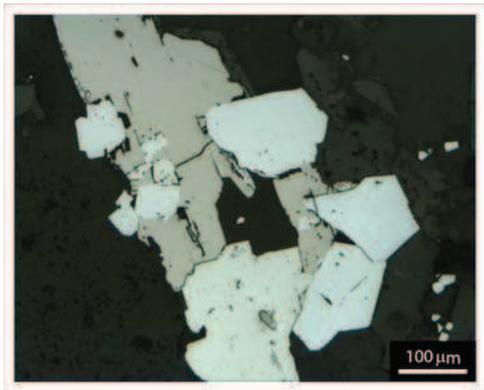


Figura 1. Cristales de pirrotita, pirita y arsenopirita en paragénesis. Luz reflejada.

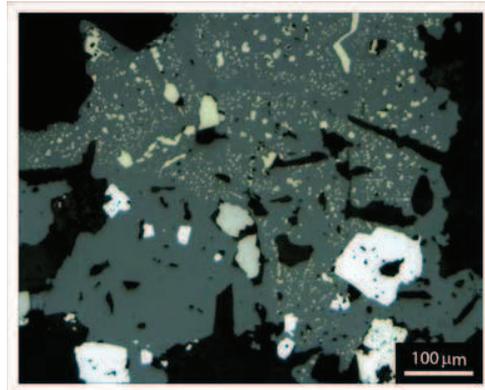


Figura 2. Cristales subedrales de pirrotita, arsenopirita y calcopirita incluidos en esfalerita. Luz reflejada.

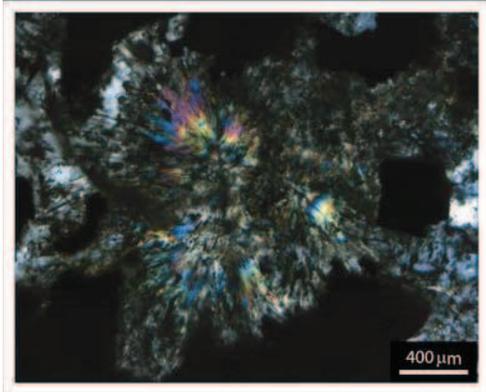


Figura 3. Anfíbol en agregados radiales.
Luz transmitida con analizador.

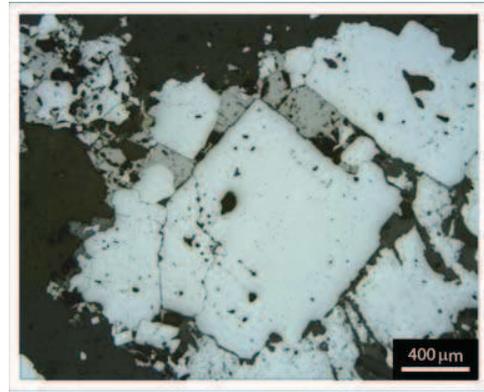
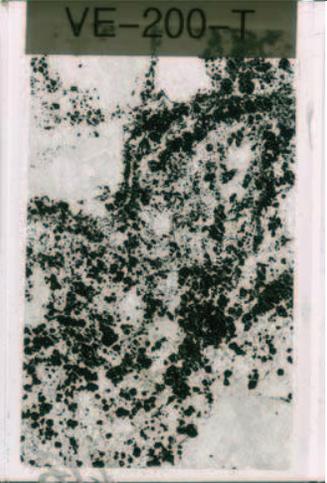


Figura 4. Cristales euedrales de pirita con
pirrotita. Luz reflejada.

VE-200-T	Veta de calcita con mineralización (Fe-Zn-Pb)	
METÁLICOS	Pirita, esfalerita, galena, calcopirita	
NO METÁLICOS	Calcita, siderita	
MODO	Sulfuros ~40 %	
TEXTURAS	Vetilleo Calcita en mosaico	

DESCRIPCIÓN

Mineralización metálica *semi-masiva* (~40 % modal) asociada a calcita anedral de grano gruesa (de <2 mm), con una textura en mosaico.

La pirita es euedral a subedral, y es poiquilítica (con inclusiones de esfalerita y galena, principalmente).

Le sigue en abundancia la esfalerita (de la variedad "acaramelada", muy pobre en Fe), la cual es anedral (de 20 μm hasta 2 mm) y contiene inclusiones de calcopirita y galena.

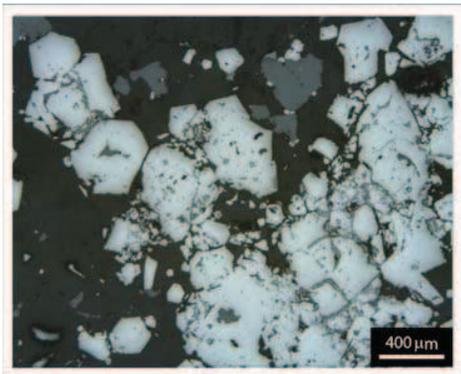


Figura 1. Cristales euedrales y subedrales de pirita, esfalerita y galena en calcita. Luz reflejada.

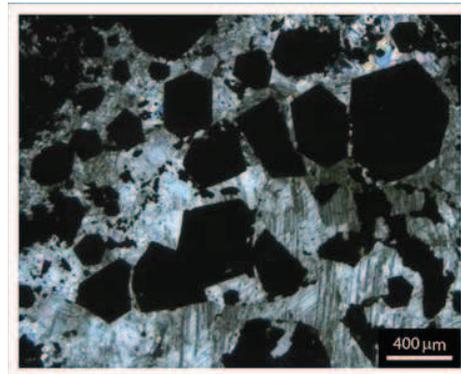


Figura 2. Cristales de pirita diseminada (opacos) en calcita. Luz transmitida con analizador.

VE-200-W	Mineralización masiva (Fe-Zn-Pb)	
METÁLICOS	Pirrotita, esfalerita, pirita-marcasita, calcopirita	
NO METÁLICOS	<i>Esenciales:</i> cuarzo, calcita	
MODO	Mineralización masiva (> 90 %)	
TEXTURAS	Bandeado burdo por granulometría y mineralogía de las menas	

DESCRIPCIÓN

Mineralización metálica masiva asociada a cuarzo subedral (cristales bipiramidales). Está constituida mayoritariamente por cristales de pirrotita y esfalerita, que se encuentran en paragénesis, con bordes de grano regulares y curvilíneos.

La calcopirita se encuentra generalmente como inclusiones en la esfalerita.

Los cristales de pirita euedral (~1 mm) se encuentran parcialmente corroídos, con esfalerita y pirrotita dispuestas sobre sus caras cristalinas e intersticialmente.

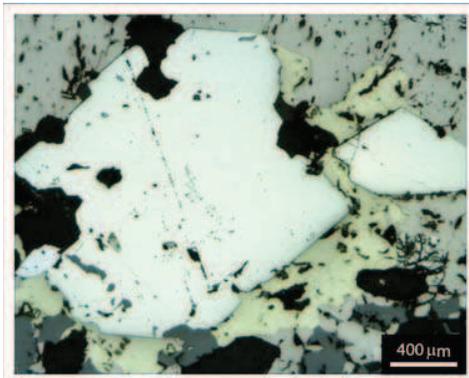
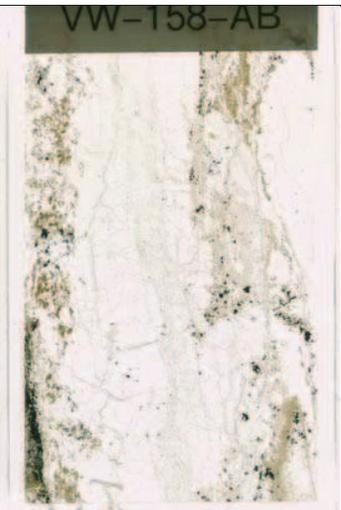


Figura 1. Cristal euedral corroído rodeado por calcopirita y pirrotita.
Luz reflejada.

VW-158-AB	Veta de calcita y fluorita con mineralización (As-Fe-Zn)	
METÁLICOS	Arsenopirita, pirita, calcopirita esfalerita, pirrotita	
NO METÁLICOS	Fluorita, calcita, cuarzo, feldespato-K (adularia), piroxeno-Ca (diópsido)	
MODO	-	
TEXTURAS	Vetilleo Calcita en mosaico	

DESCRIPCIÓN

Veta bandeada de fluorita y calcita, con clastos de caliza incluidos y cementados por calcita en mosaico y cuarzo (microcristalino y calcedonia), cortada a su vez por vetillas de cuarzo ricas en adularia, calcita y piroxeno. El piroxeno forma cristales prismáticos.

La arsenopirita se encuentra diseminada, y forma cristales euedrales (de ~600 μm).

Los cristales de pirita y calcopirita son menos abundantes miden ~400 μm .



Figura 1. Cristales euedrales de adularia asociada a calcita.
Luz transmitida con analizador.

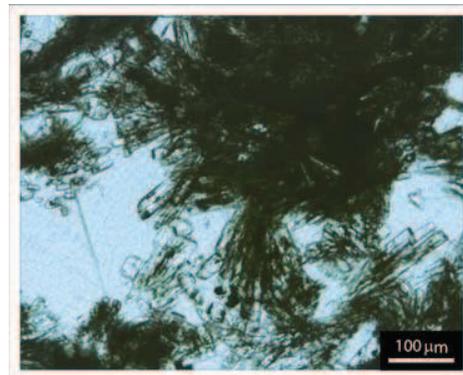


Figura 2. Cristales prismáticos de clinopiroxeno.
Luz transmitida sin analizador.



Figura 3. Cristales de arsenopirita y calcopirita euedral diseminada en fluorita.
Luz reflejada.

Anexo 3

Química mineral

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del
Skarn de Velardeña, Durango

Tabla 1. Resultados de análisis por microsonda electrónica (en % en peso) de cristales de anfíbol cálcico del Yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	Punto	Paragénesis	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	FeO	MgO	NiO	Cr ₂ O ₃	H ₂ O	Total
4	V-26-B	1-Anf-1	<i>Skarn de Grrt con Sph >Py-Cpy</i>	57.48	0.71	0.03	13.90	0.15	0.14	0.47	6.81	19.70	0.00	0.00	2.17	101.54
5	V-26-B	1-Anf-2		58.72	0.80	0.02	13.02	0.17	0.12	0.45	6.54	20.05	0.00	0.00	2.20	102.08
6	V-26-B	1-Anf-3		57.96	0.95	0.00	13.03	0.17	0.17	0.38	7.37	19.82	0.01	0.00	2.19	102.04

Tabla 2. Resultados de análisis por microsonda electrónica (en % en peso) de cristales de clinopiroxeno cálcico del Yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	Punto	Paragénesis	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	FeO	MgO	Cr ₂ O ₃	NiO	Total
10	VW-158-AB	Cpx-1		53.16	0.85	0.01	24.56	0.22	0.00	0.52	9.54	12.06	0.00	0.00	100.92
11	VW-158-AB	Cpx-2		52.20	0.03	0.00	24.68	0.03	0.01	1.38	13.53	9.58	0.00	0.00	101.44
12	VW-158-AB	Cpx-3	<i>Veta de calcita y fluorita con Apy > Py-Cpy</i>	53.14	0.15	0.00	24.83	0.09	0.00	0.76	10.81	11.39	0.01	0.01	101.20
15	VW-158-AB	2-Cpx-1		53.70	1.09	0.04	24.77	0.31	0.00	0.46	8.39	12.84	0.00	0.02	101.63
16	VW-158-AB	2-Cpx-2		53.12	0.14	0.00	25.02	0.05	0.00	0.44	10.16	12.62	0.00	0.02	101.56
17	VW-158-AB	2-Cpx-3		52.69	0.27	0.00	24.87	0.09	0.00	0.59	11.50	11.53	0.00	0.00	101.54
29	C-23-N	1-SiCaMg-1		54.97	0.31	0.00	25.97	0.00	0.00	0.20	1.62	17.54	0.00	0.00	100.61
30	C-23-N	1-SiCaMg-2		54.92	0.41	0.00	26.06	0.00	0.00	0.30	0.82	17.99	0.00	0.02	100.51
31	C-23-N	1-SiCaMg-3	<i>Skarn de Grt (esteril)</i>	54.83	0.26	0.01	25.89	0.00	0.00	0.31	0.85	18.14	0.01	0.03	100.32
32	C-23-N	1-SiCaMg-4		55.28	0.29	0.00	26.08	0.00	0.00	0.39	0.63	18.03	0.00	0.01	100.71

Tabla 3. Resultados de análisis por microsonda electrónica (en % en peso) de cristales de granate cálcico del Yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	Punto	Paragénesis	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MnO	FeO _{total}	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	Cr ₂ O ₃	NiO	Total
4	C-02-E	1-Gm-1	Skarn de Grt con Sph-	34.35	8.69	1.58	34.37	0.43	16.12	17.91	0.00	0.33	0.14	0.16	97.96
5	C-02-E	1-Gm-2	Cpy > Gn-Py-Apy	34.08	7.83	0.30	33.93	0.78	18.47	20.52	0.00	0.08	0.13	0.15	97.80
6	C-10-I	1-Gm-1		33.44	7.24	0.78	34.71	0.09	18.03	20.04	0.00	0.29	0.08	0.06	96.73
7	C-10-I	1-Gm-2	Skarn de Grt (estéril)	33.55	7.71	0.26	34.78	0.10	17.61	19.57	0.00	0.15	0.05	0.05	96.23
8	C-23-N	1-Gm-1		32.43	0.40	0.01	33.38	0.18	28.18	31.32	0.00	0.16	0.00	0.00	97.87
9	C-23-N	1-Gm-2		32.52	0.25	0.00	33.23	0.17	28.58	31.77	0.00	0.16	0.00	0.01	98.10
10	V-26-B	2-Gm-1		35.31	0.05	0.01	32.96	0.13	29.11	32.35	0.00	0.00	0.00	0.00	100.82
11	V-26-B	2-Gm-2	Skarn de Grt con Sph	34.97	0.00	0.00	33.07	0.14	29.12	32.36	0.00	0.00	0.00	0.00	100.54
12	V-26-B	2-Gm-3	>Py-Cpy	34.78	0.41	0.05	33.05	0.14	28.35	31.51	0.00	0.03	0.00	0.01	99.98
13	V-26-B	2-Gm-4		34.95	7.71	0.40	34.23	0.32	18.06	20.07	0.00	0.05	0.03	0.00	97.75

Tabla 4. Resultados de análisis por microsonda electrónica (en % en peso) de cristales de feldespato potásico (adularia-hialofana) del Yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	Punto	Paragenesis	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	BaO	MnO	FeO	MgO	Total
13	1W-158-AB	FeIK-4		65.78	17.96	0.00	0.04	0.91	15.68	0.53	0.02	0.02	0.00	100.93
14	1W-158-AB	FeIK-5		65.72	17.85	0.02	0.06	0.79	15.62	0.36	0.00	0.02	0.00	100.43
18	1W-158-AB	2-FeIK-4	<i>Veta de calcita y fluorita con Apy</i>	65.99	17.55	0.00	0.00	0.78	15.61	0.46	0.00	0.01	0.00	100.40
19	1W-158-AB	2-FeIK-5	<i>>Py-Cpy</i>	66.33	17.53	0.00	0.00	0.71	15.91	0.34	0.01	0.00	0.00	100.84
20	1W-158-AB	2-FeIK-6		66.28	17.47	0.00	0.00	0.66	15.82	0.23	0.00	0.00	0.00	100.47
23	C-04-F	1-SiKAl-1	<i>Skarn de Grt con Sph-Cpy</i>	65.24	17.03	0.00	0.00	0.51	16.17	0.24	0.04	0.57	0.00	99.80
24	C-04-F	1-SiKAl-2	<i>>Gn-Py-Apy</i>	64.58	17.03	0.00	0.00	0.48	16.12	0.45	0.05	0.58	0.00	99.28

Tabla 5. Resultados de análisis por microsonda electrónica (en % en peso) de cristales de calcita del Yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	Punto	Paragénesis	Na ₂ O	MnO	SrO	CaO	MgO	FeO	CO ₂	Total
3	V-129-G	2-Ca-1		0.01	0.10	0.01	55.31	0.03	0.01	43.52	99.00
4	V-129-G	2-Ca-2	Veta de Cc con Sph > Gn > Cpy	0.06	0.08	0.00	54.51	0.04	0.00	42.91	97.59
5	V-129-G	2-Ca-3		0.01	0.10	0.05	55.88	0.04	0.01	43.98	100.06
17	C-10-I	1-caliza-1		0.15	0.28	0.03	53.14	0.31	1.34	42.92	98.16
18	C-10-I	1-caliza-2	Skarn de Grt (esteril)	0.02	0.08	0.03	54.94	0.02	0.55	43.45	99.08
19	C-10-I	1-caliza-3		0.06	0.29	0.04	53.16	0.34	1.47	42.97	98.31
21	C-04-F	1-caliza-2	Skarn de Grt con Sph-Cpy > Gn-Py-Apy	0.06	1.67	0.04	52.87	0.08	0.92	43.07	98.71
22	C-04-F	1-caliza-3		0.00	2.29	0.04	52.75	0.02	0.74	43.18	99.03

Tabla 6. Resultados de análisis por microsonda electrónica (en % en peso) de cristales de arsenopirita del Yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	Paragenesis	S	Mn	Cu	As	Bi	Fe	Cd	Zn	Sn	Ag	Sb	Pb	Total
50	VE-02-AD-1	Silificación con Po-Sph >Cpy-Apy-Py	20.64	0.03	0.01	46.51	0.00	35.60	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	102.79
59	VE-158-AB-1-1		20.38	0.00	0.00	46.12	0.00	34.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	101.63
60	VE-158-AB-1-2	Veta de calcita y fluorita	20.34	0.02	0.00	46.40	0.00	34.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	101.66
61	VE-158-AB-2-1	con Apy >Py-Cpy	19.62	0.00	0.01	46.44	0.00	34.69	0.00	0.01	0.00	0.02	0.28	0.14	101.21
62	VE-158-AB-2-2		19.99	0.01	0.00	46.05	0.00	34.79	0.00	0.02	0.00	0.06	0.55	0.05	101.52

Tabla 7. Resultados de análisis por microsonda electrónica (en % en peso) de cristales de galena del Yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	Paragénesis	S	Mn	Cu	As	Bi	Fe	Cd	Zn	Sn	Ag	Sb	Pb	Total
10	C-04-F-1-4	Skarn de Grt con Sph- Cpy > Gn-Py-Apy	13.26	0.03	0.01	0.00	0.00	0.48	0.00	0.07	0.00	0.21	0.09	84.70	98.84
33	V-18-E-2-5	Mineralización masiva	12.91	0.03	0.01	0.00	0.00	0.69	0.00	0.14	0.00	0.04	0.12	84.62	98.55
34	V-18-E-2-6	Sph > Gn-Cpy-P0	12.84	0.06	0.00	0.00	0.00	0.74	0.00	0.02	0.00	0.17	0.19	84.32	98.34
40	V-129-G-1-1		13.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.15	0.29	85.83	99.89
41	V-129-G-1-2	Veta de Cc con Sph	13.50	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.04	0.00	0.10	0.21	85.83	99.73
48	V-129-G-2-3	>Gn > Cpy	13.57	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.09	0.00	0.19	0.22	86.15	100.26
49	V-129-G-2-4		13.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.22	85.22	99.06

Tabla 8. Resultados de análisis por microsonda electrónica (en % en peso) de cristales de esfalerita del Yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	Paragénesis	S	Mn	Cu	As	Bi	Fe	Cd	Zn	Sn	Ag	Sb	Pb	Total
5	C-02-E-1-1		32.90	0.34	0.00	0.00	0.00	5.01	0.00	60.42	0.01	0.00	0.01	0.00	98.68
6	C-02-E-1-2	Skarn de Grt con Sph-	33.17	0.32	0.00	0.00	0.03	5.09	0.02	60.45	0.01	0.00	0.00	0.00	99.08
7	C-04-F-1-1	Cpy > Gn-Py-Apy	33.09	0.52	0.00	0.03	0.05	4.33	0.12	61.08	0.03	0.00	0.00	0.00	99.24
8	C-04-F-1-2		33.13	0.40	0.00	0.03	0.00	4.18	0.06	61.38	0.00	0.00	0.02	0.00	99.20
16	V-39-A-1-1		33.89	0.75	0.00	0.02	0.02	12.08	0.08	53.08	0.00	0.00	0.01	0.00	99.93
17	V-39-A-1-2	Mineralización masiva	33.58	0.72	0.02	0.00	0.00	12.06	0.04	53.24	0.00	0.00	0.00	0.00	99.66
18	V-39-A-1-3	Sph-Gn > Cpy-Apy	33.72	0.64	0.00	0.00	0.01	11.96	0.05	53.09	0.01	0.00	0.00	0.01	99.48
19	V-26-B-1-1		33.72	0.21	0.01	0.03	0.00	9.93	0.00	55.03	0.00	0.00	0.00	0.01	98.93
20	V-26-B-1-2	Skarn de Grt con Sph	33.96	0.22	0.00	0.02	0.00	10.07	0.05	54.79	0.01	0.00	0.00	0.02	99.14
21	V-26-B-1-3	>Cpy-Gn	33.83	0.16	0.01	0.03	0.00	9.44	0.00	55.47	0.00	0.00	0.01	0.00	98.93
22	V-18-E-1-1		33.79	0.24	0.02	0.05	0.00	11.43	0.06	54.22	0.00	0.00	0.00	0.00	99.81
23	V-18-E-1-2		33.78	0.21	0.07	0.00	0.00	11.65	0.09	53.90	0.00	0.00	0.00	0.05	99.75
24	V-18-E-1-3		33.62	0.21	0.07	0.03	0.02	11.68	0.03	53.91	0.00	0.00	0.00	0.09	99.65
25	V-18-E-1-4	Mineralización masiva	33.30	0.21	0.00	0.00	0.00	11.79	0.06	53.94	0.00	0.00	0.01	0.00	99.30
29	V-18-E-2-1	Sph > Gn-Cpy-Po	33.38	0.21	0.00	0.04	0.00	11.55	0.01	54.18	0.00	0.00	0.00	0.00	99.37
30	V-18-E-2-2		33.50	0.19	1.34	0.02	0.00	12.61	0.07	51.43	0.01	0.00	0.01	0.00	99.17
31	V-18-E-2-3		33.40	0.24	0.03	0.00	0.05	11.81	0.12	53.81	0.03	0.00	0.00	0.05	99.52
32	V-18-E-2-4		33.61	0.18	0.02	0.02	0.03	11.59	0.00	54.39	0.02	0.00	0.00	0.06	99.92
42	V-129-G-1-3		33.05	2.46	0.00	0.00	0.00	2.77	0.52	61.16	0.06	0.00	0.00	0.02	100.03
43	V-129-G-1-4	Veta de Cc con Sph	33.07	2.50	0.00	0.00	0.00	2.69	0.48	60.50	0.01	0.01	0.00	0.00	99.26
46	V-129-G-2-1	>Gn >Cpy	33.60	0.49	0.06	0.00	0.00	3.16	0.23	62.60	0.04	0.00	0.00	0.00	100.16
47	V-129-G-2-2		33.62	0.56	0.05	0.00	0.07	3.08	0.33	62.47	0.09	0.00	0.00	0.00	100.26
54	VE-02-AD-5		33.92	0.44	0.01	0.00	0.00	11.40	0.14	54.24	0.00	0.00	0.02	0.00	100.17
55	VE-02-AD-6	Silicificación con Po-	33.47	0.39	0.00	0.00	0.14	11.30	0.06	54.31	0.00	0.00	0.03	0.00	99.69
57	VE-02-AD-2-2	Sph > Cpy-Apy-Py	33.78	0.38	0.02	0.01	0.00	11.41	0.01	54.20	0.00	0.00	0.01	0.00	99.82
63	VE-60-Y-1	Skarn de Cc-anfibol con Py-Sph-Gn	33.26	0.63	0.00	0.00	0.00	11.46	0.00	53.25	0.02	0.00	0.00	0.08	98.70

Tabla 9. Resultados de análisis por microsonda electrónica (en % en peso) de cristales de pirita y pirrotita del Yacimiento de Velardeña.

#	Muestra	S	Mn	Cu	As	Bi	Fe	Cd	Zn	Sn	Ag	Sb	Pb	Total
35	V-18-E-2-7	52.25	0.00	0.02	0.04	0.12	47.18	0.00	0.09	0.00	0.00	0.02	0.00	99.72
36	V-18-E-2-8	52.10	0.02	0.04	0.00	0.00	46.97	0.00	0.08	0.02	0.07	0.02	0.03	99.34
37	V-122-F-1	52.59	0.00	0.00	0.06	0.00	47.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.10	100.45
38	V-122-F-2	50.90	0.00	0.00	4.53	0.03	45.84	0.00	0.01	0.00	0.02	0.08	0.00	101.42
39	V-122-F-3	51.80	0.01	0.00	0.12	0.00	46.58	0.00	0.00	0.00	0.01	0.13	0.03	98.67
44	V-129-G-1-5	53.33	0.00	0.00	0.00	0.00	46.88	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	0.07	100.37
45	V-129-G-1-6	53.55	0.00	0.00	0.05	0.00	47.12	0.00	0.05	0.00	0.04	0.00	0.00	100.80
52	VE-02-AD-3	39.72	0.00	0.00	0.00	0.04	60.31	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	100.11
53	VE-02-AD-4	39.86	0.00	0.00	0.00	0.00	60.31	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	100.23
64	VE-60-Y-2	53.16	0.03	0.01	0.03	0.02	47.50	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	100.81
65	VE-60-Y-3	52.79	0.04	0.01	0.02	0.00	47.53	0.00	0.10	0.01	0.05	0.00	0.00	100.54

Anexo 4

Inclusiones fluidas

Estudio de la paragénesis , inclusiones fluidas e isotopía del Azufre del
Skarn de Velardeña, Durango

MUESTRA	RC-N9#5		RC-N9#5		RC-N9#5	RC-N8#6		RC BNO 778	RC BNO 778
MINERAL	CUARZO		CALCITA		ESFALERITA	SECUNDARIAS CALCITA		EPIDOTA	GRANATE
	Tf	Th	Tf	Th	Th	Tf	Th	Th	Th
	-14.5	395	350	342	408	-12	260	381	413
	-14.5	395	350	355	403	-12	260	380	430
	-14.5	395	220	280	403	-12	260		
	-14.5	395	250	245	403	-12	260		
	-14.5	395	330	260	390	-12	264		
	-14.5	395	255	270	400	-12	265		
	-14.5	395	310	321	390	-12	283		
	-14.5	395	235	320	418	-12	282		
	-14.5	395	241	370	395	-12	260		
	-14.5	395	236	365	390	-12	259		
	-14.5	395	271	310	399	-12	265		
	-14.5	395	271	385		-12	283		
	-14.5	395	271	468		-12	293		
	-14.5	395	270	380					
	-14.5	395	270	480					
	-14.5	395	270	320					
	-14.5	395	270	388					
	-14.5	395							
	-14.5	395							
	-14.5	395							
	-14.5	395							
	-14.5	400							
	-14.5	400							
	-14.5	400							
	-14.5	400							
	-14.5	408							
	-14.5	400							
MINIMO	-14.5	395	220	245	390	-12	259	380	413
MAXIMO	-14.5	400	350	480	418	-12	293	381	430
PROMEDIO	-14.5	396	275	345	400	-12	269	381	422
DESV. EST.	0	2	39	66	9	0	12	1	12

Muestra	VE-200-T		VE-200-T		VW-158-AB		C-02-E		C-02-E	
Mineral	CALCITA		FLUORITA		CALCITA		CALCITA		ESFALERITA	
	Tff	Th	Tff	Th	Tff	Th	Tff	Th	Tff	Th
	-13.7	446	-15.4	368	7.4	158	-21.0	325	-20.0	170
	-12.6	365	-12.8	300	8.0	161	-18.5	288	-19.5	178
	-11.0	468	-15.1	380	7.3	159	-15.6	299	-19.0	184
	-14.0	407	-15.0	420	7.6	152	-19.0	321	-18.0	185
	-13.0	450	-14.0	358	8.0	144	-18.6	329	-17.0	190
	-14.1	450	-13.0	400	7.0	148	-18.6	336	-19.0	191
	-16.0	370	-12.0	390	6.7	147	-19.0	325	-19.4	195
	-15.0	378	-13.0	395	6.2	146	-18.9	321	-19.2	196
	-14.0	380	-11.0	369	8.0	161	-16.5	334	-19.5	185
	-13.0	410	-12.5	370	7.5	160	-19.9	332	-19.1	190
	-12.0	420			7.6	160	-19.0	340	-19.2	184
					7.1	160	-19.0	335		
					6.5	159	-18.9	346		
					8.1	163	-18.5	342		
					6.7	147	-18.0	340		
					6.8	148	-19.0	335		
					6.1	179	-20.0	336		
							-19.8	336		
							16.8	343		
							-15.0	298		
							-20.0	308		
							-19.0	338		
							-20.0	297		
							-18.0	282		
							-19.0	322		
							-19.0	314		
							-19.0	325		
							-19.0	326		
							-19.0	327		
							-19.0	325		
Minimo	-16.0	365	-15.4	300	6.1	144	-21.0	282	-20.0	170
Maximo	-11.0	468	-11.0	420	8.1	179	16.8	346	-17.0	196
Promedio	-13.5	413	-13.4	375	7.2	156	-17.6	324	-19.0	186
Desv. Est	1.4	37	1.5	32	0.6	9	6.6	17	0.8	8

