

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISTRIBUCIÓN DE METALES ESTRATÉGICOS (In, Ge Y Ga) EN VETAS Y
CUERPOS DE REEMPLAZAMIENTO POLIMETÁLICOS DEL DISTRITO DE
MOROCOCHA, JUNÍN, PERÚ**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR:

PABLO ERNESTO VALVERDE RODRIGUEZ

ASESOR:

Dr. LISARD TORRÓ I ABAT

Lima, agosto del 2020

Resumen

Las materias primas críticas o estratégicas, entre las que se incluyen el indio, germanio y galio, se caracterizan por una alta demanda y un elevado riesgo de suministro. Su disponibilidad futura es sumamente importante para el desarrollo de tecnologías digitales y ambientalmente sostenibles. Por ello, todo esfuerzo destinado a un mejor conocimiento de sus yacimientos minerales permitirá una exploración y explotación más eficiente.

El presente trabajo de investigación busca contextualizar mineralógica, espacial y temporalmente las concentraciones de In, Ge y Ga en las mineralizaciones vetiformes y de cuerpos de reemplazamiento (tipo “manto”) del yacimiento de Morococha. Un total de 40 muestras fueron estudiadas mediante microscopía (óptica y electrónica de barrido) y la geoquímica mineral de algunas fases de mena fue determinada mediante microsonda electrónica. Las mineralizaciones estudiadas se agrupan en dos zonas particulares del distrito. La primera es periférica al intrusivo de Toromocho – San Francisco, y la segunda es aledaña al stock de Codiciada. Las secuencias paragenéticas son similares en vetas y “mantos” y se pueden subdividir a grandes rasgos en 3 estadios: i) estadio 1, caracterizado principalmente por la presencia de cuarzo y pirita; ii) estadio 2, caracterizado por la precipitación de minerales de Cu-Zn-Pb-Ag en diversas sub-etapas; y iii) estadio 3, dominado por la presencia de carbonatos y, en menor medida, cuarzo, yeso y anhidrita. La mineralización vetiforme presenta además un estadio preexistente al estadio 1 con pirrotina masiva reemplazada por marcasita y pirita. Asimismo, en las diversas mineralizaciones estudiadas se identificaron hasta 3 generaciones de esfalerita. La primera generación se caracteriza por contener finas diseminaciones de calcopirita (1^{ra} generación), la segunda muestra superficies limpias y la tercera se presenta como agregados coliformes con superficies limpias y reflexiones internas pardo-rojizas a anaranjadas.

Las concentraciones máximas de In se registran sistemáticamente en esfalerita, cristalizada en el estadio de metales base (sub-etapa de Fe-Cu-Zn-As-Sn), con hasta 0,39 y 0,53 wt.% In en granos de la primera y segunda generaciones, respectivamente. Las concentraciones de Ge y Ga son sistemáticamente inferiores a sus respectivos límites de detección. Los análisis muestran una fuerte correlación entre las concentraciones atómicas de In y Cu en esfalerita en una proporción de $\text{Cu/In} = 1$, coherente con una sustitución acoplada $\text{Cu}^+ + \text{In}^{3+} \leftrightarrow 2\text{Zn}^{2+}$. El Cu desempeña, de este modo, un papel fundamental en la incorporación del In en la estructura de la esfalerita. Las concentraciones más elevadas de In se han registrado en las zonas ricas en Cu y Cu-Zn, proximales al centro intrusivo de Toromocho – San Francisco, y disminuyen en las zonas periféricas ricas en Zn-Pb-Ag.



Dedicatoria

El presente trabajo de investigación está dedicado a:

Mi familia, por haberme brindado su apoyo en cada decisión tomada a lo largo de mi vida, por inculcar en mí el esfuerzo y la valentía de seguir adelante, de no temer a los diversos problemas que se me presentan en la vida.

Mi asesor de tesis el Dr. Lisard Torró y el Prof. Diego Benites, por haberme brindado la oportunidad de realizar un proyecto a su lado, por el apoyo incondicional y la paciencia del mundo para guiarme a lo largo de la investigación. A los Dres. Silvia Rosas y Jean Vallance por sus comentarios constructivos que han mejorado la calidad de esta tesis.

Mis amistades (Patrick, Silvana, Alvaro, Carlos, Alexis), quienes siempre me motivaron a seguir luchando por mis ideales, por estar en los buenos y malos momentos.

La compañía minera Argentum S.A. (Panamerican Silver), por brindar el apoyo necesario para que este trabajo de investigación sea posible.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento

Este trabajo fue financiado por el CONCYTEC-FONDECYT en el marco de la convocatoria E041-01 [número de contrato 107-2018-FONDECYT-BM—IADT-AV] y por la Dirección de Gestión de la Investigación de la Pontificia Universidad Católica del Perú en el marco del proyecto FONCAI-0023-2019.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 El indio (In), germanio (Ge) y galio (Ga): metales estratégicos para la economía tecnológica.....	1
1.2 Yacimientos de In, Ge y Ga	3
1.3 Antecedentes en el conocimiento de In, Ge y Ga en los Andes centrales	6
1.4 Problemática	9
1.5 Objetivos del trabajo.....	10
1.6 Hipótesis.....	10
1.7 Justificación	11
2. METODOLOGÍA: MUESTREO Y TÉCNICAS ANALÍTICAS	12
2.1 Muestreo.....	12
2.2 Técnicas analíticas	12
2.2.1 Microscopio petrográfico.....	12
2.2.2 SEM-EDS	12
2.2.3 EMPA	13
3. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA	14
3.1 Situación geográfica.....	14
3.2 Situación geológica.....	15
3.2.1 Situación geodinámica.....	15
3.2.2 Geología Regional.....	16
3.2.3 Estratigrafía.....	17
3.2.4 Rocas Intrusivas	25
3.2.5 Geología del yacimiento	26
4. RESULTADOS.....	30
4.1 Mineralogía y texturas.....	30
4.1.1 Veta Morro Solar y Manto Ivette	30
4.1.1 Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel y Ramal Alianza	32
4.2 Geoquímica mineral.....	37

4.2.1 Esfalerita	37
4.2.2 Galena.....	45
4.2.3 Calcopirita.....	46
4.2.4 Cobres grises	47
5. DISCUSIÓN	49
5.1 Mineralogía y distribución temporal de In, Ge y Ga en el yacimiento de Morococha	49
5.2 Distribución espacial de In, Ge y Ga en el yacimiento de Morococha	51
5.3 Recomendaciones para la exploración de In, Ge y Ga en yacimientos tipo cordillerano en los Andes Centrales.....	52
6. CONCLUSIONES.....	54
7. REFERENCIAS.....	56

ANEXOS

Anexo A – Listado de muestras

Anexo B – Petrografía de muestras individuales

Anexo C – Resultados de EPMA

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación del área de estudio.	14
Figura 2: Mapa de los cinturones metalogénicos en los Andes Centrales.....	16
Figura 3: Mapa geológico regional del distrito minero Morococha	22
Figura 4: Fotomicrografías de las mineralizaciones polimetálicas en Veta Morro Solar y Manto Ivette	33
Figura 5: Fotomicrografías de las mineralizaciones polimetálicas en Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel y Ramal Alianza.....	34
Figura 6: Paragénesis mineral generalizada de Veta Morro Solar y Manto Ivette.....	35
Figura 7: Paragénesis mineral generalizada de Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel y Ramal Alianza.....	36
Figura 8: Gráfico de los granos de esfalerita analizados en el yacimiento de Morococha en el diagrama ternario Zn + Fe + Cd + Mn vs. Cu + Ag vs. Sn + In	42
Figura 9: Diagramas binarios con correlaciones entre los diversos elementos presentes en la esfalerita del yacimiento de Morococha	43
Figura 10: Correlación entre In y otros elementos en esfalerita del yacimiento de Morococha.....	44
Figura 11: Composición de los cristales de cobres grises analizados del yacimiento de Morococha en el diagrama ternario $Ag_2S - Cu_2S - Sb_2S_3 + As_2S_3$ y el diagrama binario $Ag/(Ag + Cu)_{at}$ vs $As/(As + Sb)_{at}$.....	47

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Líneas espectrales y estándares usados para la medición y calibración de cada elemento.....	13
Tabla 2: Resumen de la concentración de los elementos en la esfalerita del yacimiento de Morococha (datos de microsonda electrónica).....	37
Tabla 3: Análisis representativos de esfalerita en el yacimiento de Morococha, incluyendo composición química y formula estructural normalizada a S = 1. Límites de detección en la tabla 1.	38
Tabla 4: Análisis representativos de esfalerita en el yacimiento de Morococha, incluyendo composición química y formula estructural normalizada a S = 1. Límites de detección en la tabla 1.	39
Tabla 5: Resumen de la concentración de las diversas generaciones elementales de esfalerita en el yacimiento de Morococha (datos de microsonda electrónica).	41
Tabla 6: Resumen de la concentración de los elementos en la galena del yacimiento de Morococha (datos de microsonda electrónica).....	45
Tabla 7: Resumen de la concentración de los elementos presentes en la calcopirita del yacimiento de Morococha (datos de microsonda electrónica).....	46
Tabla 8: Resumen de la concentración de los elementos presentes en los cobres grises del yacimiento de Morococha (datos de microsonda electrónica).....	48

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El indio (In), germanio (Ge) y galio (Ga): metales estratégicos para la economía tecnológica

Los metales tecnológicos son indispensables para la evolución de la sociedad. Su demanda a nivel mundial se ha incrementado de manera exponencial debido a la aceleración en innovación tecnológica y el rápido crecimiento de las economías en países emergentes (Skirrow et al., 2013; Kesler y Simon, 2015; Comisión Europea, 2017). Garantizar su disponibilidad presente y futura es crucial para la conformación de una sociedad medioambientalmente sostenible y competitiva (Hagelüken, 2012). La Comisión Europea (2017) enumeró un total de 26 elementos con un alto valor económico y un importante riesgo de suministro, entre los que incluyó el indio (In), germanio (Ge) y galio (Ga), objetos del presente estudio.

Desde su descubrimiento y posterior presentación en la exposición mundial de Paris en 1867 (Schwarz-Schampera y Herzig, 2002), el In ha pasado de ser una mera curiosidad científica a convertirse en un elemento clave para las industrias de electrónica de consumo y energías renovables (Werner et al., 2015, 2017). El In se comercializa en una amplia variedad de formas (Schwarz-Schampera, 2014), pero su consumo principalmente es en la producción de óxido de indio-estaño (ITO), que consiste en 90% de óxido de indio y 10% de óxido de estaño. El ITO es un óxido conductor transparente utilizado en prácticamente todas las pantallas planas y táctiles (Shanks et al., 2017; Tolcin, 2017). Más de la mitad de la demanda japonesa y coreana se consume en aplicaciones para ITO, por lo que los precios del In en todo el mundo están estrechamente relacionados a la suerte de estas aplicaciones (Schwarz-Schampera y Herzig, 2002; Werner et al., 2017). El In es también usado en aleaciones, soldaduras y como componente de diodos laser y

LED, debido a su alta ductilidad y maleabilidad (Shanks et al., 2017; Tolcin, 2017). Asimismo, la demanda de In en la industria fotovoltaica y construcción de semiconductores para celdas solares (CIGS, material semiconductor de cobre, indio, galio y selenio) está incrementándose rápidamente, debido a que el In brinda la oportunidad de mejorar la eficiencia y disminuir los costos de producción (Schwarz-Schampera, 2014; Almosni et al., 2018). Finalmente, cabe resaltar que el In es un sustituto del mercurio en aleaciones usadas para la fabricación de lámparas sin electrodos y baterías alcalinas, ya que evita la corrosión de éstas por efecto del zinc, así como la acumulación de gas de hidrogeno (Schwarz-Schampera, 2014; Comisión Europea, 2017).

El Ge presenta propiedades únicas que lo hacen transcendental en numerosas aplicaciones comerciales, industriales e incluso militares (Shanks et al., 2017). El uso y comercialización de este elemento se presenta en una gran variedad de formas: germanio cristalino, tetracloruro de germanio, óxidos, barras de cristal y otros (Melcher and Buchholz, 2013; Shanks et al., 2017). El tetracloruro de germanio (GeCl_4) es un líquido incoloro usado principalmente como reactivo en la producción y potenciación del rendimiento de productos relacionados con fibra óptica (Guberman, 2015; Shanks et al., 2017). Por otro lado, el producto de Ge más comercializado es el dióxido de germanio (GeO_2), que se obtiene al momento de hidrolizar y secar el GeCl_4 (Shanks et al., 2017). El GeO_2 es utilizado como catalizador para la producción de poliéster de alta calidad (PET; Melcher and Buchholz, 2013). El Ge también es usado en instalaciones fotovoltaicas terrestres (Bleiwas, 2010) como capas muy finas pulidas (obleas) que permiten un incremento en la eficiencia en comparación con el silicio cristalino (Almosni et al., 2018).

El Ga es un excelente conductor de electricidad y calor y se utiliza en una amplia variedad de productos como componentes microelectrónicos en forma de arseniuro de galio (GaAs) o nitruro de galio (GaN; Comisión Europea, 2017; Foley et al., 2017). En la actualidad, el mayor

consumo de Ga es en semiconductores compuestos de GaAs (Butcher y Brown, 2013), ya que este compuesto tiene la capacidad de convertir directamente la electricidad en luz láser, permitiendo la construcción de dispositivos optoelectrónicos (diodos laser, LED) y circuitos integrados (Comisión Europea, 2017; Foley et al., 2017). Sin embargo, a futuro se espera que los productos avanzados se basen en GaN, ya que este compuesto opera a mayor voltaje que el GaAs, permitiendo un menor consumo y mejor rendimiento (Foley et al., 2017).

1.2 Yacimientos de In, Ge y Ga

El In, Ge y Ga forman minerales muy poco frecuentes en la naturaleza, y por consiguiente es sumamente improbable que sirvan como fuente primaria de estos elementos (Comisión Europea, 2017; Foley et al., 2017; Shanks et al., 2017). Por esa razón, los tres elementos se obtienen principalmente como subproducto durante el procesamiento de otros metales tales como Al, Ag, Cu, Pb y Zn (Shanks et al., 2017). El In, Ge y Ga se encuentran en una gran variedad de depósitos minerales incluyendo:

- Depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS; Shanks et al., 2012). Estos depósitos contienen cantidades significativas y recuperables de In principalmente en esfalerita (Schwarz-Schampera y Herzig, 2002). Los depósitos de VMS del *greenstone belt* de Murchison (Limpopo, Sudáfrica) proporcionan excelentes ejemplos de depósitos enriquecidos en In con valores que oscilan entre 24 y 641 ppm (Shanks et al., 2017). Otro ejemplo resaltante es el depósito VMS de Neves Corvo (Portugal), que presenta altas concentraciones de In principalmente en esfalerita (1400 ppm en promedio), calcopirita (660 ppm en promedio), stannita (1,3% en peso – en adelante wt.% - en promedio), y roquesita (mineral propio de In con fórmula estructural CuInS_2 ; Carvalho et al., 2018).

- Los depósitos tipo sedimentario-exhalativos (SEDEX) pueden presentar contenidos destacados de In, Ge y Ga (Emsbo et al., 2016). El depósito de Dabaoshan (China) contiene esfalerita con valores de In de hasta 300 ppm en promedio (Ye et al., 2011 en Shanks et al., 2017). La esfalerita del depósito Fankou (provincia de Guandong, China) se encuentra enriquecida en Ge con valores que oscilan entre 30 y 170 ppm (Shanks et al., 2017). Finalmente, cabe resaltar que el depósito de clase mundial “Red Dog” (Alaska) presenta concentraciones de alrededor de 100 ppm de Ge y 26 ppm de Ga (Kelley et al., 2004).
- Los depósitos Mississippi Valley Type (MVT) pueden contener concentraciones económicas de Ge y Ga (Leach et al., 2010; Shanks et al., 2017). Por ejemplo, el depósito Tres Marías ubicado al norte de México se caracteriza por contener una esfalerita enriquecida en Ge, alcanzando concentraciones promedio de ~ 1000 ppm (Melcher y Buchholz, 2013). Asimismo, los depósitos ubicados en el distrito de *Tri-State* (Tennessee, Missouri, Arkansas) alojan una esfalerita con concentraciones de Ge que oscilan entre 60 y 400 ppm, y Ga con valores en promedio de 58 ppm (Melcher y Buchholz, 2013; Foley et al., 2017).
- Los yacimientos epitermales de alta sulfuración pueden presentar concentraciones importantes de In, Ge y Ga. El depósito Mt Carlton (NE de Australia) presenta concentraciones relativamente altas de estos 3 elementos en diferentes minerales cristalizados a lo largo de la secuencia paragenética que ha sido dividida en tres etapas. Las mayores concentraciones de Ga se detectaron en alunita de la etapa 1 (hasta 339 ppm), y en dickita de la etapa 3 (hasta 150 ppm). En la etapa 2A, existe un enriquecimiento en Ge, principalmente en argirodita (6,95 wt.%) y enargita (de hasta 2189 ppm). Finalmente, la

esfalerita de la etapa 2B alcanza concentraciones de Ge de hasta 611 ppm, de Ga de hasta 2829 ppm y de In de hasta 2169 ppm (Sahlström et al., 2017).

- El In puede estar enriquecido en depósitos polimetálicos vetiformes xenotermiales (Schwarz-Schampera y Herzig, 2002). Por ejemplo, el depósito polimetálico de Fukoku (Japón) presenta concentraciones de In en esfalerita que oscilan entre 0,2 y 0,8 wt.%, y estannoidita con concentraciones de In entre 0,09 y 0,30 wt.%. Otros ejemplos de yacimientos de esta tipología enriquecidos en In en los Andes Centrales se presentan en la sección 1.3, a continuación.
- Altos contenidos de Ge han sido descritos en zonas de enriquecimiento supergénico desarrollados sobre yacimientos MVT. Mondillo et al. (2018) determinaron que el yacimiento de Zn de tipo “no-sulfuros” de Cristal en Bongará (norte de Perú), formado a partir de la meteorización de una esfalerita precursora rica en Ge (142 ppm en promedio), presenta contenidos de Ge en goethita de entre 100 y 229 ppm, y en hemimorfita, de entre 39 y 137 ppm.
- Los depósitos de bauxita aportan el 80 % del Ga refinado en todo el mundo (Freyssinet et al., 2005; Foley et al., 2017). Esto se debe a la estrecha afinidad geoquímica entre Ga y Al que permite la fácil sustitución de Ga en minerales de Al, principalmente boehmita, diáspora y gibbsita (Butcher y Brown, 2013; Foley et al., 2017). Por ejemplo, las bauxitas de Arkansas presentan concentraciones de Ga de 50 a 100 ppm, y las bauxitas de la India, de 5 a 122 ppm (Foley et al., 2017).

1.3 Antecedentes en el conocimiento de In, Ge y Ga en los Andes centrales

Schwarz-Schampera y Herzig (2002) enumeraron diferentes yacimientos en los Andes centrales de Perú, Bolivia y el norte de Argentina con concentraciones elevadas de In. Entre los yacimientos minerales ubicados en los Andes de Bolivia, estos autores resaltan Bolívar, Colquiri, Colquechaca, Pulacayo, San Luis, Carguaicollu, Huari Huari y San Vicente. La mayoría de éstos son de tipo vetiforme polimetálico (tipo boliviano; cf. Heuschmidt et al., 2002). Los autores reportan en el depósito de Huari Huari concentraciones muy elevadas de In con un promedio de hasta 1 wt.%. El depósito de San Luis (Berenguela) presenta concentraciones elevadas de In en stannita (hasta 0,42 wt.%), esfalerita (0,38 wt.%) y calcopirita (0,05 wt.%). Por otro lado, los yacimientos en los Andes centrales de Perú que han sido destacados por Schwarz-Schampera y Herzig (2002) son Cerro de Pasco y Morococha. Para este último, describen que los concentrados de zinc albergan contenidos de In cerca de 240 ppm en promedio. Finalmente, en el norte de Argentina, los autores destacan el yacimiento de Piriquitas, depósito en que además de la esfalerita, se encontraron otros minerales portadores de In tales como la petrukita ((Cu,Fe,Zn,Ag)₃ (Sn,In) S₄); con un promedio de 1,6 wt.% de In) y la sakuraiita ((Cu, Zn, Fe)₃ (In, Sn) S₄); con un promedio de 23,2 wt.% en In; ver también Paar et al., 1998).

Soler (1987) analizó 1500 muestras de concentrados minerales y compósitos de menas de Pb y Zn de 89 depósitos ubicados en los Andes centrales en Perú. Este autor determinó concentraciones variables de Cd, In, Ge y Ga en concentrados de Zn. En términos de Cd e In, Soler (1987) distinguió dos grandes grupos de depósitos: un primer grupo con contenidos promedio de Cd bajos y contenidos altos de In con una relación In / Cd superior a 0,10 y un segundo grupo de depósitos con contenidos de Cd medios a altos y promedios bajos de In con una relación In / Cd de menos de 0,05.

En los depósitos estratoligados del Grupo Pucará, sin magmatismo asociado (San Vicente y Shalipayco, de tipo MVT), Soler (1987) identificó concentraciones medias a altas de Ge. En cambio, en los depósitos encajados en series volcanosedimentarias identificó concentraciones bajas de Ge (por debajo de 10 g/t) y niveles altos de In (Carahuacra, Colquijirca y Morococha, yacimientos de tipo cordillerano). Sin embargo, esta regla no es absoluta, ya que algunos depósitos mesotermales a epitermales (Sayapullo y Gran Bretaña) presentaron contenidos importantes de Ge. Por ejemplo, el depósito de Sayapullo (ubicado en la zona de Hualgayoc) presenta las concentraciones más altas de Cd (5840 ppm), In (240 ppm), Ge (310 ppm) y Ga (855 ppm) en la provincia polimetálica de los Andes centrales en Perú. Por otro lado, los depósitos con altos niveles de In y una alta relación In/Cd presentan altos contenidos de Ga. Por esa razón, Soler (1987) concluye que la abundancia de Cd, In, Ge y Ga no está controlada únicamente por la temperatura de formación de los depósitos ya que existen diferencias geoquímicas en depósitos alojados en diferentes rocas caja.

Ishihara et al. (2011) analizaron las concentraciones de In en yacimientos estanníferos-polimetálicos de los Andes Centrales de Bolivia a partir de muestras de mena, compósitos de mineralización y concentrados mineralúrgicos. En muestras del depósito de clase mundial de Cerro Rico de Potosí determinaron concentraciones de In de entre 34 y 5740 ppm. Las muestras del depósito de Huari Huari aportaron concentraciones de hasta 3080 ppm de In. Las muestras de compósitos de Oploca y de las venas ramificadas de la mina Siete Suyos devolvieron concentraciones de In de entre 2240 y 2510 ppm. Por otro lado, los autores realizaron análisis mediante microsonda electrónica (EPMA) de minerales de mena provenientes de los depósitos de Cerro Rico de Potosí (1 muestra) y Huari Huari (1 muestra). En la muestra de Cerro Rico

determinaron que la esfalerita alberga contenidos de In que oscilan entre 0,24 y 1,27 wt.%, mientras que la petrukita presenta concentraciones de In de hasta 4,86 wt.%.

Murakami e Ishihara (2013) estudiaron la distribución de In en minerales de mena de los yacimientos bolivianos de Cerro Rico de Potosí (3 muestras), Huari Huari (1 muestra), Bolívar (1 muestra) y Porco (1 muestra) mediante ablación láser femto-segundo conectada a espectroscopía de masas acoplada inductivamente a una fuente de plasma (fsLA-ICPMS) y EPMA. En el depósito de Cerro Rico de Potosí, los cristales de esfalerita negra (var. marmatita) presentaban concentraciones de In con un valor promedio de entre 430 y 5290 ppm. De ese modo, los autores determinaron que el enriquecimiento de In, Cu, Sn y Ag está relacionado con un empobrecimiento en Zn y sugirieron los siguientes mecanismos de sustitución catiónica: $Zn^{2+} \leftrightarrow Fe^{2+}$, $2Zn^{2+} \leftrightarrow Fe^{2+} + Cd^{2+}$ y $2Zn^{2+} \leftrightarrow Cu^{+} + In^{3+}$.

Jiménez-Franco et al. (2018) analizaron la composición mineral y geoquímica de las menas presentes en el distrito minero Santa Fe (Bolivia), enfocándose principalmente en las minas de Japo, Santa Fe y Morococala. El estudio tuvo como base 169 muestras de roca: 108 de núcleos de perforación, 38 de galerías mineras y 23 de afloramientos. En este distrito, los autores describen casiterita con concentraciones de In que oscilan entre 0,09 y 0,25 wt.%. Las concentraciones de In más elevadas fueron determinadas en cristales de sakuraiita (hasta 2,03 wt.%) de Morococala. Jiménez-Franco et al. (2018) demostraron de este modo que algunos minerales de Sn pueden alojar concentraciones relativamente elevadas de In.

Torró et al. (2019a) realizaron un estudio de la mineralogía y geoquímica del depósito Huari Huari (Bolivia) con el objetivo de brindar una mejor comprensión sobre los parámetros que controlan la concentración de In en la mineralización. Este estudio se basó en 78 muestras de galería y superficie. Las mayores concentraciones de In se ubicaron en una primera generación de

esfalerita rica en Fe (hasta 3,49 wt.%), así como en stannita (hasta 2,64 wt.%). Estos dos minerales forman solución sólida incompleta con la roquesita dentro del sistema pseudoternario (Zn, Fe)S – Cu₂FeSnS₄ – CuInS₂, explicando de ese modo la relación existente entre las proporciones catiónicas de las diversas fases en Huari Huari. Los autores sugieren que el Cu habría sido un factor clave para la incorporación del In en la estructura de la esfalerita. Torró et al. (2019b) realizaron un estudio petrográfico detallado y geoquímica mineral del distrito de Animas-Chocaya-Siete Suyos. Los autores determinaron una secuencia paragenética de 3 etapas, con altísimos contenidos de In en esfalerita de la etapa 2 (hasta 9,66 wt.%), stannita (hasta 4,11 wt.%) y, en menor medida, wurtzita (hasta 1,61 wt.%), esfalerita de etapa 1 (0,35 wt.%), casiterita (hasta 0,25 wt.%) y ramdohrita (0,24 wt.%). En los análisis observaron que el In en esfalerita presenta una correlación positiva con Cu, denotando, el papel importante que juega el Cu en la acumulación de In en este sulfuro.

1.4 Problemática

Son escasos los estudios relacionados con la concentración y distribución de metales críticos (In, Ge y Ga) en yacimientos minerales de los Andes Centrales. En los Andes de Perú, el único conocimiento existente con relación a mineralizaciones de In, Ge y Ga es el artículo publicado por Soler (1987), quien basó su estudio en datos de geoquímica de roca total (concentrados minerales o compósitos de mena) que no permite comprender la expresión mineralógica y distribución espacio-temporal de los elementos en yacimiento zonados. Sin embargo, en los Andes de Bolivia existen estudios recientes de geoquímica mineral enfocados principalmente en estos metales críticos (e.g., Ishihara et al., 2011; Murakami e Ishihara, 2013; Torró et al., 2019a,b). Estos autores demuestran que los metales críticos presentan un control temporal y zonal. Finalmente, cabe resaltar que no se ha estudiado nunca la distribución de In, Ge

y Ga de manera particular en yacimientos de tipo cordillerano, por lo cual no existen guías de exploración en esta tipología para elementos tan importantes en el campo de la innovación tecnológica y medioambiental.

1.5 Objetivos del trabajo

Objetivo general: “Contextualizar espacial y temporalmente las concentraciones de In, Ge y Ga en mineralizaciones vetiformes y de cuerpos de reemplazamiento (tipo “manto”) del distrito de Morococha y describir patrones de distribución útiles para su exploración en yacimientos cordilleranos”.

Objetivos específicos:

- Elaborar secuencias paragenéticas completas para las vetas y cuerpos de reemplazamiento en carbonato estudiados.
- Analizar la geoquímica mineral (elementos mayoritarios y minoritarios, con especial enfoque en In, Ge y Ga) de los minerales de mena de las mineralizaciones estudiadas.
- Determinar cuál es la expresión mineralógica del In, Ge y Ga en las mineralizaciones estudiadas y su distribución espacial y temporal (i.e., a lo largo de las secuencias paragenéticas).
- Establecer patrones útiles para la exploración de In, Ge y Ga en mineralizaciones polimetálicas en yacimientos de tipo cordillerano.

1.6 Hipótesis

A partir de los estudios relacionados con metales críticos (In, Ge y Ga) en los Andes Centrales (Soler, 1987; Ishihara et al., 2011; Murakami e Ishihara, 2013; Jiménez-Franco et al.,

2018; Torró et al., 2019a,b) se puede inferir que el In, Ge y Ga se encuentran principalmente en una generación de esfalerita cristalizada en un momento particular de toda la secuencia de mineralización, y que, en menor medida, se pueden hospedar en minerales de Sn. La principal hipótesis es que la distribución del In en el distrito de Morococha está muy ligada a la disponibilidad de Cu en el sistema al momento de la cristalización de la esfalerita. Se prevé que la concentración de Ge y Ga será relativamente baja por el origen predominantemente magmático de los fluidos que forman los yacimientos de tipo cordillerano.

1.7 Justificación

Hoy en día los metales críticos son indispensables para la innovación tecnológica y un desarrollo medioambientalmente sostenible. Por esa razón, la presente investigación brindará un valioso aporte científico, ya que será el primer estudio que describa los patrones de distribución de In, Ge y Ga en yacimientos tipo cordillerano. Además, estos patrones de distribución podrán ser usados como futuras guías de exploración. La elección del yacimiento del Morococha como zona de estudio no es casual, sino que responde a que como distrito aloja toda una variedad de tipologías de yacimientos minerales (pórfido, skarn, vetas polimetálicas y cuerpos de reemplazamiento de carbonatos) que se encuentran interconectados genéticamente, convirtiéndolo en un excelente laboratorio natural.

2. METODOLOGÍA: MUESTREO Y TÉCNICAS ANALÍTICAS

2.1 Muestreo

A mediados del mes de febrero del 2019 se realizó una salida de campo al distrito minero Morococha en colaboración con la compañía minera Argentum S.A. (Pan American Silver Corporation). Se obtuvieron un total de 40 muestras. De éstas, 11 muestras fueron obtenidas en frentes de explotación de galerías subterráneas y 29 muestras a partir de taladros de diamantina (identificación y distribución de las muestras disponible en Anexo A). Las estructuras mineralizadas muestreadas en el distrito fueron Veta Morro Solar, Manto Ivette, Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel y Ramal Alianza.

2.2 Técnicas analíticas

2.2.1 Microscopio petrográfico

Se fabricaron 60 secciones pulidas en las instalaciones del Laboratorio QEMSCAN en la Sección Ingeniería de Minas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Estas preparaciones han sido estudiadas por el tesista mediante un microscopio petrográfico marca “Zeiss Primotech” de polarización con luz transmitida y reflejada equipado con una cámara digital. Fichas individuales con la petrografía de cada sección pulida estudiada quedan recogidas en el Anexo B.

2.2.2 SEM-EDS

Objetivos específicos de una selección de secciones pulidas han sido estudiados por el tesista mediante microscopio electrónico de barrido ambiental (SEM) Quanta 650 FEI equipado

con un sistema de microanálisis EDAX-Octane Pro EDS en el Centro de Caracterización de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú (CAM-PUCP). Las condiciones de operación para los análisis fueron 20 keV de voltaje de aceleración y una corriente de 5 nA. Las imágenes fueron obtenidas en modo de electrones retrodispersados (BSE).

2.2.3 EMPA

Los análisis químicos puntuales de los sulfuros presentes en las muestras fueron realizados por el Dr. Lisard Torró mediante una microsonda electrónica JEOL JXA-8230 equipada con cinco espectrómetros WDS en los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona (CCiT-UB). El equipo fue operado a un voltaje de aceleración de 20 keV, haz de corriente de 20 nA y diámetro del haz de 5 μm . En la Tabla 1 se enumeran las líneas espectrales de análisis y los estándares usados para la medición y calibración de cada elemento. En el Anexo C se muestran algunos análisis representativos de EPMA.

Tabla 1: Líneas espectrales y estándares usados para la medición y calibración de cada elemento mediante EPMA.

Elemento	Línea espectral	Estándar
Sb	L α	Sb
In	L β	In ₂ Se
S	K α	Esfalerita
Pb	M α	PbS
As	L β	GaAs
Fe	K α	FeS ₂
Cu	K α	Calcopirita
Zn	K α	Esfalerita
Ga	K α	GaAs
Ge	K α	Ge
Cd	L β	CdS
Ag	L α	Ag
Sn	L α	Sn

3. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA

3.1 Situación geográfica

El distrito minero de Morococha se ubica a una latitud de $11^{\circ}36' S$ y una longitud de $76^{\circ}10' O$ en la provincia de Yauli, departamento de Junín, a 150 km al este de Lima y a 38 km al oeste de la Oroya, ciudad capital de la provincia de Yauli (Figura 1). El distrito se ubica entre los 4375 y 5290 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) al este de la divisoria continental formada por las montañas de los Andes (Cerro de Pasco Copper Corporation, 1965; Nagell, 1960; Bendezú, 2007; Wafforn et al., 2014).

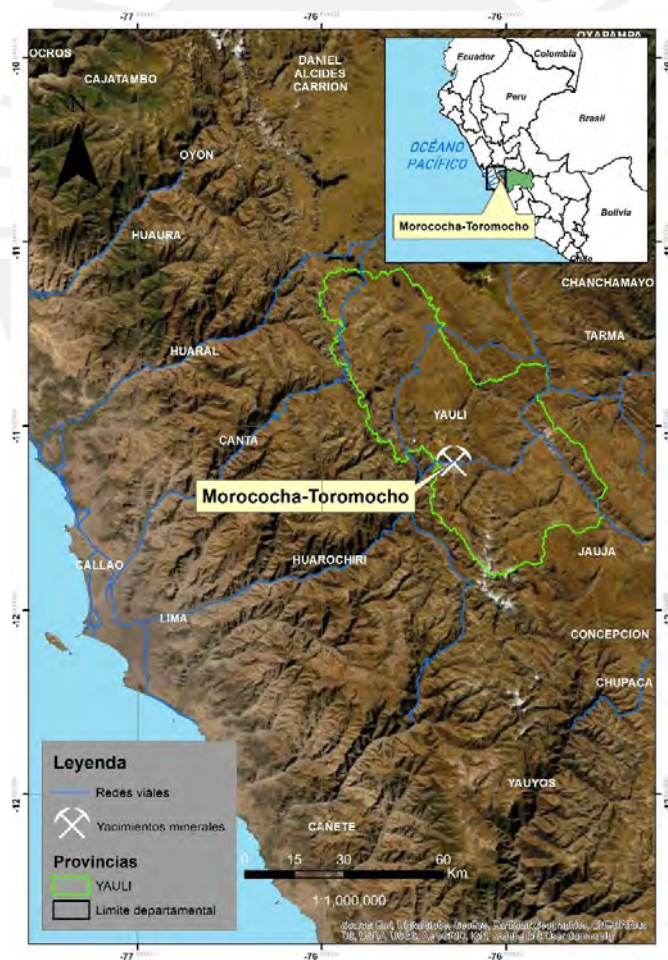


Figura 1: Ubicación del área de estudio (Modificado de Google Earth, 2019).

3.2 Situación geológica

3.2.1 Situación geodinámica

El territorio peruano se encuentra dividido en trece dominios geotectónicos entre los que se incluye la Cordillera Occidental a lo largo de la cual se extiende el cinturón metalogenético del Mioceno, que incluye al distrito minero de Morococha (Figura 2; Petersen, 1965; Carlotto et al., 2009; Fontboté, 2018). El proceso implicado en la evolución de la Cordillera Occidental del Perú es el ciclo geodinámico andino, controlado por la subducción de la placa oceánica de Nazca por debajo del margen occidental del continente sudamericano (Benavides, 1999). La Cordillera Occidental ha sufrido múltiples episodios de deformación compresiva desde al menos el Paleozoico hasta el Neógeno.

El cinturón metalogenético del Mioceno se extiende por lo menos 900 km a lo largo de la Cordillera Occidental (Noble y McKee, 1999). En éste, la mineralización está asociada a magmatismo calco-alcálido entre el Oligoceno tardío y el Mioceno (6-20Ma; Noble y McKee, 1999; Bissig et al., 2008; Catchpole et al., 2015a, 2016).



Figura 2: Mapa de los cinturones metalogenéticos en los Andes Centrales (modificado de Fontboté, 2018).

3.2.2 Geología Regional

El distrito minero de Morococha se encuentra ubicado en la zona este de la Cordillera Occidental del Perú, zona donde el entorno estructural está dominado por pliegues con dirección noroeste. El pliegue más importante y en el cual está integrado el distrito minero es el anticlinal conocido como domo de Yauli (Figura 3). Para un mejor entendimiento de la geología a escala regional y distrital, el presente capítulo describe diferentes características litológicas y estructurales basadas en la compilación de estudios realizados en la zona de Morococha (Mc Laughlin, 1924; Mc Laughlin et al., 1933; Weaver, 1942; Harrison, 1943; Terrones, 1949; Jenks, 1951; Newell et al., 1953; Nagell, 1960; Guizado y Landa, 1965; Cerro de Pasco Copper Corporation, 1965; Petersen, 1965; Megard, 1968; Paredes, 1972; Eyzaguirre et. al., 1975;

Megard, 1979; Loughman y Hallam, 1982; Ingemmet, 1983; Rivera y Kobe, 1983; Stanley, 1994; Sempere, 1995; Rosas y Fontboté, 1995; Sempere et al., 2002; Beuchat, 2003; Rosas et al., 2007; Ritterbush et al., 2015; Rosas, 2016; Spikings et al., 2016).

3.2.3 Estratigrafía

Grupo Excelsior

El Grupo Excelsior está presente tanto en la Cordillera Oriental como occidental, se compone principalmente de lutitas pizarrosas y filitas negruzcas (McLaughlin, 1924; Megard, 1968). En ciertas zonas, estas rocas pasan progresivamente a esquistos cloríticos y sericíticos, con colores que varían entre el negro y el verde olivo (Terrones, 1949; Megard, 1968). Fueron referidos por Megard (1968) como de tipo “flysch”. El grosor de la secuencia es hasta el día de hoy desconocido.

Las rocas pertenecientes al Grupo Excelsior presentan plegamiento y foliación debido a la orogénesis Hercínica (Ingemmet, 1983). Harrison (1943) atribuyó una edad Devónica al Grupo Excelsior debido al descubrimiento de fósiles (braquiópodos) en las ciudades de Tarma y Concepción. Esta edad fue confirmada posteriormente por Paredes (1972) tras el descubrimiento de varios yacimientos fosilíferos en la región de Jauja y Concepción.

Grupo Mitu

Aflora principalmente en la Cordillera Oriental del Perú central y sur, y se extiende hasta la faja plegada y corrida de Huarina, región occidental de la Cordillera Oriental de Bolivia (McLaughlin, 1924; Newell et al., 1953; Megard, 1979; Sempere, 1995; Sempere et al., 2002). En el área de estudio están presentes predominantemente en el centro del distrito y constituyen las

rocas más antiguas del afloramiento (Bendezú, 2007; Catchpole et al., 2016; Figura 3). Las primeras capas descansan sobre los bordes levantados y erosionados del Grupo Excelsior. McLaughlin (1924) precisó que el espesor del Grupo Mitu es de 760 m. Por otro lado, Lepry (1981) resaltó que, al sur de Morococha, el espesor del Grupo Mitu varía desde 300 m (zona suroeste del domo de Yauli) hasta 700 m (zona noreste del domo de Yauli). El Grupo Mitu se divide principalmente en dos fases bien marcadas (McLaughlin, 1924; Terrones, 1949): lutitas rojas de Potosí y Volcánicos Catalina. Las lutitas rojas de Potosí están constituidas por brechas calcáreas, areniscas, calizas y conglomerados cuyo espesor se ha estimado en aproximadamente 200 m. Su color varía entre el rojo ladrillo y violeta (Terrones, 1949; Megard, 1968; Ingemmet, 1983). Los Volcánicos Catalina afloran en los alrededores del domo de Yauli y localmente reposan sobre las filitas del Grupo Excelsior (Ingemmet, 1983). Su origen está asociado a derrames lávicos y depósitos piroclásticos con composiciones andesíticas y localmente dacíticas, con texturas porfíricas (Terrones, 1949; Ingemmet, 1983). En síntesis, el Grupo Mitu presenta diversas variaciones laterales de facies y de potencia.

La depositación del Grupo Mitu se debe a la erosión de las series subyacentes y otros clastos, producto del levantamiento que originó la fase tardihercínica (Rivera y Kobe, 1983; Ingemmet, 1983). Kontak et al. (1985) fueron los primeros autores que relacionaron al Grupo Mitu con un proceso de rifting, internamente constituido por un conjunto de rocas sedimentarias clásticas de origen terrestre y marino (“Molasse Sediments”; Ellison et al., 1989; Rosas et al., 2007). Rosas et al. (2007) atribuyen al Grupo Mitu una edad Triásica, que confirmó Spikings et al. (2016) mediante edades U-Pb en zircón. Sin embargo, dataciones U-Pb más recientes realizados por Panca et al. (2018) en zircons detríticos, indicarían que los eventos volcánicos en el Grupo Mitu tuvieron lugar desde el Pérmico Superior hasta el Triásico Superior (260-233 Ma).

Grupo Pucará

Se presenta en dos facies principalmente: una Occidental, ubicada en las altas mesetas, y otra Oriental, que se desarrolla en la Cordillera Oriental (facies clásica del Pucará; Megard, 1968; Figura 3). Terrones (1949) la describe como la Formación Potosí y la presenta con una gran cantidad de subdivisiones, debido a que los paleorelieves sobre los cuales se depositaron los sedimentos de Pucará originaron una diversidad de estructuras y composiciones (Rivera y Kobe, 1983). La Formación Potosí y las subdivisiones del Grupo Pucará generaron disyuntivas con respecto a su correlación. Sin embargo, estudios litológicos, litogeoqumicos y de facies sedimentarias permitieron correlacionarlas y validar la división en tres unidades litoestratigráficas: Formación Chambará, Formación Aramachay y Formación Condorsinga (Megard, 1968; Rosas, 1994; Rosas et al., 2007; Rosas, 2016).

La Formación Chambará es predominantemente dolomítica (>80%), con intercalaciones locales de dolomías calcáreas y calizas (Rosas y Fontboté, 1995; Rosas et al., 2007). A lo largo de los márgenes de la cuenca, el retrabajamiento de los sedimentos ha originado un componente detrítico (> 40%; Rosas et al., 2007). El componente principal detrítico es el cuarzo, presente en mayor cantidad en las columnas más occidentales y más orientales (Rosas y Fontboté, 1995). Asimismo, el chert es característico de esta formación y se presenta en forma de bandas y nódulos centimétricos (Rosas y Fontboté, 1995; Rosas et al., 2007). La Formación Chambará está compuesta principalmente por sedimentos de aguas someras depositados sobre un bloque pivotante, denominado de este modo debido a una subsidencia asimétrica en el basamento con engrosamiento en dirección este (Rosas y Fontboté, 1995). Por ello, se observan importantes cambios de potencia. El modelo sedimentario de Chambará comprende facies supra, inter y submareal con desarrollo de “lagoon” y barras, facies sedimentarias que representan una sucesión

influenciada por las mareas (Rosas y Fontboté, 1995; Rosas et al., 2007). La edad que se le asigna a la Formación Chambará es Noriano – Raethiano en base a la aparición de diversos fósiles como el braquiópodo *Spondylospira* sp. (Megard, 1968), el bivalvo *Monotis subcircularis* GABB (Prinz, 1985) y los microprolitos *Palaxius salatensis*, *Parafavreina thoronetensis* y *Parafavreina huaricolcanensis* (Senowbari-Daryan y Stanley, 1986).

La Formación Aramachay sobreyace directamente a la Formación Chambará (Rosas y Fontboté, 1995). En la región del Altiplano y de la Cordillera Oriental esta unidad está compuesta de calizas negras laminadas y bituminosas que contienen intercalaciones esporádicamente de lutita y limolita (Rosas y Fontboté, 1995; Rosas et al., 2007). Los sedimentos de esta unidad presentan valores de carbono orgánico total (COT) entre 0,28 y 4,01 wt.% y valores de fosfatos relativamente altos, típicamente asociados con una alta productividad biológica y condiciones de reducción en los sedimentos del fondo marino (Rosas et al., 2007). La litología y facies sedimentarias presentes en estas regiones sugieren una sedimentación en cuenca relativamente profunda. En la Cordillera Occidental del centro del país, la Formación Aramachay presenta una litogeoquímica particular, que distingue a la zona inferior por un mayor contenido en SiO_2 (hasta 77,3 wt.%), Al_2O_3 (hasta 8,92 wt.%), TiO_2 (hasta 0,6 wt.%) y K_2O (hasta 4 wt.%) respecto a la Formación Chambará y Condorsinga (Rosas y Fontboté, 1995; Rosas et al., 2007). En esta región, estudios sobre las dolomías ricas en chert de esta unidad develan una comunidad de plataforma continental dominada por esponjas silíceas, que incluye fósiles de cuerpos de esponjas, restos de esponjas comprimidos in-situ y abundantes sedimentos espiculíticos. Las esponjas silíceas brindan la explicación de una litología enriquecida en chert y su supremacía en la ecología local durante aproximadamente dos millones de años (inicios del Jurásico), exponiendo que el papel que ejercían los metazoarios en la producción de sedimentos y estructuras ecológicas se redujeron profundamente en comparación

con las Formaciones Chambará y Condorsinga (Ritterbush et al., 2015, Rosas, 2016). Por esa razón, en la región occidental se habrían desarrollado facies bioquímicas de plataforma somera, mientras que en la región oriental se habrían depositado los sedimentos propios de cuenca profunda (Rosas, 2016). La edad que se le asigna a la Formación Aramachay es Raetiano Superior a Sinemuriano indicado por los ammonites *Vermiceras*, *Arnioceras*, *Eparities*, *Plesechioceras* (Megard, 1968), *Psiloseras* (Prinz, 1985) y moluscos *Aucella* y *Cucullaea* (Megard, 1968; Stanley, 1994).

La Formación Condorsinga está compuesta principalmente por calizas con presencia local de dolomita en la base (Rosas y Fontboté, 1995; Rosas et al., 2007). Otra de las características típicas de esta formación es la presencia de evaporitas como lentes, niveles extensos o pseudomorfos (Rosas y Fontboté, 1995). Asimismo, el contenido de chert y detritos (< 3%) es menos abundante que en las otras formaciones debido a la menor presencia de espículas de esponjas (Rosas y Fontboté, 1995; Rosas et al., 2007). Todas las facies presentes en Condorsinga corresponden a aguas someras, a excepción de la base en Tarmatambo y Vilcapoma, que se relacionan a una plataforma abierta (Rosas y Fontboté, 1995). Los paquetes bioclásticos de la base de Condorsinga están presentes en las facies de la zona superior de Aramachay, sugiriendo una continuación del entorno abierto y sin restricciones de la cuenca. En la zona central de Condorsinga hay presencia de facies submareales y se produce la disolución de ooides y la posterior cementación por calcita (Rosas et al., 2007). Las facies supra/intermareales consisten en lodolitas con laminaciones de algas y brechas, indicando la presencia de condiciones más restringidas durante la sedimentación de la Formación Condorsinga (Rosas y Fontboté, 1995; Rosas et al., 2007). En la zona superior de Condorsinga, se presentan sedimentos laminados de algas, compuestos de granos finos de arena y contenidos bajos de materia orgánica (Rosas et al., 2007).

Se le atribuye una edad entre el Sinemuriano Superior al Toarciano, debido a los diversos descubrimientos de fósiles realizado por Megard (1968, 1979). Al menos para la parte superior de Condorsinga se sugiere una edad Torciano Superior, ya que se hallaron ammonites *Phymatoceras* y *Esericeras* (Megard, 1968; Stanley, 1994).

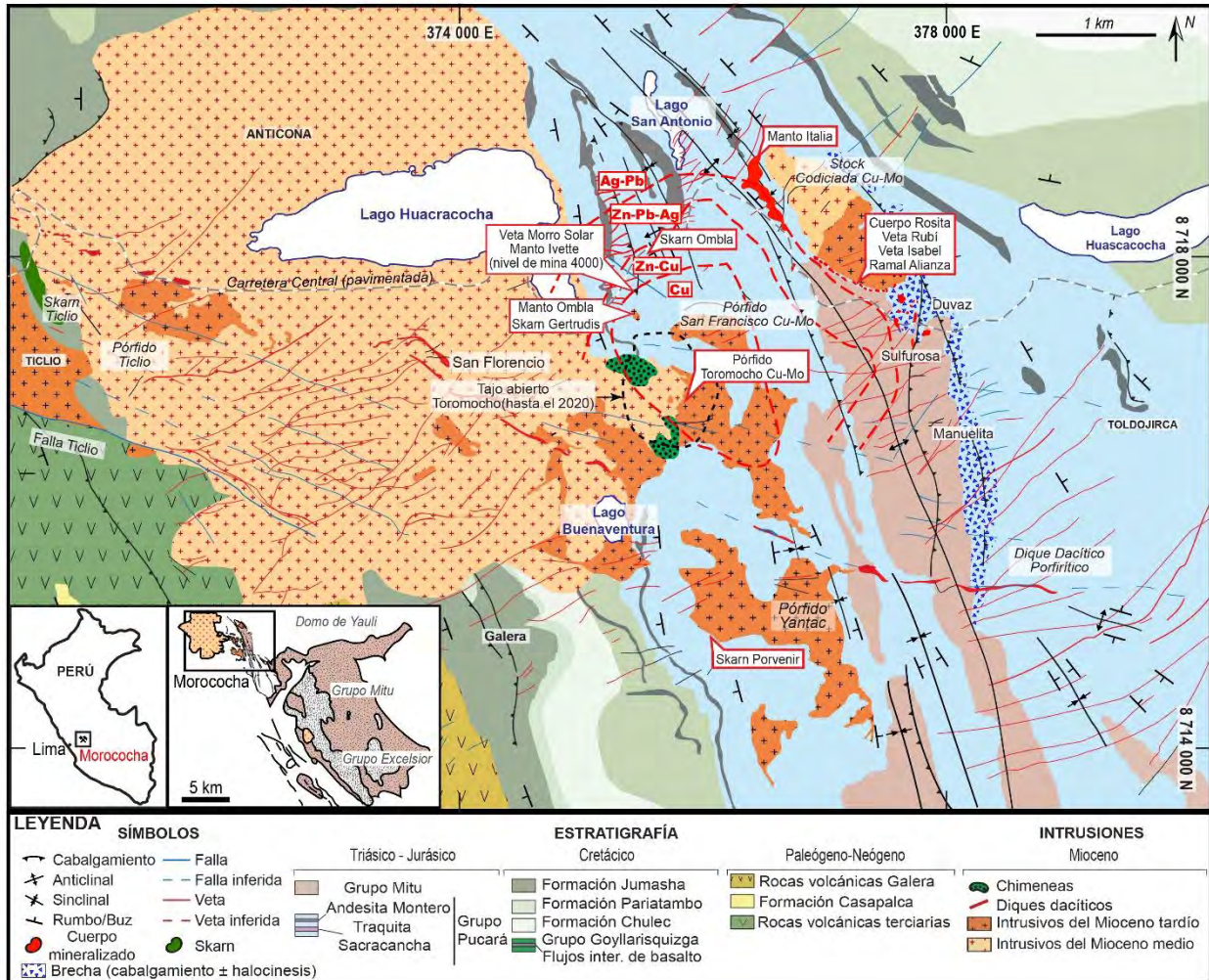


Figura 3: Mapa geológico regional del distrito minero Morococha (modificado de Catchpole et al., 2015b).

Grupo Goyllarisquizga

En la zona de Morococha, el Grupo Goyllarisquizga está expuesto al norte, noreste y suroeste (Figura 3) y sobryace de manera concordante o ligeramente discordante a las rocas del Grupo Pucará (Ingemmet, 1983; Rivera y Kobe, 1983). Está compuesto de areniscas blancas (a

veces arcillosas) con intercalaciones de areniscas grises más resistentes que conforme se va ascendiendo en la secuencia van tomando mayor importancia (Megard, 1968). Las capas superiores están compuestas de margas grises, alternadas de partes carbonosas y capas delgadas de caliza, seguidas de una capa de cuarcita de entre 6 a 15 m de espesor. Por encima de esta capa de cuarcita se observan capas de basalto e intrusiones de diabasa (Terrones, 1949). Este grupo no presenta restos fósiles, pero al infrayacer a sedimentos del Albiense es considerada como parte del intervalo Neocomiano-Aptiano (Ingemmet, 1983).

Formaciones Chúlec, Pariatambo y Jumasha

Su afloramiento está restringido a las regiones de Buenaventura, Galera y Ticlio y forma parte de las estructuras al suroeste del anticlinal de Morococha (Terrones, 1949; Ingemmet, 1983; Figura 3). Se les asigna una edad entre el Albiense Medio y el Cenomaniense (Ingemmet, 1983).

La Formación Chúlec se encuentra discordante sobre el Grupo Goyllarisquizga y subyace al primer estrato de calizas negras de la Formación Pariatambo (Megard, 1968). Presenta en la base unos 200 m de caliza gris a marrón que va intercalándose con caliza margosa y lutita gris parda que termina en el tope de la última intercalación con areniscas (Megard, 1968; Ingemmet, 1983). La Formación Chúlec registra una gran invasión marina que ocurrió a inicios del Albiense Medio (Megard, 1968).

La Formación Pariatambo suprayace concordantemente a la Formación Chúlec (Megard, 1968). Está compuesta por estratos de caliza y margas negras bituminosas, fosfáticas bien laminadas de 47 a 50 m de espesor con presencia de ammonites (oxitropidoceras) y pelecípodos (Terrones, 1949; Ingemmet, 1983). Su presencia permite diferenciar las calizas de Chúlec de las calizas de la Formación Jumasha (Ingemmet, 1983). Los cambios de facies de la Formación

Pariatambo muestran un evento de regresión que ocurrió durante la fase terminal del Albiense Medio (Megard, 1968).

La Formación Jumasha sobreyace concordantemente a las calizas de la Formación Pariatambo (Megard, 1968). Comprende unos 330 m capas medianas a gruesas (5 a 15 m) de calizas margosas, lutitas y calizas dolomíticas intercaladas (Terrones, 1949; Ingemmet, 1983). En esta formación no se observa presencia de fósiles (Ingemmet, 1983).

Formación Casapalca

Aflora en las porciones más occidentales del distrito (Figura 3), específicamente en las zonas de Galera y Ticlio (Terrones, 1949). La Formación Casapalca, depositada en un ambiente continental, está dividida en 2 miembros: Casapalca (miembro inferior) y El Carmen (miembro superior; Ingemmet, 1983).

El Miembro Casapalca está compuesto de intercalaciones de areniscas, limolitas y lutitas rojas que en algunos casos se alternan con areniscas calcáreas y areniscas guijarrosas (Ingemmet, 1983). Estos sedimentos provienen en su gran mayoría de formaciones inferiores (Megard, 1968). Esta secuencia está presente en la sección al suroeste de la laguna Pomacocha de manera plegada y fallada (Ingemmet, 1983).

El Miembro El Carmen consiste en bancos de entre 2 y 5 m de espesor de conglomerados cuarcíticos, con calcita como relleno de una matriz rosácea (Ingemmet, 1983). Encima de esta, se observan areniscas con intercalaciones de conglomerados y lutitas que alcanzan espesores de hasta 30 m y su proporción disminuye conforme se asciende en la secuencia (Megard, 1968). Aparece

en los núcleos de los sinclinales y anticlinales en el área de Casapalca-Buculic-Cotay (Ingemmet, 1983).

La edad que se estima para la Formación Casapalca es Cretácico Superior en la zona de Cerro de Pasco (Jenks, 1951), si bien esta edad es poco robusta debido a la ínfima cantidad de fósiles. Sin embargo, Ingemmet (1983) estima, a través de las relaciones estratigráficas y tectónicas, su edad entre el Cretácico Superior y el Eoceno Medio.

3.2.4 Rocas Intrusivas

En el distrito minero de Morococha se reconocen principalmente dos fases de actividad ígnea representadas por 1) la microdiorita Codiciada y diorita Anticona, más antiguas, y 2) la serie Morococha, con intrusivos más jóvenes (Petersen, 1965). Estos eventos intrusivos iniciaron entre el Mioceno Medio y Tardío (Mc Laughlin et al., 1933; Petersen, 1965; Eyzaguirre et al., 1975) con el emplazamiento de la microdiorita Codiciada a $14,31 \pm 0,04$ Ma y la diorita Anticona a $14,07 \pm 0,04$ Ma (Kouzmanov et al., 2008; Bendezú et al., 2012). Estos dos intrusivos carecen de mineralización asociada (Bendezú et al., 2012; Kouzmanov et al., 2008, Catchpole et al., 2016). El intrusivo Anticona ocupa la porción occidental del distrito minero (Petersen, 1965; Beuchat, 2003), presenta una composición cuarzodiorítica y textura porfírica (Beuchat, 2003). Su contacto oriental generalmente se inclina hacia la zona oeste, intruyendo, a manera de lacolito en los sedimentos del Grupo Pucará alterados (Petersen, 1965). Tiende a presentar coloración gris verdosa oscilando a marrón grisáceo en fractura fresca (Cerro de Pasco Copper Corporation, 1965).

Los centros magmático-hidrotermales de Codiciada, Ticlio y Toromocho se emplazaron posteriormente y están asociados a mineralización metálica (Catchpole et al., 2016). De los tres, el centro magmático-hidrotermal Codiciada es el más antiguo, con una edad U-Pb en titanita de

9,3 ± 0,2 Ma y comprende un pórfido asociado a un skarn anhidro y vetas de cuarzo-molibdenita (Bendezú et al., 2012; Catchpole et al., 2015a; Catchpole et al., 2016). El centro magmático-hidrotermal de Ticlio, ubicado aproximadamente a 5 km al oeste de Toromocho (extremo oeste del distrito), se emplazó hace 8,3 Ma (Catchpole et al., 2015a). Está compuesto de un stock de pórfido con venas de cuarzo-magnetita ± feldespatos potásico y un patrón de alteración filica datada en 8,04 ± 0,14 Ma (Catchpole et al., 2015a). Toromocho, el centro magmático-hidrotermal más joven (Catchpole et al., 2016), se ubica en el centro del distrito de Morococha y registra al menos dos pulsos hidrotermales y una serie de eventos intrusivos de pórfidos que abarcan aproximadamente 1,3 Ma, desde el emplazamiento del pórfido de granodiorita (8,45 Ma) hasta la intrusión de un dique de pórfido dacítico (7,26 Ma; Kouzmanov et al., 2008; Catchpole et al., 2015a, 2016). Los stocks más importantes son Potosí, San Francisco, Gertrudis y Yantac (Cerro de Pasco Copper Corporation, 1965; Petersen, 1965).

El intrusivo de Potosí es el único stock que se encuentra ubicado en el flanco oriental del anticlinal principal (Petersen, 1965). Está compuesto de cuarzomonzonita y presenta una textura porfirítica (Cerro de Pasco Copper Corporation, 1965; Petersen, 1965; Bendezú, 2007). Estudios a detalle del intrusivo de San Francisco pueden encontrarse en Cerro de Pasco Copper Corporation (1965), Petersen (1965) y Mc Laughlin et al. (1933).

3.2.5 Geología del yacimiento

El distrito minero Morococha contiene mineralizaciones que pueden clasificarse en una amplia variedad de tipologías interconectadas entre ellas y asociadas a las últimas etapas de la actividad magmática del Mioceno (Beuchat, 2003; Wafforn et al., 2014). Los depósitos se pueden clasificar en cuatro tipos:

- **Mineralización tipo pórfido:** las venas tipo pórfido y mineralización diseminada están asociadas al intrusivo de Toromocho (Cu-Mo) y Codiciada (Cu-Mo), el área de sulfurosa al sureste de Toromocho y la intrusión del pórfido de Ticlio (Cu-Au; Figura 3; Catchpole et al., 2015a). No obstante, el único depósito de tipo pórfido económico es Toromocho (Cu-Mo; Beuchat, 2003; Catchpole et al., 2015a). A la fecha se ha determinado que el depósito Toromocho contiene una reserva de 1,474 Gt con leyes de 0,471% de Cu, 0,019% de Mo y 6,89 g/t de Ag (Chinalco Mining Corporation International, 2015) y es explotado por Minera Chinalco Perú S.A. Las rocas circundantes a este pórfido presentan un gran halo de alteración potásica, skarn y sericítica que albergan una mineralización de cuarzo-calcopirita ± calcosina (enriquecimiento supergénico) y en menor proporción venas de cuarzo-pirita-molibdenita (Beuchat, 2003; Catchpole et al., 2015a,b). Dataciones Re-Os en molibdenita en vetillas del pórfido cuprífero de Toromocho indican una edad de la mineralización de $7,9 \pm 0,1$ Ma (Beuchat, 2003).
- **Mineralización tipo skarn:** está asociada espacialmente a la gran mayoría de intrusiones que se emplazan a lo largo de los tres centros magmático-hidrotermales (Petersen 1965; Catchpole et al., 2015a; Catchpole et al., 2016). A través de dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en flogopita se pueden diferenciar dos episodios sucesivos de formación de skarn en un periodo de 1,9 Ma. El más antiguo, relacionado con el skarn Codiciada, se formó a partir del intrusivo que lleva el mismo nombre a $8,81 \pm 0,18$ Ma (Figura 3; Kouzmanov et al., 2008; Catchpole et al., 2015a). El más reciente, relacionado con el skarn Porvenir ($7,2 \pm 0,2$ Ma; Beuchat, 2003; Catchpole et al., 2015a) y skarn Gertrudis, asociados al centro Toromocho ($6,9 \pm 0,3$ Ma; Catchpole, 2011; Catchpole et al., 2016). Las dolomitas y calizas dolomíticas del Grupo Pucará son reemplazadas principalmente por exoskarns

magnésicos de serpentina, magnetita, flogopita, tremolita, talco y clorita (Catchpole et al., 2015a; Catchpole et al., 2016). Estos exoskarns magnésicos son los más importantes en volumen en el distrito y albergan una gran parte de la mineralización del pórfido de Toromocho (40% de las reservas anunciadas por Chinalco), así como ciertos cuerpos polimetálicos (Manto Italia) en el área de Codiciada (Catchpole et al., 2016; J. Vallance, comunicación personal). En menor medida, se observan exoskarns cálcicos de andradita-diópsido \pm epidota que forman cuerpos de reemplazamiento en calizas del Grupo Pucará, Grupo Goyllarisquiza y las formaciones Chúlec y Jumasha (Ageneau, 2008; Catchpole et al., 2016). Por otro lado, rocas de endoskarn de grosularia \pm diópsido con escasa presencia de sulfuros (pirita, esfalerita y galena), reemplazaron los intrusivos de Codiciada, Ticlio y Toromocho cerca de las formaciones Chambará y Jumasha (Figura 3; Catchpole et al., 2016).

- **Vetas polimetálicas cordilleranas:** las fallas transversales con dirección ENE a NNE que afectan al Domo de Yauli se encuentran comúnmente mineralizadas y alojan importantes vetas como Andaychagua, Manuelita-Sulfurosa, San Antonio y San Cristóbal (Beuchat, 2003; Catchpole et al., 2015a). Estos sistemas de fallas cortan cuerpos intrusivos, rocas sedimentarias circundantes (Grupo Mitu), cuerpos de pirita y skarns a escala distrital (Catchpole et al., 2011; Catchpole et al., 2015a). Las vetas polimetálicas muestran zonación y se pueden subdividir en tres etapas: la primera etapa está caracterizada por pirita y cuarzo estéril con halo de alteración sericítica. La segunda etapa es rica en sulfuros de Zn-Pb-Ag-Cu (esfalerita, galena, cobres grises, calcopirita, enargita). La tercera etapa final está marcada por abundante cuarzo y rodocrosita (Catchpole et al., 2011; Catchpole et al., 2015a).

- **Mineralización asociada a cuerpos de reemplazamiento:** Los cuerpos de reemplazamiento de carbonato pueden formarse en zonas de contacto de cuerpos intrusivos con lechos de carbonatos, y mantos o cuerpos irregulares, así como en zonas de intersección entre vetas y fallas (Gertrudis y Potosí; Catchpole et al., 2015a). En Morococha, se aprecian cuerpos tubulares en intersecciones de falla situados en el área del borde de la intrusión de San Francisco, proporcionan menas ricas en calcopirita, tetraedrita-tennantita y enargita (Catchpole et al., 2007). Por otro lado, se tiene presencia de cuerpos en las calizas del Grupo Pucará cerca del contacto con el Grupo Mitu. Estos cuerpos son generalmente paralelos a la estratificación y presentan una composición mineralógica con mayor contenido de hematites y barita (Beuchat, 2003). Asimismo, resaltar los cuerpos de Zn-Pb-Ag-Cu descubiertos en el manto Italia, ubicados al interior de la Formación Chambará (Catchpole et al., 2015a). En menor medida, se presentan cuerpos de reemplazamiento al contacto Aramachay/Basalto Montero (J. Vallance, Comunicación personal). Catchpole et al. (2015a) dataron adularia del Manto Italia en $6,0 \pm 0,2$ y $6,23 \pm 0,12$ Ma, edad similar a las obtenidas mediante datación de adularia de la veta polimetálica de Codiciada ($5,78 \pm 0,10$ Ma, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Catchpole et al., 2015a).

4. RESULTADOS

4.1 Mineralogía y texturas

La investigación se centró en las siguientes estructuras mineralizadas del yacimiento de Morococha: Veta Morro Solar, Manto Ivette, Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel y Ramal Alianza. Estas estructuras mineralizadas fueron agrupadas en dos bloques, según su posición (Figura 3) y similitud de secuencias paragenéticas con respecto a los minerales mayoritarios. Un primer bloque conformado por Veta Morro Solar y Manto Ivette, ubicado en la zona de Alapampa (4700 m.s.n.m). Un segundo bloque conformado por Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel y Ramal Alianza (Figuras 4 y 5), ubicado en la zona de Codiciada (4520 m.s.n.m).

4.1.1 Veta Morro Solar y Manto Ivette

La secuencia paragenética de Veta Morro Solar y Manto Ivette puede dividirse en tres estadios: cuarzo-pirita, metales base y carbonatos (Figura 6). El primer estadio, como su nombre indica, está compuesto esencialmente de cuarzo y una 1^{ra} generación de pirita, caracterizada por presentarse en forma de cristales subhedrales a euhedrales individuales y con tamaños de hasta 650 μm (Figura 4A).

El segundo estadio (metales base), se encuentra subdividido en tres sub-etapas: sub-etapa de cuarzo, sub-etapa de Fe-Cu-As-Sn-Zn y sub-etapa de Zn-Pb. La sub-etapa de cuarzo está conformada, además de cuarzo, por una 2^{da} generación de pirita que, a diferencia de la primera generación, se presenta como cristales anhedrales a subhedrales de hasta 500 μm intensamente microfracturados. Además, se observaron trazas de hubnerita (375 μm ; Figura 4B) como inclusiones al interior de la pirita, que posteriormente ha sido reemplazada por carbonatos. La sub-

etapa de Fe-Cu-As-Sn-Zn está compuesta por agregados anhedrales a subhedrales subredondeados de pirita (3^{ra} generación), con inclusiones de pequeños cristales de pirrotina, cubanita, esfalerita, calcopirita, enargita, estibiolumonita-luzonita, tetraedrita, tennantita (var. teluriotennantita), estannoidita (Figura 4E), vinciennita, galena, bornita, digenita, covelita, hodrusita y telurobismutita (Figura 4J), todos ellos a nivel de trazas. La 3^{ra} generación de pirita se encuentra ocasionalmente reemplazada por bravoíta (variedad de pirita rica en Ni), esfalerita, calcopirita (Figura 4C), tetraedrita (var. argentotetraedrita), tennantita y galena, a través de bordes y microfracturas. También se observaron trazas de luzonita-estibiolumonita en bordes de esfalerita, así como trazas de estannoidita (30 μm), vinciennita (62 μm ; Figura 4F), aikinita y tsumoíta en bordes y/o como inclusiones en tennantita-tetraedrita (Figura 4D). En esta sub-etapa, además, se identificaron dos generaciones de esfalerita y calcopirita. La 1^{ra} generación de esfalerita aparece con finas diseminaciones de calcopirita (1^{ra} generación), las cuales por sectores han seguido las direcciones cristalográficas del sulfuro de zinc. La 2^{da} generación de esfalerita no presenta diseminaciones de calcopirita y ha sido reemplazada por agregados de una segunda generación de calcopirita, donde se observaron maclas de transformación que evidencian alta temperatura de formación. Ocasionalmente, la 2^{da} generación de esfalerita presenta bordes con agregados radiales de oropimente con tamaños de hasta 150 μm . Tanto la pirita como la esfalerita y la calcopirita han sido reemplazadas, en menor medida, por tetraedrita-tennantita (450 μm) y galena (500 μm) a través de bordes y microfracturas. La sub-etapa Zn-Pb está representada principalmente por una 3^{ra} generación de esfalerita coliforme (sin diseminaciones de calcopirita y reflexiones internas pardo-rojizas a anaranjadas) y galena, con trazas de tetraedrita-tennantita y calcopirita (Figura 4G).

La última etapa está compuesta por carbonatos ricos en hierro (siderita) así como miembros intermedios de la serie siderita-rodocrosita (manganosiderita), además de cuarzo, yeso y anhidrita.

También se observa galena masiva con inclusiones, a niveles de trazas, de placionita (?) (10 μm ; Figura 4H), smithita (25 μm), hessita (65 μm), petzita (25 μm ; Figura 4K), telurio nativo (7 μm ; Figura 4L), proustita (3 μm) y electro (8 μm ; Figura 4I). Tanto la proustita como el electro aparecen de manera puntual en porosidad de siderita. Los minerales de esta etapa se superponen a las etapas anteriormente descritas.

4.1.1 Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel y Ramal Alianza

La secuencia paragenética de los cuerpos Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel y Ramal Alianza se puede dividir en 4 estadios (Figura 7). El primer estadio se caracteriza por la presencia de pirrotina masiva con alteración a marcasita y pirita (1^{ra} generación) desde sus bordes (Figura 5A-B). El segundo estadio contiene cuarzo, arsenopirita y cristales anhedrales a subhedrales microfracturados de pirita (2^{da} generación; 200 μm).

El tercer estadio, rico en metales base, se subdivide en las siguientes sub-etapas: Fe-Cu-As-Zn y Pb. El primer mineral en precipitar durante la sub-etapa de Fe-Cu-As-Zn es la pirita (3^{ra} generación) en forma de agregados anhedrales a euhedrales con bordes subredondeados y con inclusiones de hematites (var. especularita; Figura 5C), calcopirita, bornita y galena. La pirita ha sido reemplazada por dos generaciones de esfalerita: la 1^{ra} generación aparece con finas diseminaciones de calcopirita (1^{ra} generación; Figura 5D) mientras que la 2^{da} aparece como agregados anhedrales con superficies limpias y reemplazo de una 2^{da} generación de calcopirita, galena y cobres grises (tetraedrita y tennantita; Figura 5E). En la subetapa de Pb se observa una mayor proporción de galena con tamaños de hasta 500 μm , que ha reemplazado a las fases anteriores. La última etapa contiene una gran cantidad de carbonatos (principalmente rodocrosita)

que, de manera puntual, alojan cristales de pirargirita (250µm) y proustita (50µm) en microfracturas (Figura 5F). En menor medida, se detecta la presencia de cuarzo, yeso y anhidrita.

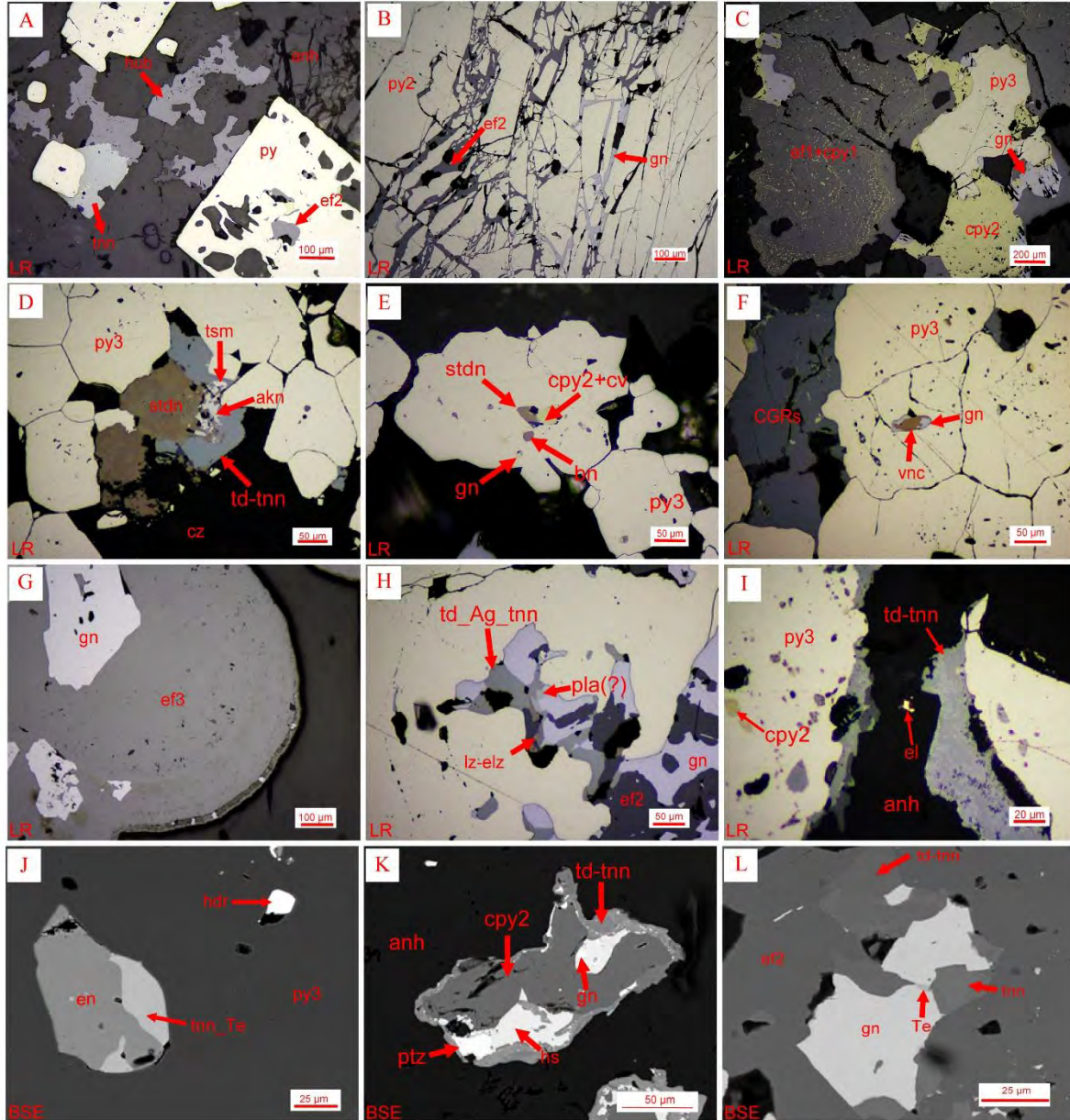


Figura 4: Fotomicrografías de las mineralizaciones polimetálicas en Veta Morro Solar y Manto Ivette. (A) Cristales de hubnerita y pirita (1^{ra} generación) en cuarzo/anhidrita y, reemplazados por tennantita desde sus bordes. Además, cristal de pirita con porosidad rellena por esfalerita (2^{da} generación). (B) Pirita microfracturada (2^{da} generación) rellena de esfalerita (2^{da} generación) y galena. (C) Cristales de pirita reemplazados por galena, esfalerita (1^{ra} generación) con finas disseminaciones de calcopirita (1^{ra} generación) y una segunda generación de calcopirita. (D) Cobre grises (tetradrita-tennantita) con inclusiones de pequeños cristales de estannoidita, aikinita y tsumoíta que de manera conjunta han reemplazado a la pirita desde sus bordes. (E) Estannoidita, calcopirita (2^{da} generación), bornita, galena y covelita como inclusiones en pirita (subetapa Fe-Cu-As-Sn). (F) Pirita con inclusión de vinciennita + galena. (G) Esfalerita (3^{ra} generación) en agregados coliformes reemplazados por galena. (H) Escasos cristales de

luzonita-estibiolumonita y plagionita en contacto con cobres grises (argentotetraedrita-tennantita) y galena. (I) Trazas de electrum y proustita en siderita. (J) Hodrusita, teluriotennantita y enargita como inclusiones en pirita. (K) Hessita, petzita y galena como reemplazo cobres grises (tetraedrita-tennantita) y calcopirita (2^{da} generación). (L) Trazas de telurio nativo en galena y en contacto con tennantita. Abreviaturas: akn = aikinita; anh = anhidrita; bn = bornita; brv = bravoita; CGRs = cobres grises (tetraedrita-tennantita); cpy = calcopirita; cv = covelita; cz = cuarzo; ef = esfalerita; el = electrum; en = enargita; gn = galena; hdr = hodrusita; hs = hessita; hub = hubnerita; lz-elz = luzonita-estibiolumonita; pla = plagionita (?); ptz = petzita; py = pirita; stdn = estannoidita; td-tnn = tetraedrita-tennantita; Te = telurio nativo; tnn = tennantita; tnn_Te = teluriotennantita; tsm = tsumoíta; vnc = vinciennita; LR = luz reflejada; BSE = imagen en electrones retrodispersados.

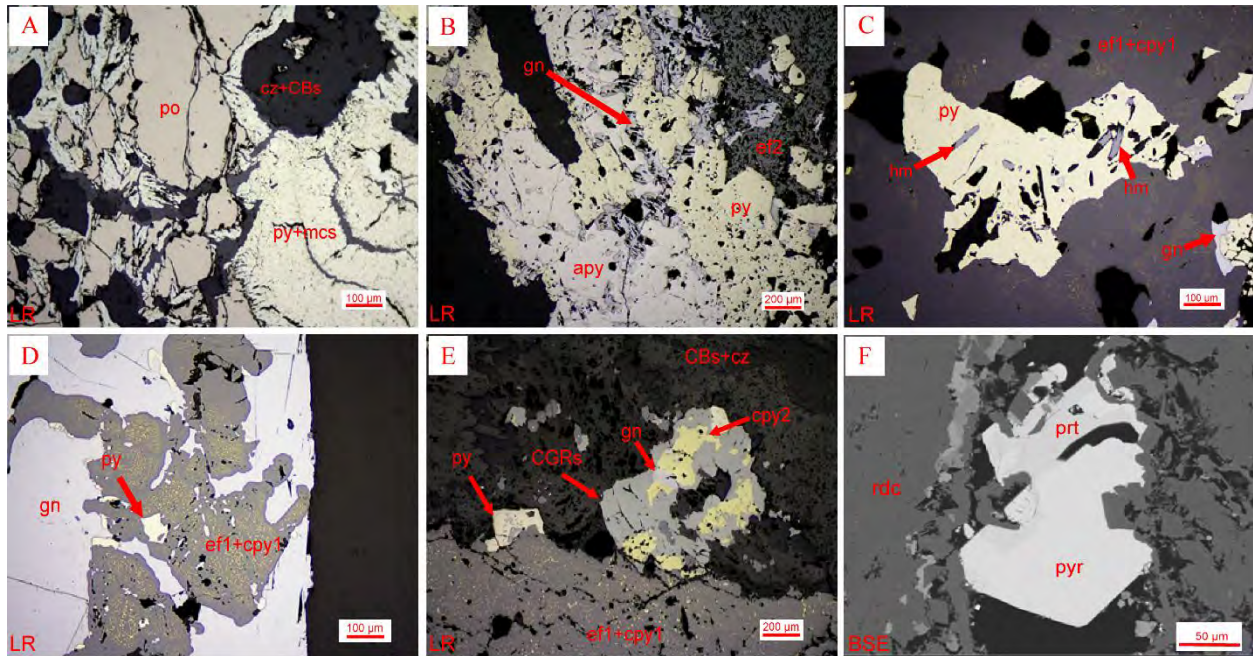


Figura 5: Fotomicrografías de las mineralizaciones polimetálicas en Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel y Ramal Alianza (A) Pirrotina masiva con alteración a marcasita + pirita. (B) Agregados de pirita y arsenopirita reemplazados por esfalerita (2^{da} generación) y galena. (C) Escasos cristales de hematites (var. especularita) incluidos en pirita. (D) Esfalerita (1^{ra} generación) con finas diseminaciones de calcopirita (1^{ra} generación) reemplazado por galena y con oclusión de pirita. (E) Cristal de pirita reemplazado por esfalerita (1) con diseminaciones de calcopirita (1^{ra} generación) y está a su vez por calcopirita (2^{da} generación) y cobres grises. (F) Cristales anhedrales de pirargirita y proustita en microfractura de rodocrosita. Abreviaturas: apy = arsenopirita; CBS = carbonatos; CGRs = cobres grises (tetraedrita-tennantita); cpy = calcopirita; cz = cuarzo; ef = esfalerita; gn = galena; hm = hematita; po = pirrotina; prt = proustita; py = pirita; pyr = pirargirita; LR = luz reflejada; BSE = imagen en electrones retrodispersados.

Secuencia paragenética del Veta Morro Solar/Manto Ivette						
		Estadio cuarzo-pirita	Sub-etapa de Qz	Estadio metales base Sub-etapa de Fe-Cu-Zn-As-Sn	Sub-etapa de Zn-Pb	Estadio carbonatos
Cuarzo		SiO ₂	—————			
Hubnerita		MnWO ₄	.....		
Arsenopirita		FeAsS	.....		
Pirita		FeS ₂	—————			
Pirrotina (inclusión)		Fe _{1-x} S		....	
Cubanita (inclusión)		CuFe ₂ S ₃		....	
Esfalerita (inclusión)		ZnS		...		
Calcopirita (inclusión)		CuFeS ₂		....	
Enargita (inclusión)		Cu ₃ As ₄ S ₄			....
Estibiolumonita-Luzonita (inclusión)		Cu ₃ (As,Sb) ₄ S ₄		....	
Tetraedrita (inclusión)		Cu ₁₂ (Sb) ₄ S ₁₃		....	
Tennantita (Teluriotennantita) (inclusión)		Cu ₁₂ (As,Te) ₄ S ₁₃		....	
Estanoïdita (inclusión)		Cu ₈ Fe ₃ Sn ₂ S ₁₂			....
Vinciennita (inclusión)		Cu ₁₀ Fe ₄ Sn(As,Sb) ₆ S ₁₆			....
Galena (inclusión)		PbS			....
Bornita (inclusión)		Cu ₅ FeS ₄			....
Digenita (inclusión)		Cu ₉ S ₅			....
Covelita (inclusión)		CuS			....
Hodrusita (inclusión)		Cu ₈ Bi ₁₂ S ₂₂			....
Telurobismutita (inclusión)		Bi ₂ Te ₃		hasta 0.53 wt.% In	....
Esfalerita		ZnS		—————	.....
Calcopirita		CuFeS ₂		.....	
Estibiolumonita-luzonita		Cu ₃ (As,Sb) ₄ S ₄		....	
Tetraedrita		(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃		—————		
Tennantita		(Cu,Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃		—————		
Serie Tetraedrita-Tennantita		(Cu,Fe) ₁₂ (As,Sb) ₄ S ₁₃		—————		
Estanoïdita		Cu ₈ Fe ₃ Sn ₂ S ₁₂		....	
Vinciennita		Cu ₁₀ Fe ₄ Sn(As,Sb) ₆ S ₁₆		....	
Galena		PbS			—————	
Aikinita		PbCuBiS ₃				....
Tsumoita		BiTe				....
Plagionita (?)		Pb ₅ Sb ₈ S ₁₇				....
Smithita (?)		Ag ₃ As ₂ S ₂				....
Proustita		Ag ₃ As ₃ S ₃				....
Hessita		Ag ₂ Te				....
Petzita		Ag ₃ AuTe ₂				....
Telurio nativo		Te				....
Electrum		(Au, Ag)				....
Oropimente		As ₂ S ₃				—
Siderita/Manganosiderita		FeCO ₃ /(Fe,Mn)CO ₃				—————

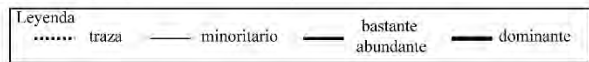


Figura 6: Paragénesis mineral generalizada de Veta Morro Solar y Manto Ivette. El ancho de las barras se correlaciona con la abundancia relativa de los minerales enumerados. La ubicación de las fases o generaciones que producen concentraciones destacadas de In o Ga se indican en color.

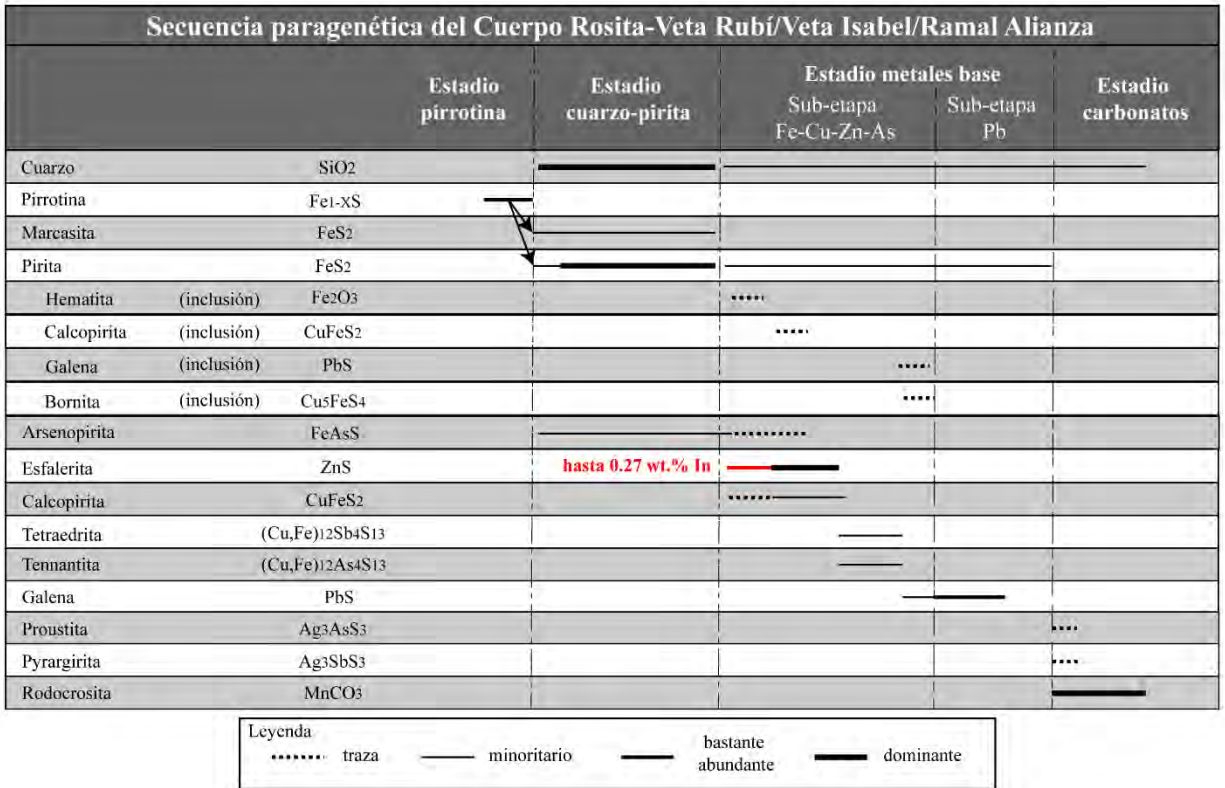


Figura 7: Paragénesis mineral generalizada de Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel y Ramal Alianza. El ancho de las barras se correlaciona con la abundancia relativa de los minerales enumerados.



4.2 Geoquímica mineral

4.2.1 Esfalerita

La Tabla 2 contiene un cuadro resumen con las composiciones de los granos de esfalerita analizados. En las Tablas 3 y 4 se presentan análisis representativos de las diferentes vetas y cuerpos polimetálicos estudiados. Los resultados de geoquímica mineral de la esfalerita reflejan un espectro composicional relativamente estrecho para la mayoría de los elementos. A manera de ejemplo, se aprecian concentraciones de Fe que oscilan entre valores por debajo de su límite de detección (<l.d.; ver Tabla 1 para los límites de detección) y 7,93 wt.%, Cu entre <l.d. y 5,14 wt.%, Sn entre <l.d. y 2,80 wt.% y Cd entre <l.d. y 0,71 wt.%. Con respecto a las concentraciones de los subproductos potenciales (metales estratégicos), sólo el In muestra valores por encima de su límite de detección (hasta 0,53 wt.%). En cambio, las concentraciones de Ga y Ge no superan sus respectivos límites de detección.

Tabla 2: Resumen de la concentración de los elementos en la esfalerita del yacimiento de Morococha (datos de microsonda electrónica).

Wt%		S	Zn	Fe	Cu	Sn	Pb	Sb	As	Cd	Ag	In	Ge	Ga
Límite de detección		0.07	0.07	0.05	0.06	0.05	0.018	0.12	0.44	0.06	0.05	0.10	0.10	0.23
Yacimiento de Morococha (n = 439)	Mínimo	31.87	52.58	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	34.56	68.39	7.93	5.14	2.80	2.31	0.41	0.95	0.71	0.13	0.53	<l.d.	<l.d.
	Promedio	33.26	65.37	1.01	0.18	0.02	0.09	0.02	0.03	0.17	0.00	0.02	-	-
Morro Solar (n = 99)	Mínimo	32.07	63.99	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	34.26	67.84	1.06	0.85	0.21	0.39	0.24	0.83	0.31	0.07	0.53	<l.d.	<l.d.
	Promedio	33.21	66.11	0.18	0.16	0.01	0.05	0.01	0.06	0.09	0.00	0.06	-	-
Manto Ivette (n = 189)	Mínimo	31.87	52.58	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	34.41	68.39	5.79	5.14	0.36	2.31	0.41	0.95	0.71	0.13	0.39	<l.d.	<l.d.
	Promedio	33.19	65.74	0.69	0.16	0.01	0.13	0.02	0.02	0.18	0.01	0.01	-	-
Cuerpo Rosita/Veta Rubí (n = 113)	Mínimo	32.22	59.48	0.09	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	34.56	67.47	4.96	3.07	2.80	0.45	0.38	0.87	0.42	0.09	0.18	<l.d.	<l.d.
	Promedio	33.25	64.65	1.65	0.21	0.05	0.06	0.02	0.01	0.22	0.00	0.01	-	-
Veta Isabel (n = 20)	Mínimo	32.85	56.96	0.19	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.16	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	34.00	67.96	4.31	4.43	<l.d.	0.30	<l.d.	<l.d.	0.31	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Promedio	33.57	65.78	0.96	0.35	-	0.05	-	-	0.25	-	-	-	-
Ramal Alianza (n = 18)	Mínimo	33.45	60.08	2.23	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.11	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	34.45	63.66	7.93	1.87	0.11	0.55	0.23	0.63	0.29	<l.d.	0.27	<l.d.	<l.d.
	Promedio	33.97	62.04	4.78	0.15	0.01	0.08	0.02	0.03	0.20	-	0.02	-	-

l.d.: Límite de detección; <l.d. = Debajo del límite de detección.

Tabla 3: Análisis representativos de esfalerita en el yacimiento de Morococha, incluyendo composición química y fórmula estructural normalizada a S = 1. Límites de detección en la Tabla 1 (datos de microsonda electrónica).

Estilo de mineralización	Cuerpos de reemplazamiento					
	Grupo	Morro Solar			Manto Ivette	
Muestras	01-SPA	03-SPC	06-SPA	10-SPA	10-SPA	011-SP
S (wt.%)	B-2	C-2	B-1	A-3	C-2	B-1
	33.21	33.35	33.98	33.28	32.95	32.1
Zn	65.66	64.63	65.04	66.67	67.8	65.88
Fe	0.41	0.4	0.87	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Cu	0.28	0.54	0.85	0.25	0.08	0.39
Sn	0.05	0.13	0.21	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Pb	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.25	<l.d.	0.25
Sb	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
As	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Cd	0.12	0.13	0.08	0.14	0.17	0.71
Ag	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
In	0.38	0.53	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Ge	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Ga	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Total	100.12	99.71	101.04	100.69	101.00	99.32
S (a.p.f.u)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Zn	0.97	0.95	0.939	0.984	1.009	1.006
Fe	0.007	0.007	0.015	-	-	-
Cu	0.004	0.008	0.013	0.004	0.001	0.006
Sn	0.0004	0.001	0.002	-	-	-
Pb	-	-	-	0.001	-	0.001
Sb	-	-	-	-	-	-
As	-	-	-	-	-	-
Cd	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.006
Ag	-	-	-	-	-	-
In	0.003	0.004	-	-	-	-
Ge	-	-	-	-	-	-
Ga	-	-	-	-	-	-

a.p.f.u.: átomos por fórmula unidad; <l.d.: debajo del límite de detección.

Tabla 4: Análisis representativos de esfalerita en el yacimiento de Morococha, incluyendo composición química y fórmula estructural normalizada a S = 1. Límites de detección en la Tabla 1 (datos de microsonda electrónica).

Estilo de mineralización	Vetas polimetálicas					
	Grupo	Cuerpo Rosita/Veta Rubí		Veta Isabel		Ramal Alianza
Muestras	029-SPB	036-SP	031-SPA	032-SP	039-SPA	039-SPB
	B-2	C-1	A-1	C-1	E-2	E-1
S (wt.%)	33.23	33.44	33.81	33.67	34.02	34.30
Zn	65.35	65.04	56.96	66.25	60.92	58.04
Fe	0.52	3.04	4.31	0.25	5.75	7.93
Cu	0.28	0.54	4.43	0.13	<l.d.	<l.d.
Sn	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Pb	<l.d.	<l.d.	0.29	0.24	0.34	<l.d.
Sb	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.23	<l.d.
As	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Cd	0.23	0.09	0.23	0.30	0.18	0.17
Ag	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
In	0.18	0.14	<l.d.	<l.d.	0.27	<l.d.
Ge	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Ga	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Total	99.79	102.29	100.02	100.84	101.71	100.44
S (a.p.f.u)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Zn	0.96	0.95	0.83	0.96	0.88	0.83
Fe	0.01	0.05	0.07	0.01	0.10	0.13
Cu	0.001	-	0.066	0.001	-	-
Sn	-	-	-	-	-	-
Pb	-	-	0.001	0.001	0.001	-
Sb	-	-	-	-	0.001	-
As	-	-	-	-	-	-
Cd	0.002	0.001	0.002	0.003	0.002	0.002
Ag	-	-	-	-	-	-
In	0.002	0.001	-	-	0.002	-
Ge	-	-	-	-	-	-
Ga	-	-	-	-	-	-

a.p.f.u.: átomos por fórmula unidad; <l.d.: debajo del límite de detección.

En la Tabla 5 se muestran las variaciones composicionales de los granos de esfalerita según generación y estilo de mineralización. Los cristales de esfalerita de la Veta Morro Solar presentan contenidos de Fe de hasta 1,06 wt.%, en Manto Ivette de hasta 5,79 wt.%, en Cuerpo Rosita/Veta Rubí de hasta 4,96 wt.%, en Veta Isabel de hasta 4,31 wt.% y en Ramal Alianza de hasta 7,93 wt.%.

Asimismo, las muestras de Veta Morro Solar presentan la concentración máxima de In (de hasta 0,53 wt.%). Manto Ivette alcanza concentraciones de In de hasta 0,39 wt.% en esfalerita de primera generación. En menor medida, los granos de esfalerita asociados con las mineralizaciones de Cuerpo Rosita/Veta Rubí y Ramal Alianza alcanzan contenidos de In de hasta 0,18 wt.% y 0,27 wt.%, respectivamente. Veta Isabel, presenta valores de In por debajo de su límite de detección.

La concentración de Cd en los granos de esfalerita analizados es variable. En Veta Morro Solar, los contenidos de Cd alcanzan valores de hasta 0,31 wt.%. En Manto Ivette, el contenido de Cd se incrementa en las generaciones de esfalerita más tardías: los valores de Cd en una primera, segunda y tercera generación de esfalerita alcanzan concentraciones de hasta 0,36, 0,42 y 0,71 wt.%, respectivamente. Por el contrario, los granos de esfalerita en Cuerpo Rosita/Veta Rubí presentan una disminución de las concentraciones de Cd en las generaciones más tardías: en una primera generación alcanza concentraciones de hasta 0,42 wt.% Cd y en una segunda generación, de hasta 0,34 wt.% Cd. De manera similar, en Ramal Alianza las concentraciones de Cd son más elevadas en una primera generación de esfalerita (hasta 0,29 wt.%) que en una segunda generación (hasta 0,22 wt.%).

Tabla 5: Resumen de la concentración de las diversas generaciones elementales de esfalerita en el yacimiento de Morococha (datos de microsonda electrónica).

Wt%		S	Zn	Fe	Cu	Sn	Pb	Sb	As	Cd	Ag	In	Ge	Ga
Límite de detección		0.07	0.07	0.05	0.06	0.05	0.018	0.12	0.44	0.06	0.05	0.10	0.10	0.23
Morro Solar (n = 99)	ef2	Mínimo	32.07	63.99	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.
		Máximo	34.26	67.84	1.06	0.85	0.21	0.39	0.24	0.83	0.31	0.07	0.53	<1.d.
		Promedio	33.21	66.11	0.18	0.16	0.01	0.05	0.01	0.06	0.09	0.00	0.06	-
Manto Ivette (n = 190)	ef1	Mínimo	32.50	52.58	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	0.12	<1.d.	<1.d.	<1.d.
		Máximo	34.41	67.39	3.79	5.14	0.25	0.39	0.12	<1.d.	0.36	0.06	0.39	<1.d.
		Promedio	33.29	64.58	1.12	0.30	0.02	0.06	0.00	-	0.25	0.00	0.01	-
	ef2	Mínimo	32.00	59.87	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.
		Máximo	33.85	68.39	5.79	0.98	0.36	0.42	0.36	<1.d.	0.42	0.13	0.21	<1.d.
		Promedio	33.21	66.23	0.55	0.09	0.01	0.08	0.02	-	0.15	0.01	0.01	-
ef3	Mínimo	31.87	64.64	<1.d.	<1.d.	<1.d.	0.25	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	
	Máximo	32.65	67.63	0.22	0.41	<1.d.	2.31	0.41	0.95	0.71	<1.d.	<1.d.	<1.d.	
	Promedio	32.29	66.24	0.04	0.13	-	1.21	0.16	0.48	0.08	-	-	-	
Cuerpo Rosita/Veta Rubí (n = 113)	ef1	Mínimo	32.22	59.48	0.23	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	0.10	<1.d.	<1.d.	<1.d.
		Máximo	34.56	67.04	4.96	3.07	2.80	0.39	0.22	<1.d.	0.42	0.09	0.18	<1.d.
		Promedio	33.26	64.42	1.56	0.49	0.12	0.05	0.02	-	0.25	0.00	0.01	-
	ef2	Mínimo	32.55	59.99	0.09	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.
		Máximo	34.44	67.47	4.75	0.92	0.09	0.45	0.38	0.87	0.34	0.05	0.14	<1.d.
		Promedio	33.24	64.79	1.70	0.03	0.00	0.07	0.02	0.02	0.21	0.00	0.00	-
Veta Isabel (n = 20)	ef1	Mínimo	32.85	56.96	0.37	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	0.23	<1.d.	<1.d.	<1.d.
		Máximo	34.00	65.53	4.31	4.43	<1.d.	0.29	<1.d.	<1.d.	0.31	<1.d.	<1.d.	<1.d.
		Promedio	33.46	63.73	1.75	0.75	-	0.03	-	-	0.28	-	-	-
	ef2	Mínimo	33.37	66.25	0.19	<1.d.	<1.d.	0.00	<1.d.	<1.d.	0.16	<1.d.	<1.d.	<1.d.
		Máximo	33.94	67.96	0.69	0.13	<1.d.	0.30	<1.d.	<1.d.	0.31	<1.d.	<1.d.	<1.d.
		Promedio	33.66	67.45	0.32	0.02	-	0.07	-	-	0.23	-	-	-
Ramal Alianza (n = 18)	ef1	Mínimo	33.45	60.60	2.23	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	0.11	<1.d.	<1.d.	<1.d.
		Máximo	34.30	63.66	6.14	1.87	0.11	0.40	0.23	0.63	0.29	<1.d.	0.27	<1.d.
		Promedio	33.91	62.17	4.42	0.21	0.01	0.07	0.04	0.06	0.20	-	0.03	-
	ef2	Mínimo	33.60	58.04	3.64	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	<1.d.	0.16	<1.d.	<1.d.	<1.d.
		Máximo	34.45	63.20	7.93	0.11	0.06	0.55	<1.d.	<1.d.	0.22	<1.d.	<1.d.	<1.d.
	Promedio	34.09	61.36	5.28	0.04	0.01	0.09	-	-	0.19	-	-	-	

<1.d.: debajo del límite de detección.

En la Figura 8, la composición de los granos de esfalerita del yacimiento de Morococha es representada en términos de Zn+Fe+Cd+Mn – Cu+Ag – Sn+In junto con el sistema ternario esfalerita-stannita-roquesita. Una gran proporción de las muestras analizadas se ubican en o cerca del eje Zn + Fe + Cd + Mn, correspondiente a la composición esperada para una esfalerita “pura” en términos de los tres valores representados en los ejes. Sin embargo, se debe resaltar que las diversas generaciones de esfalerita pertenecientes a los diferentes cuerpos polimetálicos muestran composiciones con cierta tendencia en dirección de la línea de conexión entre esfalerita-calcopirita (posible influencia de análisis mixtos esfalerita – calcopirita debido a finas disseminaciones del segundo dentro del primero) y, en menor medida, en dirección de la línea de conexión esfalerita-stannita (particularmente en granos de Veta Morro Solar y Cuerpo Rosita/Veta Rubí). En cambio, no se observan puntos claramente alineados en la línea de conexión entre esfalerita – roquesita probablemente debido al límite de detección relativamente elevado del método de análisis empleado (EPMA).

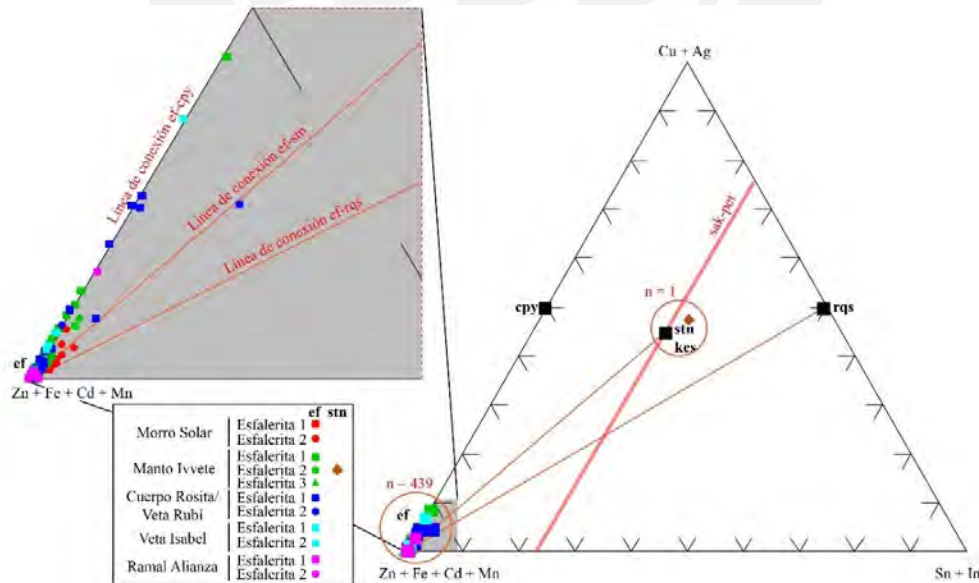


Figura 8: Gráfico de los granos de esfalerita analizados en el yacimiento de Morococha en el diagrama ternario Zn + Fe + Cd + Mn vs. Cu + Ag vs. Sn + In. La composición teórica de algunos minerales también fue representada, incluyendo calcopirita (cpy), kesterita (kes), roquesita (rqs), esfalerita (ef) y stannita (stn). La variación composicional de sakuraiita (sak)-petrukita (pet) se muestra con una línea roja.

Las concentraciones atómicas de Zn y Fe muestran una correlación negativa en la esfalerita (Figura 9A), apreciándose que la gran mayoría de los análisis se ubican a lo largo de la línea $Zn + Fe = 1$ a.p.f.u. (átomo por fórmula unidad), sugiriendo una sustitución simple entre ambos elementos. Las concentraciones de Cu y Sn vs Zn muestran patrones similares, con enriquecimiento en ambos elementos en esfalerita pobre en Fe (Figura 9B y 9C). Dichas tendencias se observaron principalmente en las muestras del Manto Ivette y del Cuerpo Rosita/Veta Rubí. Se aprecia que las concentraciones atómicas de Cu y Fe presentan correlación positiva (Figura 9D), lo que soporta la existencia de análisis mixtos de esfalerita – calcopirita como resultado de finas diseminaciones de calcopirita en esfalerita (textura conocida como calcopiritosis).

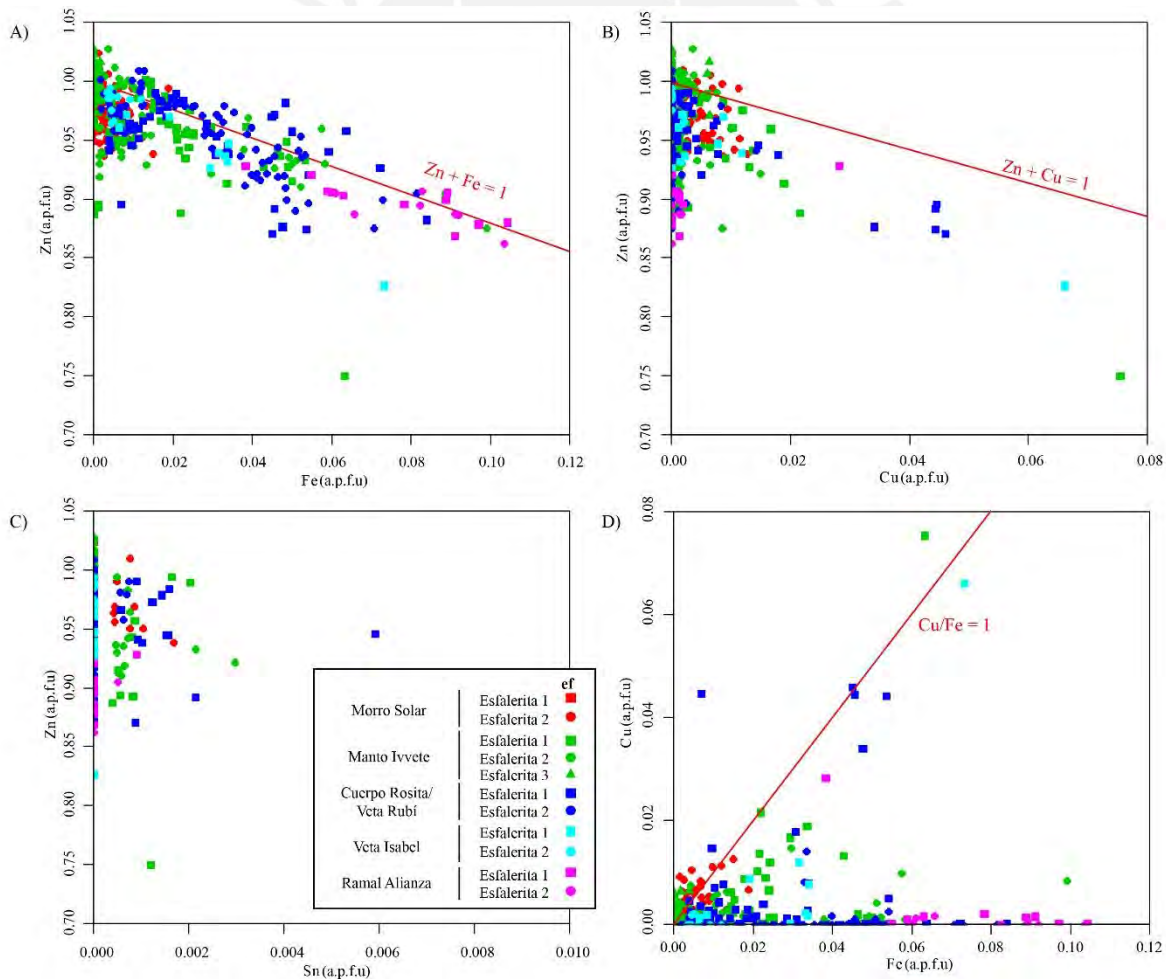


Figura 9: Diagramas binarios con correlaciones entre los diversos elementos presentes en la esfalerita del yacimiento de Morococha (a.p.f.u.: átomos por fórmula unidad).

Las concentraciones más altas de In se dan en granos de esfalerita con concentraciones de Fe menores a 0.02 a.p.f.u., y no se observan correlaciones entre las concentraciones atómicas de estos elementos (Figura 10A-B). En el diagrama Cu vs In (Figura 10C), los análisis de esfalerita se ubican a lo largo de la línea Cu/In = 1 (proporciones atómicas) o a proporciones ligeramente superiores a ésta. Por el contrario, la gráfica Sn vs In (Figura 10D) nos muestra la inexistencia de una correlación entre las concentraciones atómicas de estos elementos.

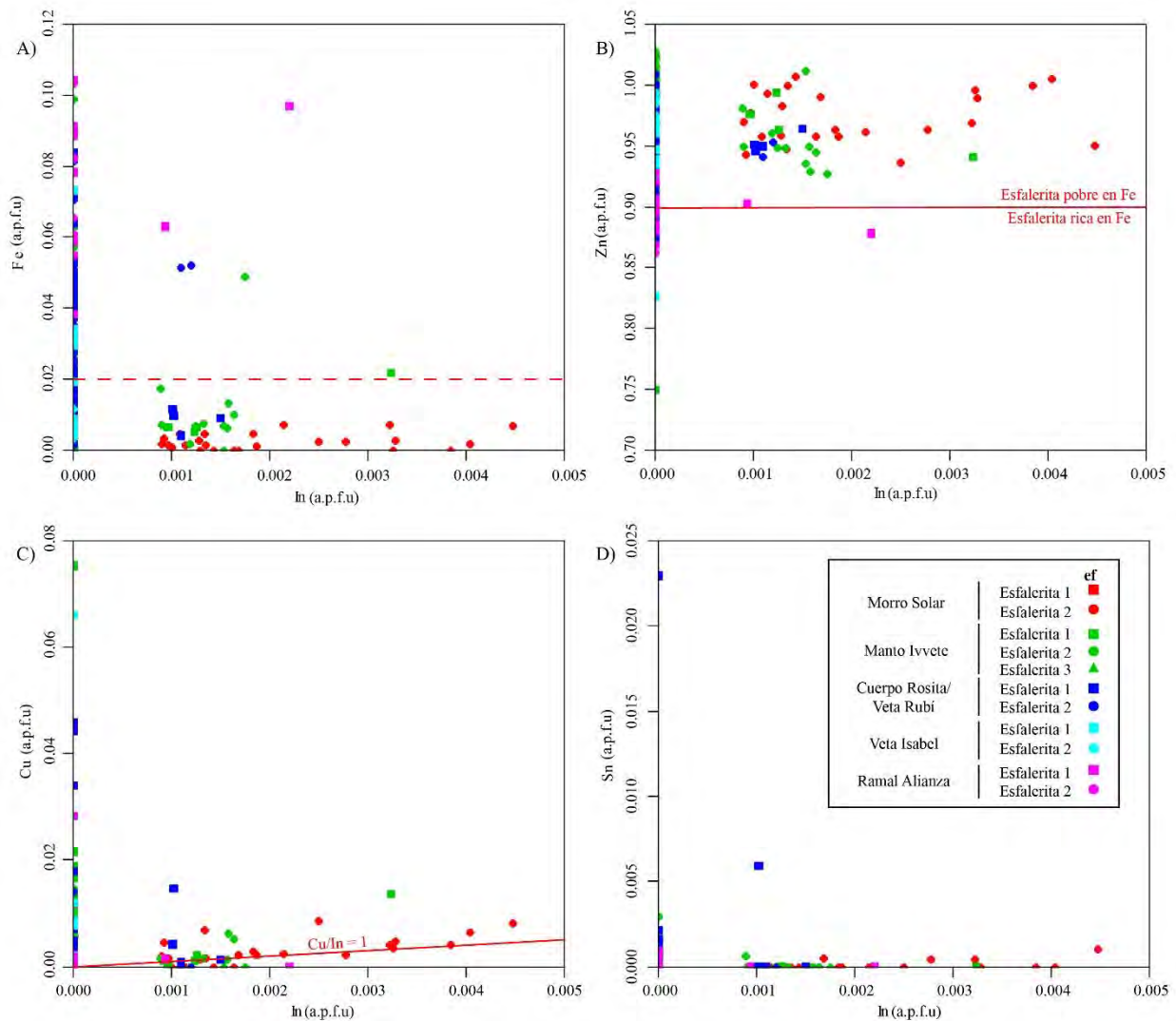


Figura 10: Correlación entre In y otros elementos en esfalerita del yacimiento de Morococha.

4.2.2 Galena

En la Tabla 6 se muestran los análisis realizados en cristales de galena del yacimiento de Morococha. La concentración de Pb presente en las muestras es casi constante, oscilando entre valores de 85.05 y 90.36 wt.%. Los contenidos de Sb oscilan entre <l.d. y 0.76 wt.%, y los de Ag se encuentran entre <l.d. y 0.50 wt.%. Las concentraciones de In y Ge alcanzan concentraciones puntuales por encima de sus límites de detección, con valores máximos de 0.26 y 0.20 wt.%, respectivamente. Los valores de Ga son sistemáticamente <l.d.

Tabla 6: Resumen de la composición de galena del yacimiento de Morococha (datos de microsonda electrónica).

Wt%		S	Zn	Fe	Cu	Sn	Pb	Sb	As	Cd	Ag	In	Ge	Ga
Limite de detección		0.07	0.07	0.05	0.06	0.05	0.018	0.12	0.44	0.06	0.05	0.10	0.10	0.23
Yacimiento de Morococha (n = 65)	Mínimo	11.96	0.00	<l.d.	<l.d.	<l.d.	85.05	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	13.59	1.23	<l.d.	0.62	<l.d.	90.36	0.76	0.47	0.10	0.50	0.26	0.20	<l.d.
	Promedio	13.11	0.08	-	0.01	-	87.53	0.12	0.01	0.01	0.04	0.02	0.06	-
Morro Solar (n = 4)	Mínimo	11.96	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	85.17	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	13.59	1.05	<l.d.	0.62	<l.d.	88.95	0.76	<l.d.	0.07	0.25	0.18	0.20	<l.d.
	Promedio	13.06	0.05	-	0.03	-	87.23	0.13	-	0.01	0.03	0.02	0.05	-
Manto Ivette (n = 23)	Mínimo	12.77	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	86.09	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	13.50	1.23	<l.d.	<l.d.	<l.d.	88.79	0.40	<l.d.	0.09	0.50	0.26	0.20	<l.d.
	Promedio	13.13	0.08	-	-	-	87.45	0.10	-	0.01	0.05	0.03	0.07	-
Cuerpo Rosita/Veta Rubí (n = 36)	Mínimo	12.50	0.00	<l.d.	<l.d.	<l.d.	85.05	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	13.59	1.05	<l.d.	0.08	<l.d.	90.36	0.76	0.47	0.10	0.30	0.15	0.19	<l.d.
	Promedio	13.12	0.08	-	0.00	-	87.56	0.15	0.01	0.00	0.04	0.01	0.06	-
Veta Isabel (n = 2)	Mínimo	13.15	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	88.95	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	13.22	0.8958	<l.d.	<l.d.	<l.d.	89.59	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.1963	<l.d.	0.11	<l.d.
	Promedio	13.185	0.4479	-	-	-	89.27	-	-	-	0.0982	-	0.05	-

<l.d.: debajo del límite de detección

4.2.3 Calcopirita

La Tabla 7 presenta un cuadro con la composición de los granos de calcopirita analizados en el yacimiento de Morococha. La concentración de Cu en las muestras presenta un valor que oscila entre 33,44 y 35,15 wt.%. Los valores de Fe varían entre 28,48 y 30,60 wt.%. La concentración de In es de hasta 0,23 wt.% y la de Ge, de hasta 0,11 wt.%.

Tabla 7: Resumen de la concentración de la composición de calcopirita del yacimiento de Morococha (datos de microsonda electrónica).

Wt%		S	Zn	Fe	Cu	Sn	Pb	Sb	As	Cd	Ag	In	Ge	Ga
Límite de detección		0.07	0.07	0.05	0.06	0.05	0.018	0.12	0.44	0.06	0.05	0.10	0.10	0.23
Yacimiento de Morococha (n = 41)	Mínimo	34.47	<l.d.	28.48	33.44	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	35.86	2.98	30.60	35.15	0.13	0.32	0.12	0.72	<l.d.	0.06	0.23	0.11	<l.d.
	Promedio	35.18	0.48	29.87	34.34	0.02	0.08	0.00	0.04	-	0.00	0.02	0.01	-
Morro Solar (n = 10)	Mínimo	34.96	<l.d.	30.01	33.44	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	35.58	0.28	30.47	33.96	0.06	0.28	0.12	0.72	<l.d.	<l.d.	0.23	<l.d.	<l.d.
	Promedio	35.31	0.06	30.22	33.82	0.01	0.09	0.01	0.18	-	-	0.09	-	-
Manto Ivette (n = 20)	Mínimo	34.47	<l.d.	28.48	33.91	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	35.72	2.98	30.48	35.15	0.09	0.32	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0.06	<l.d.	0.11	<l.d.
	Promedio	35.06	0.81	29.61	34.50	0.01	0.07	-	-	-	0.00	-	0.01	-
Cuerpo Rosita/Veta Rubí (n = 4)	Mínimo	34.68	0.15	29.23	33.83	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	35.86	0.99	30.60	34.77	0.08	0.19	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Promedio	35.10	0.46	29.80	34.34	0.02	0.05	-	-	-	-	-	-	-
Veta Isabel (n = 3)	Mínimo	35.06	0.1033	29.89	33.55	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	35.58	0.3366	30.29	35.03	0.125	0.22	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Promedio	35.28	0.2105	30.107	34.46	0.041	0.07	-	-	-	-	-	-	-
Ramal Alianza (n = 4)	Mínimo	35.21	0	29.9	34.60	0	0	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	35.66	0.1974	30.45	34.82	0.087	0.31	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Promedio	35.488	0.1219	30.223	34.74	0.022	0.15	-	-	-	-	-	-	-

<l.d.: debajo del límite de detección

4.2.4 Cobres grises

En la Tabla 8 se muestra un cuadro resumen de las concentraciones elementales presentes en los cobres grises (minerales del grupo de la tetraedrita) del yacimiento de Morococha. Los cristales analizados pertenecen a la serie tetraedrita-tennantita $[(Cu, Fe)_{12}(As, Sb)_4S_{13}]$ (ver diagrama ternario $Ag_2S - Cu_2S - Sb_2S_3 + As_2S_3$ en Figura 11). Los cobres grises pertenecientes a Veta Morro Solar y Manto Ivette alcanzan contenidos de Ag de hasta 1,48 wt.% y 2,26 wt.%, respectivamente. En granos de Cuerpo Rosita/Veta Rubí, las concentraciones de Ag alcanzan valores de hasta 18,12 wt.%. En el diagrama binario $Ag/(Ag + Cu)_{at}$ vs $As/(As + Sb)_{at}$ de la Figura 11 se aprecia que, de forma mayoritaria, los cobres grises analizados en Veta Morro Solar y Manto Ivette se clasifican como tennantita (valores de As que oscilan entre 17.91 wt.% y 22.76 wt.%). En contraste, los cobres grises analizados de Cuerpo Rosita/Veta Rubí se clasifican como tetraedrita (valores de Sb que oscilan entre 15.38 wt.% y 24.65 wt.%). Las concentraciones de In, Ge y Ga en cobres grises no superaron sus respectivos límites de detección.

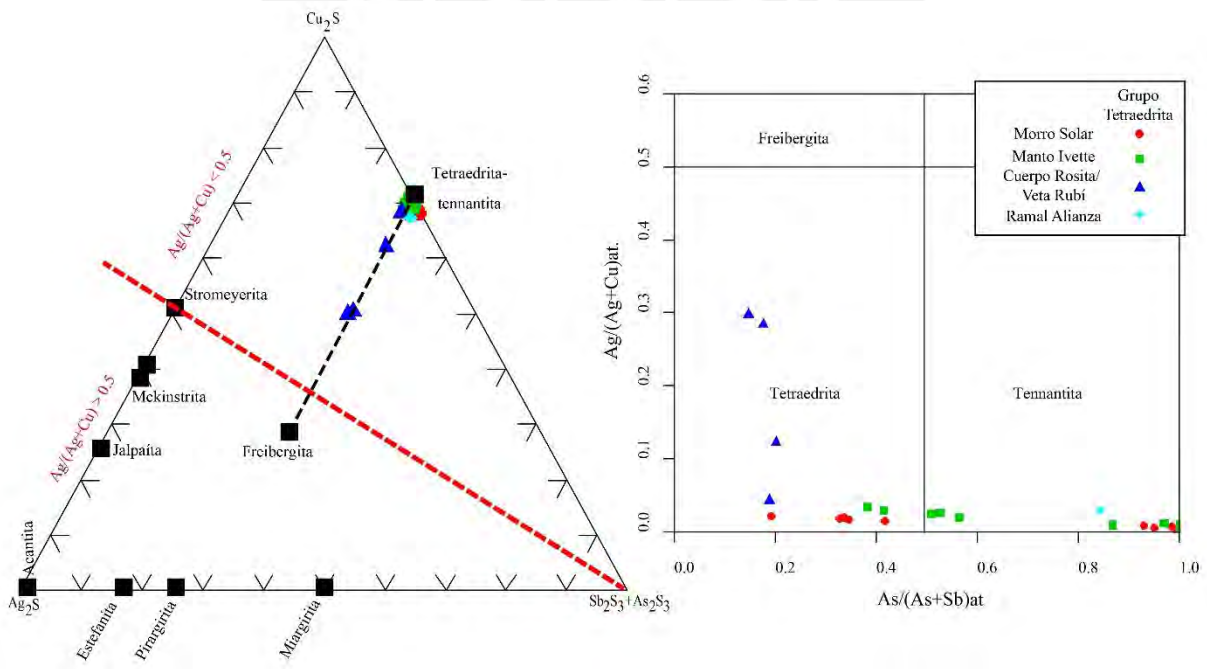
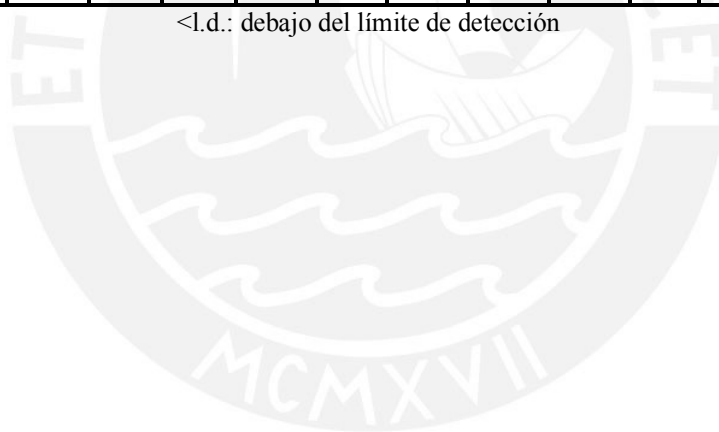


Figura 11: Composición de los cristales de cobres grises analizados del yacimiento de Morococha en el diagrama ternario $Ag_2S - Cu_2S - Sb_2S_3 + As_2S_3$ y el diagrama binario $Ag/(Ag + Cu)_{at}$ vs $As/(As + Sb)_{at}$.

Tabla 8: Resumen de la composición de minerales de los cobres grises del yacimiento de Morococha (datos de microsonda electrónica).

Wt%		S	Zn	Fe	Cu	Sn	Pb	Sb	As	Cd	Ag	In	Ge	Ga
Límite de detección		0.07	0.07	0.05	0.06	0.05	0.018	0.12	0.44	0.06	0.05	0.10	0.10	0.23
Yacimiento de Morococha (n = 27)	Mínimo	23.36	2.05	0.16	25.19	<l.d.	<l.d.	<l.d.	2.52	<l.d.	0.06	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	29.04	8.37	5.92	43.10	0.08	0.29	24.65	22.76	0.08	18.12	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Promedio	27.04	7.02	1.06	39.21	0.01	0.03	11.15	13.53	0.00	2.54	-	-	-
Morro Solar (n = 13)	Mínimo	25.02	6.72	0.16	37.75	<l.d.	<l.d.	<l.d.	3.56	<l.d.	0.17	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	29.04	8.37	0.87	42.25	0.08	0.29	24.65	22.76	<l.d.	1.48	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Promedio	27.57	7.93	0.45	40.52	0.02	0.05	8.55	15.78	-	0.68	-	-	-
Manto Ivette (n = 9)	Mínimo	26.12	2.05	0.63	38.60	<l.d.	<l.d.	<l.d.	7.37	<l.d.	0.06	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	28.67	7.57	5.92	43.10	<l.d.	<l.d.	19.40	21.75	<l.d.	2.26	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Promedio	27.31	6.14	1.76	41.06	-	-	9.84	14.32	-	1.26	-	-	-
Cuerpo Rosita/Veta Rubí (n = 4)	Mínimo	23.36	5.63	0.45	25.19	<l.d.	<l.d.	23.82	2.52	<l.d.	2.78	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Máximo	25.38	6.95	2.37	37.13	<l.d.	<l.d.	24.20	3.68	0.08	18.12	<l.d.	<l.d.	<l.d.
	Promedio	24.45	6.39	1.16	30.36	-	-	23.96	3.20	0.02	11.55	-	-	-
Ramal Alianza (n = 1)		28.18	5.7	2.34	40.99	<l.d.	<l.d.	5.58	18.48	<l.d.	2.09	<l.d.	<l.d.	<l.d.

<l.d.: debajo del límite de detección



5. DISCUSIÓN

5.1 Mineralogía y distribución temporal de In, Ge y Ga en el yacimiento de Morococha

En las estructuras mineralizadas estudiadas en el yacimiento de Morococha no se detectaron fases propias de In, Ge y Ga, sino que se detectaron valores relativamente altos de In en sulfuros, especialmente en esfalerita. Las concentraciones de Ge y Ga son de forma mayoritaria inferiores a sus respectivos límites de detección (ver Tabla 1). La esfalerita es el principal componente en la mineralización del yacimiento de Morococha desde el punto de vista volumétrico, y por ende sería la principal fase alojadora de In. La esfalerita como portadora de In ya ha sido descrita por otros autores a nivel global (e.g., Cook et al., 2011a; Cook et al., 2011b) y en los Andes Centrales, particularmente en los depósitos presentes en la faja estannífera boliviana (Ishihara et al., 2011; Murakami e Ishihara, 2013; Torró et al., 2019a,b). Asimismo, diversos estudios también resaltan que la stannita y la calcopirita albergan altas concentraciones de In (Cook et al., 2011a; Bauer et al., 2019). Sin embargo, en las muestras analizadas, no se observaron minerales de estaño y los análisis realizados a las muestras de calcopirita alcanzan valores de In de hasta 0,23 wt.%, si bien los valores por encima de su límite de detección en este mineral son muy puntuales, a diferencia de la esfalerita. La mineralización de In en Morococha puede contextualizarse en gran medida en el sistema pseudoternario de esfalerita-stannita-roquesita descrito por Oen et al. (1980). Si bien en el diagrama triangular de la Figura 8 no se observan claras tendencias composicionales a lo largo de la línea de conexión esfalerita-roquesita, seguramente esto sería debido a que las concentraciones de In son cercanas y a menudo inferiores a la de su límite de detección. La correlación entre las proporciones atómicas de In y Cu en una proporción de 1:1 armoniza con una sustitución emparejada $\text{Cu}^+ + \text{In}^{3+} \leftrightarrow 2\text{Zn}^{2+}$. Este mecanismo de incorporación de In en la estructura de la esfalerita es ampliamente descrito (e.g., Schwarz-

Schampera y Herzig, 2002; Cook et al., 2011b; Torró et al., 2019a,b, y sus referencias). Además, es importante resaltar que, de acuerdo a este mecanismo de incorporación de In en la estructura de la esfalerita, es necesaria una alta disponibilidad de Cu en el fluido mineralizante a partir del cual precipita este mineral. La existencia de texturas de intercrecimiento fino de esfalerita y calcopirita (e.g., enfermedad de la calcopirita o calcopiritosis) probablemente sea un indicador de una actividad distintivamente alta de Cu en el sistema mineralizante. Por otro lado, la incorporación de In en la estructura de la esfalerita aparentemente funciona independientemente de la concentración de Fe y otros elementos. Las concentraciones atómicas de Fe en esfalerita no presentan ninguna correlación con las de In, y de hecho las concentraciones más elevadas de In se detectaron en granos de esfalerita relativamente pobres en Fe ($Fe < 0,1$ a.p.f.u.; Fig. 10A).

La paragénesis de las estructuras mineralizadas (Veta Morro Solar, Manto Ivette, Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Ramal Alianza) estudiadas en el yacimiento de Morococha muestran la incorporación de In preferentemente durante la subetapa de Fe-Cu-Zn-As-Sn, en que se contextualiza la cristalización de una primera generación de esfalerita (Figura 6 y 7) con hasta 0,39 wt.% In. Esta primera generación, alcanza valores de FeS de hasta 10,59 mol.% apuntando así a una cristalización en equilibrio con pirita, fuera del campo de estabilidad de la pirrotina (Scott y Barnes, 1971). Evidencias de una alta actividad de Cu durante la cristalización de esta esfalerita incluyen concentraciones elevadas de Cu, así como la co-cristalización junto con minerales que contienen Cu tales como calcopirita y cobres grises (Figura 6 y 7). La segunda generación de esfalerita de la Veta Morro Solar presenta contenidos similares de In (hasta 0,53 wt.%) y arrojan valores de FeS de hasta 13,77 mol. %, evidenciando también una cristalización en equilibrio con pirita.

5.2 Distribución espacial de In, Ge y Ga en el yacimiento de Morococha

El estudio mineralógico realizado en el yacimiento de Morococha y los análisis geoquímicos relacionados a este estudio nos permiten trazar de manera preliminar la distribución espacial de In a escala de yacimiento. Se observa que las concentraciones de In son relativamente erráticas y que análisis cercanos en una misma muestra arrojan valores muy dispares. Variaciones similares son descritas por Torró et al. (2019a,b) en yacimientos del cinturón estannífero de Bolivia. Concentraciones elevadas de In están asociadas tanto a vetas polimetálicas (Veta Morro Solar, Veta Rubí, Veta Isabel, Ramal Alianza), como a cuerpos de reemplazamiento (Manto Ivette, Cuerpo Rosita). Los cristales de esfalerita de la Veta Morro Solar presentan valores de In de hasta 0,53 wt.%, en Manto Ivette de hasta 0,39 wt.%, en Cuerpo Rosita/Veta Rubí de hasta 0,18 wt.%, y en Ramal Alianza de hasta 0,27 wt.%. Como se observa en la Figura 3, Veta Morro Solar y Manto Ivette son relativamente proximales a los intrusivos de Toromocho – San Francisco. Siguiendo el patrón de zonación metalífera en el distrito descrito por Catchpole et al. (2011; Cu → Cu-Zn → Zn-Pb-Ag → Ag-Pb, ver su figura 1), estas estructuras mineralizadas se ubicarían en el límite entre las zonas de Cu y Cu-Zn. En cambio, Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel y Ramal Alianza se ubican contiguas al stock de Codiciada, y serían relativamente distales al centro intrusivo más joven (Toromocho – San Francisco), situándose en la zona de Zn-Cu a Zn-Pb-Ag. La ubicación de las mineralizaciones estudiadas en estas dos zonas metalíferas contrastantes estaría de acuerdo con las abundancias de los minerales de mena observadas en éstas (Figuras 6 y 7). De este modo, del estudio realizado en esta tesis se desprende que las máximas concentraciones de In se han detectado en esfalerita cristalizada en cuerpos mineralizados relativamente proximales a los intrusivos más jóvenes del distrito, en las zonas más enriquecidas en Cu. Los datos presentados sugieren que, en yacimientos magmático-hidrotermales con zonación metalífera, los

dominios más prospectivos para In serán aquellos con abundante esfalerita en las zonas de Cu y Zn-Cu. Zonaciones similares en la distribución de In en esfalerita, con un incremento en su concentración en las zonas centrales de los distritos han sido descritas en los yacimientos de Huari Huari y de Ánimas – Chocaya – Siete Suyos en el sur de Bolivia (Torró et al., 2019a,b). Se desprende, además, que las mineralizaciones cordilleranas son altamente prospectivas para la producción de In como subproducto, principalmente, de la mena de Zn. El uso de técnicas analíticas que permitan rebajar considerablemente los límites de detección para los elementos de interés (e.g., LA-ICP-MS) proporcionará una mayor información estadística sobre la que construir patrones claros de distribución en vetas y cuerpos proximales vs. distales.

5.3 Recomendaciones para la exploración de In, Ge y Ga en yacimientos tipo cordillerano en los Andes Centrales

Para realizar la exploración de In, Ge y Ga en yacimientos tipo cordillerano (e.g., Morococha, Colquijirca), es necesario tomar en cuenta que:

- El contenido de Ge y Ga en este tipo de yacimiento es muy bajo (por debajo de sus límites de detección en EPMA), a diferencia del In, que puede presentar concentraciones relativamente altas.
- La presencia de fases minerales propias de In es poco probable. La mayor porción de In en la mineralización estará en la esfalerita y, en menor medida, en calcopirita o en otros minerales que se encuentran por regla general en más bajas proporciones, como la stannita.
- La búsqueda se centrará principalmente en aquella esfalerita con evidencias químicas/texturales que señalen una cristalización durante etapas de alta disponibilidad de

Cu (e.g., alto contenido de Cu en su estructura, co-cristalización con cobres grises y/o calcopirita – incluyéndose la textura conocida como calcopiritosis).

- En distritos con zonación metalífera, la esfalerita más enriquecida en In se ubicará de manera preferente en las zonas enriquecidas en Cu, que por lo general son próximas a los centros intrusivos conectados genéticamente con la mineralización polimetálica.



6. CONCLUSIONES

- En la presente investigación del yacimiento de Morococha se realizó el estudio de diversas estructuras mineralizadas: Veta Morro Solar, Manto Ivette, Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel y Ramal Alianza. Se agruparon en dos bloques según su localización y similitudes en sus secuencias paragenéticas con respecto a los minerales mayoritarios. Para el primer bloque (Veta Morro Solar y Manto Ivette) se determinaron 3 estadios de mineralización: cuarzo-pirita, metales base (minerales de Cu-Zn-Pb-Ag) y carbonatos. En el segundo bloque (Cuerpo Rosita/Veta Rubí, Veta Isabel, Ramal Alianza) se estableció una secuencia de mineralización similar a la del primer bloque, con la diferencia que éstos presentan un estadio preexistente, caracterizado por la presencia de pirrotina masiva reemplazada por marcasita y pirita.
- Se detectaron concentraciones de hasta 0,53 wt.% In en granos de esfalerita de los diversos cuerpos polimetálicos estudiados en el yacimiento de Morococha. Otros minerales como la calcopirita arrojaron concentraciones de In puntualmente por encima de su límite de detección. Las concentraciones de Ga y Ge están de forma muy mayoritaria por debajo de sus límites de detección con EPMA para todos los minerales investigados.
- En el yacimiento de Morococha, el enriquecimiento de In en esfalerita se da a través de una sustitución acoplada $\text{Cu}^+ + \text{In}^{3+} \leftrightarrow 2\text{Zn}^{2+}$. El Cu desempeña, de este modo, un papel fundamental en la incorporación del In en la estructura de la esfalerita, así como su distribución y no el contenido de Fe u otros elementos.
- Dentro de la secuencia paragenética, las concentraciones máximas de In en esfalerita aparecen en el estadio de metales base de los diversos cuerpos polimetálicos estudiados en el yacimiento (sub-etapa de Fe-Cu-Zn-As-Sn). Cabe resaltar que el contenido de FeS en la

esfalerita de los diversos cuerpos es de hasta 13,77 mol. %, indicando una cristalización en equilibrio con pirita y fuera del campo de estabilidad de la pirrotina. Esta asociación sería típica de ambientes epitermales de sulfuración intermedia.

- Las concentraciones máximas de In en esfalerita descritas en esta tesis corresponden a zonas de Cu y Cu-Zn, contiguas o cercanas radialmente a los centros intrusivos asociados a la mineralización polimetálica.



7. REFERENCIAS

- Agneau, M., 2008, Genesis of Ag-rich mineralisation in the Buenaventura and Galera veins, Yacumina zone, SW part of the Morococha district, central Peru, Unpublished Master thesis, University of Geneva, pp. 1-119.
- Almosni, S., Delamarre, A., Jehl, Z., Suchet, D., Cojocar, L., Giteau, M., Behaghel, B., Julian, A., Ibrahim, C., Tatry, L., Wang, H., Kubo, T., Uchida, S., Segawa, H., Miyashita, N., Tamaki, R., Shoji, Y., Yoshida, K., Ahsan, N., Watanabe, K., Inoue, T., Sugiyama, M., Nakano, Y., Hamamura, T., Toupance, T., Olivier, C., Chambon, S., Vignau, L., Geffroy, C., Cloutet, E., Hadziioannou, G., Cavassilas, N., Rale, P., Cattoni, A., Collin, S., Gibelli, F., Paire, M., Lombez, L., Aureau, D., Bouttemy, M., Etcheberry, A., Okada, Y., Guillemoles, J., 2018, Material challenges for solar cells in the twenty-first century: directions in emerging technologies, *Science and Technology of Advanced Materials*, v. 19 (1), pp. 336-369.
- Bauer, M.E., Seifert, T., Burisch, M., Krause, J., Richter, N., Gutzmer, J., 2019, Indium-bearing sulfides from the Hämmerlein skarn deposit, Erzgebirge, Germany: Evidence for late-stage diffusion of indium into sphalerite, *Mineralium Deposita*, v. 54, pp. 175–192.
- Benavides, V., 1999, Orogenic evolution of the Peruvian Andes: The Andean cycle, In: Skinner, B.J. (Ed.), *Geology and ore deposits of the central Andes*, Society of Economic Geologists, Special Publication 7, Littleton, Colorado, pp. 61–107.
- Bendezú, A., 2007, Mineralización tipo pórfido de Cu-Mo asociadas a venas cordilleranas de metales base: Toromocho-Morococha, distrito de Morococha, Perú, *Universidad Nacional de Ingeniería*, Lima, pp. 2-132.
- Bendezú, A., Kouzmanov, K., Ovtcharova, M., Spikings, R., Fontboté, L., 2012, Timing of porphyry emplacement in the Miocene Morococha district, central Perú: U-Pb and Ar-Ar geochronological record, 34th International Geological Congress, Brisbane, Australia, pp. 1-6.
- Beuchat, S., 2003, Geochronological, structural, isotopes and fluid inclusion constraints of the polymetallic Domo de Yauli District, Peru, *Terre Environment*, v. 41, pp. 1-130.

- Bissig, T., Ullrich, T., Tosdal, R., Friedman, R., Ebert, S., 2008, The time-space distribution of Eocene to Miocene magmatism in the central Peruvian polymetallic province and its metallogenic implications, *Journal of South American Earth Sciences*, v. 26(1), pp. 16–35.
- Bleiwas, D., 2010, *Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells*, U.S. Geological Survey Circular 1365, Reston, Virginia, pp. 1-10.
- Butcher, T. y Brown, T., 2013, Gallium, In *Critical Metals Handbook*, G. Gunn (Ed.), pp. 150-176.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani, M., Díaz, E., Navarro, P., Jaimes, F., Velarde, T., Lu, S., Cueva, E., 2009, Dominios geotectónicos y Metalogénesis del Perú, *Sociedad Geológica del Perú*, v. 103, pp. 1–90.
- Carvalho, J.R.S., Relvas, J.M.R.S., Pinto, A.M.M., Frenzel, M., Krause, J., Gutzmer, J., Pacheco, N., Fonseca, R., Santos, S., Caetano, P., Reis, T., Gonçalves, M., 2018, Indium and selenium distribution in the Neves-Corvo deposit, Iberian Pyrite Belt, Portugal. *Mineralogical Magazine*, v. 82, pp. 5–41.
- Catchpole, H., Bendezú, A., Kouzmanov, K., Fontboté, L., Román, E., 2007, Porphyry related base metal mineralisation styles at Nuevo Potosí, Morococha district, central Peru: 5th Swiss Geoscience Meeting, Geneva, Switzerland, pp. 75-77.
- Catchpole, H., Kouzmanov, K., Fontboté, L., Guillong, M., Heinrich, C., 2011, Fluid evolution in zoned Cordilleran polymetallic veins insights from microthermometry and LA-ICP-MS of fluid inclusions, *Chemical Geology*, v. 281, pp. 293–304.
- Catchpole, H., Bendezú, A., Vallance, J., Kouzmanov, K., Astorga, C., Fontboté, L., 2016, Relaciones espacio-temporales entre pórfidos, skarns estériles y mineralización polimetálica en skarn, cuerpos de reemplazamiento en rocas carbonatadas y vetas en el Distrito de Morococha, Perú, XVIII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú, pp. 1-5.
- Catchpole, H., Kouzmanov, K., Bendezú, A., Ovtcharova, M., Spikings, R., Stein, H., Fontboté, L., 2015a, Timing of porphyry (Cu-Mo) and base metal mineralisation (Zn-Pb-Ag-Cu) in a magmatic-hydrothermal system - Morococha district, Peru, *Mineralium Deposita*, v. 50, pp. 895-922.

- Catchpole, H., Kouzmanov, K., Putlitz, B., Seo, J., Fontboté, L., 2015b, Zoned base metal mineralization in a porphyry system: Origin and evolution of mineralizing fluids in the Morococha District, Peru, *Economic Geology*, v. 110, pp. 39-71.
- Cerro de Pasco Copper Corporation., 1948, Lead and zinc deposits of the Cerro de Pasco Corporation in central Peru. In: 18th International Geological Congress, Great Britain, pp. 154-186.
- Cerro de Pasco Copper Corporation., 1965, Morococha Ore Inventory, Geological Office, v. 1, pp. 1-505.
- Chinalco Mining Corporation International., 2015, Annual Report, Lima, pp. 12-35. https://www.miningdataonline.com/reports/annual/ChinalcoMiningCorporationInternational_2015_AnnualReport.pdf
- Cook, N., Ciobanu, C. y Williams, T., 2011a, The mineralogy and mineral chemistry of indium in sulphide deposits and implications for mineral processing, *Hydrometallurgy*, v. 108 (3-4), pp. 226-228.
- Cook, N.J., Sundblad, K., Valkama, M., Nygård, R., Ciobanu, C.L., Danyushevsky, L., 2011b, Indium mineralisation in A-type granites in southeastern Finland: Insights into mineralogy and partitioning between coexisting minerals, *Chemical Geology*, v. 284 (1-2), pp. 62-73.
- Ellison, R.A., Klinck, B.A., y Hawkins, M.P., 1989, Deformation events in the Andean orogenic cycle in the Altiplano and Western Cordillera, southern Peru, *Journal of South American Earth Sciences*, v. 2 (3), pp. 263-276.
- Emsbo, P., Seal, R., Breit, G., Diehl, S., Shah, A., 2016, Sedimentary Exhalative (Sedex) Zinc-Lead-Silver Deposit Model: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–N, pp. 1-57.
- European Commission., 2017, Critical Raw Materials, Luxembourg, pp. 1-504.
- Eyzaguirre, V., Montoya, D., Silberman, M., Noble, D., 1975, Age of igneous activity and mineralization, Morococha district, central Peru, *Economic Geology*, v. 70 (6), pp. 1123–1125.

- Freyssinet, P., Butt, C., Morris, R., Piantone, P., 2005, Ore-forming processes related to lateritic weathering. in Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds, Economic Geology, One hundredth anniversary volume (1905–2005), Littleton, Colorado, Society of Economic Geologists, pp. 681–722.
- Foley, N., Jaskula, B., Kimball, B., Schulte, F., 2017, Gallium, Chapter H of Critical Mineral Resources of the United States, Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, pp. 1-26.
- Fontboté, L., 2018, Ore deposits of the Central Andes, Elements, v. 14, pp. 257-261.
- Guberman, D., 2015, Germanium: U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries 2015, pp. 64–65. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2015/mcs2015.pdf>
- Guizado, J. y Landa, C., 1965, Geología del Cuadrángulo de Pampas. Comisión de la Carta Geológica Nacional, v. 12, pp. 1-77.
- Hagelüken, C., 2012, Secondary Raw Material Sources for Precious and Special Metals, In: Sinding-Larsen R., Wellmer FW. (eds), Non-Renewable Resource Issues, International Year of Planet Earth, Springer, Dordrecht, pp. 195-212.
- Harrison, J., 1943, Geología de los Andes Centrales en parte del departamento de Junín, Boletín de la Sociedad Geologica del Peru, v. 16, pp. 1-97.
- Heuschmidt, B., Bellot, J., Miranda, V., Claire, M., 2002, Las Áreas Prospectivas de Bolivia para yacimientos metalíferos: Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería, v. 30, pp. 1-171.
- INGEMMET., 1983, Geología de los Cuadrángulos de Matucana y Huarochirí, H. Salazar. Boletín. 36 Serie A, pp. 1-68.
- Ishihara, S., Murakami, H. y Marquez, M., 2011, Inferred indium resources of the Bolivian tin-polymetallic deposits, Resource Geology, v. 61, pp. 174-191.
- Jenks, W., 1951, Triassic to Tertiary Stratigraphy near Cerro de Pasco, Perú, Geological Society of America Bulletin, v. 62, pp. 203-219.

- Jiménez-Franco, A., Alfonso, P., Canet, C., Trujillo, J., 2018, Mineral chemistry of In-bearing minerals in the Santa Fe mining district, Bolivia, *Andean Geology*, v. 45, pp. 410-432.
- Kelley, K., Leach, D., Johnson, C., Clark, J., Fayek, M., Slack, J., Anderson, V., Ayuso, R., Ridley, W., 2004, Textural, compositional, and sulfur isotope variations of sulfide minerals in the Red Dog Zn-Pb-Ag deposits, Brooks Range, Alaska: implications for ore formation, *Economic Geology*, v. 99, pp. 1509–1532.
- Kesler, S. y Simon, A., 2015, *Mineral resources, economics and the environment*, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pp. 234–235.
- Kouzmanov, K., Ovtcharova, M., Von, A., Guillong, M., Spikings, R., Schaltegger, U., Fontboté, L., Rivera, L., 2008, U-Pb and ⁴⁰Ar/³⁹Ar age constraints for the timing of magmatism and mineralization in the giant Toromocho porphyry Cu-Mo deposit, Central Peru, In: XIII Congreso Latinoamericano de Geología, Lima, Perú, pp. 1-6.
- Lepry, L., 1981, The structural geology of the Yauli Dome region, Cordillera Occidental, Peru, Department of Geoscience, University of Arizona, Arizona, USA, pp. 1-122.
- Loughman, D. y Hallam, A., 1982, A facies analysis of the Pucará Group (Norian to Toarcian carbonates, organic-rich shale and phosphate) of central and northern Peru, *Sedimentary Geology*, Elsevier, v. 32, pp. 161–194.
- McLaughlin, D., 1924, The Geology and Physiography of the Peruvian Cordillera, departments of Junin and Lima, *GSA Bulletin*, v. 35 (3), pp. 591-632.
- McLaughlin, D., Graton, L. and others, 1933, Copper in the Cerro de Pasco and Morococha district, Department of Junin, Perú, pp. 513-544.
- Megard, F., 1968, Geología del cuadrángulo de Huancayo, Servicio de Geología y Minería, Boletín No. 18, pp. 1-105.
- Megard, F., 1979, Estudio geológico de los Andes del Perú Central, Boletín No. 8, Serie D, Estudios especiales INGEMMET, pp. 1-221.
- Melcher, F. y Buchholz, P., 2013, Germanium, In *Critical Metals Handbook*, G. Gunn (Ed.), pp. 177-203.

- Mondillo, N., Arfè, G., Herrington, R., Boni, M., Wilkinson, C., Mormone, A., 2018, Germanium enrichment in supergene settings: evidence from the Cristal nonsulfide Zn prospect, Bongará district, northern Peru, *Mineralium Deposita*, v. 53 (2), pp. 155–169.
- Murakami, H. y Ishihara, S., 2013, Trace elements of indium-bearing sphalerite from tin-polymetallic deposits in Bolivia, China and Japan: a femto-second LA-ICPMS study, *Ore Geology Reviews*, v. 53, pp. 223-243.
- Nagell, R., 1960, Ore Controls in the Morococha District, Peru, *Economic Geology*, v. 55, pp. 962-984.
- Newell, N., Chronic, J. y Roberts, T., 1953, Upper Paleozoic of Peru, *The Geological Society of America*, v. 58, pp. 1-315.
- Noble, D. y McKee, E., 1999, The Miocene metallogenic belt of central and northern Peru, In: Skinner, B.J. (Ed.), *Geology and Ore Deposits of the Central Andes: Society of Economic Geologists Special Publication No. 7*, Littleton, Colorado, pp. 155–193.
- Oen, I., Kager, P., y Kieft, C., 1980, Oscillatory zoning of a discontinuous solid-solution series: Sphalerite-stannite, *American Mineralogist*, v. 65, pp. 1220-1232.
- Paar, W.H., de Brodtkorb, M.K., Sureda, R.J., Topa, D., 1998, A microprobe study of complex Ag-Sn ores from Pirquitas, Jujuy province, Argentina. Abstracts for the Plenary Lectures, Symposia, and Special Sessions of the 17th General Meeting of the International Mineralogical Association, Toronto, 1998, p. A118.
- Panca, F., Bahlburg, H. y Berndt, J., 2018, Provenance, chronostratigraphic framework and volcanosedimentary facies architecture of the permotriassic Mitu Group in southern Peru, Central Andes, XIX Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú, pp. 1-4.
- Paredes, J., 1972, Etude géologique de la feuille de Jauja au 1: 100,000 (Andes du Pérou Central), Tesis 3° cycle, University of Science and Technology of Languedoc, Montpellier 1 mapa h-t, pp. 1-79.
- Petersen, U., 1965, Regional geology and major ore deposits of Central Perú, *Economic Geology*, v. 60, pp. 407-476.

- Prinz, P., 1985, Zur Stratigraphie und Ammonitenfauna der Pucará-Gruppe bei San Vicente (Depto. Junín, Peru), Newsletter on Stratigraphy, v.14, pp. 129–141.
- Ritterbush, K. A., Rosas, S., Corsetti, F. A., Bottjer, D. J., West, A. J., 2015, Andean sponges reveal long-term benthic ecosystem shifts following the end-Triassic mass extinction. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 420, pp. 193–209.
- Rivera, N. y Kobe, H., 1983, Evolución Geológica del Domo de Yauli, Boletín de la Sociedad Geológica del Perú No. 72, pp. 177-195.
- Rosas, S. y Fontboté, L., 1995, Evolución sedimentológica del Grupo Pucará (Triásico Superior-Jurásico Inferior) en un perfil SW-NE en el centro del Perú, Sociedad Geológica del Perú, Volumen Jubilar Alberto Benavides, 279.
- Rosas, S., Fontboté, L. y Tankard, A., 2007, Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, central Peru, Journal of South American Earth Sciences, v. 24, pp. 1–24.
- Rosas, S., 2016, Profundización sedimentaria solo en parte de la cuenca Pucará (Peru Central) durante el Hetangiano-Sinemuriano, En XVIII Congreso Peruano de Geología, Lima, Sociedad Geológica del Perú, pp. 1 - 4.
- Sahlström, F., Arribas, A., Dirks, P., Corral, I., Chang, Z., 2017, Mineralogical Distribution of Germanium, Gallium and Indium at the Mt Carlton High-Sulfidation Epithermal Deposit, NE Australia, and Comparison with Similar Deposits Worldwide, Minerals, v. 7 (11), pp. 1-213.
- Schwarz-Schampera, U., 2014, Indium, In Critical Metals Handbook, G. Gunn (Ed.), pp. 204-229.
- Schwarz-Schampera, U. y Herzig, P., 2002, Indium: Geology, Mineralogy, and Economics, Springer, pp. 1-216.
- Scott, S. y Barnes, H., 1971, Sphalerite geothermometry and geobarometry, Economic Geology, v. 66, pp. 653-669.

- Sempere, T., 1995, Phanerozoic evolution of Bolivia and adjacent regions, In: Tankard, A.J., Suárez-Soruco, R., Welsink, H.J. (Eds.), *Petroleum Basins of South America*, AAPG Memoir, v. 62, pp. 207-230.
- Sempere, T., Carlier, G., Soler, P., Fornari, M., Carlotto, V., Jacay, J., Arispe, O., Neraudeau, D., Cardenas, J., Rosas, S., Jimenez, N., 2002, Late Permian – Middle Jurassic lithospheric thinning in Peru and Bolivia, and its bearing on Andean-age tectonics, *Tectonophysics*, v. 345, pp. 153–181.
- Shanks III, W.C.P., Koski, R.A., 2012, Introduction to Volcanogenic massive sulfide occurrence model, en: Shanks III, W.C. y Thurston, R. (Eds.), *Volcanogenic massive sulfide occurrence model*, U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report 2010-5070-C, Reston, pp. 5-8.
- Shanks, W., Kimball, B., Tolcin, A., Guberman, D., 2017, Germanium and Indium. chap. I of Schulz, K. J.; DeYoung, J. H., Jr.; Seal, R. R., II; Bradley, D. C., eds., *Critical mineral resources of the United States – Economic and environmental geology and prospects for future supply*: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, pp. 1–26
- Skirrow, R., Huston, D., Mernagh, T., Thorne, J., Dulfer, H., Senior, A., 2013, Critical commodities for a high-tech world: Australia’s potential to supply global demand, *Geoscience*, Australia, Canberra, pp. 1-27.
- Soler, P., 1987, Variations des teneurs en éléments mineurs (Cd, In, Ge, Ga, Ag, Bi, Se, Hg, Sn) des minerais de Pb-Zn de la province polymetallique des Andes du Pérou Central, *Mineralium Deposita*, v. 22, pp. 135-143.
- Spikings, R., Reitsma, M., Boekhout, F., Miskovic, A., Ulianov, A., Chiaradia, M., Schaltegger, U., 2016, Characterisation of Triassic rifting in Peru and implications for the early disassembly of western Pangaea, *Gondwana Research*, v. 35, pp. 124-143.
- Stanley Jr, G.D., 1994, Early Mesozoic carbonate rocks of the Pucará Group in Northern and Central Peru, *Palaeontographica*, v. 233, pp. 3–32.
- Terrones, A., 1949, La estratigrafía del distrito minero de Morococha, *Sociedad Geologica del Perú*, v. 2 (8), pp. 1-15.

- Tolcin, A., 2017, 2015 Mineral Yearbook – Indium [Advance Release], U.S. Geological Survey Circular, Reston, Virginia, pp. 1-2.
- Torró, L., Melgarejo, J., Gemmrich, L., Mollinedo, D., Cazorla, M., Martínez, Á., Pujol-Solà, N., Farré-de-Pablo, J., Camprubí, A., Artiaga, D., Torres, B., Alfonso, P., Arce, O., 2019a, Spatial and Temporal Controls on the Distribution of Indium in Xenothermal Vein-Deposits: The Huari Huari District, Potosí, Bolivia, *Minerals*, v. 9 (5), pp. 304-340.
- Torró, L., Cazorla, M., Melgarejo, J., Camprubí, A., Gemmrich, L., Campeny, M., Artiaga, D., Torres, B., Martínez, Á., Tarrés, M., Mollinedo, D., Alfonso, P., Arce, O., 2019b, Indium Mineralization in the Volcanic Dome-Hosted Ánimas–Chocaya–Siete Suyos Polymetallic Deposit, Potosí, Bolivia, *Minerals*, v. 9 (10), pp. 604-642.
- Wafforn, M., Steinmann, M., Delgado, A., 2014, Technical Report for the Morococha Property, Yauli, Peru, Pan American Silver Corp, pp. 6-66.
- Weaver, C., 1942, A General Summary of the Mesozoic of South America and Central America, *Proc. 8th. American Science Congress*, v. 4, pp. 149-193.
- Werner, T.T., Mudd, G.M., Jowitt, S.M., 2015, Indium: key issues in assessing mineral resources and long-term supply from recycling, *Applied Earth Science*, (Trans. Inst.Min. Metall. B) v. 124, pp. 213–22.
- Werner, T.T., Mudd, G.M., Jowitt, S.M., 2017, The World's by-product and critical metal resources part III: A global assessment of indium. *Ore Geology Reviews*, v. 86, pp. 939-956.



ANEXOS

Anexo A - Listado de muestras

MUESTREO MOROCOCHA FEB-2019 (ARGENTUM-PUCP)				
Muestra	Sondajes	Profundidad	Corrida	Cuerpo
2019-MOR-001	-	NV. 4025	-	Morro Solar, anhidrita de la secuencia sedimentaria
2019-MOR-002	-	NV. 4025	-	Morro Solar, anhidrita de la secuencia sedimentaria
2019-MOR-003	-	NV. 4025	-	Morro Solar, cuerpo reemplazamiento
2019-MOR-004	-	NV. 4025	-	Morro Solar, cuerpo reemplazamiento
2019-MOR-005	-	NV. 4025	-	Morro Solar, caja piso
2019-MOR-006	-	NV. 4025	-	Morro Solar
2019-MOR-007	-	NV. 4025	-	Morro Solar, anhidrita de la secuencia sedimentaria
2019-MOR-008	-	NV. 4025	-	Morro Solar, cuerpo reemplazamiento
2019-MOR-009	-	NV. 4025	-	Manto Ivvete
2019-MOR-010	-	NV. 4025	-	Manto Ivvete
2019-MOR-011	-	NV. 4025	-	Manto Ivvete
2019-MOR-012	DDH-13A-U-18	NV. 4026	81.35-81.65	Manto Ivvete
2019-MOR-013	DDH-13A-U-18	NV. 4027	97.00-97.10	Manto Ivvete
2019-MOR-014	DDH-13A-U-18	NV. 4028	100.15-100.25	Manto Ivvete

MUESTREO MOROCOCHA FEB-2019 (ARGENTUM-PUCP)				
Muestra	Sondajes	Profundidad	Corrida	Cuerpo
2019-MOR-015	DDH-13A-U-18	NV. 4029	107.30-107.53	Manto Ivvete
2019-MOR-016	DDH-13A-U-18	NV. 4030	106.76-106.85	Manto Ivvete
2019-MOR-017	DDH-13A-U-18	NV. 4031	113.46-113.50	Manto Ivvete
2019-MOR-018	DDH-13A-U-18	NV. 4032	114.80-114.95	Manto Ivvete
2019-MOR-019	DDH-049-U-15	-	199.50-199.75	Manto Ivvete
2019-MOR-020	DDH-049-U-15	-	201.55-201.65	Manto Ivvete
2019-MOR-021	DDH-049-U-15	-	204.30-204.40	Manto Ivvete
2019-MOR-022	DDH-049-U-15	-	?	Manto Ivvete
2019-MOR-023	DDH-049-U-15	-	235.20-235.47	Manto Ivvete, cuerpo de reemplazamiento
2019-MOR-024	DDH-049-U-18	-	1.30-1.40	Volcánicos Catalina
2019-MOR-025	DDH-049-U-18	-	11.60-11.73	Diseminado
2019-MOR-026	DDH-049-U-18	-	21.40-21.55	Cuerpo Rosita/Veta Rubí
2019-MOR-027	DDH-049-U-18	-	23.50-23.60	Cuerpo Rosita/Veta Rubí
2019-MOR-028	DDH-049-U-18	-	24.25-24.45	Pucará a 60 cm del techo del Cuerpo Rosita

MUESTREO MOROCOCHA FEB-2019 (ARGENTUM-PUCP)				
Muestra	Sondajes	Profundidad	Corrida	Cuerpo
2019-MOR-029	DDH-049-U-18	-	33.85-34.00	Cuerpo Rosita/Veta Rubí
2019-MOR-030	DDH-103-U-18	-	157.85-158.05	Cuerpo Rosita/Veta Rubí
2019-MOR-031	DDH-103-U-18	-	158.05-158.20	Veta Isabel
2019-MOR-032	DDH-103-U-18	-	158.90-159.00	Veta Isabel
2019-MOR-033	DDH-047-U-18	NV. 4045	3.05-3.10	Cuerpo Rosita/Veta Rubí
2019-MOR-034	DDH-047-U-18	NV. 4045	18.0-18.50	Cuerpo Rosita/Veta Rubí
2019-MOR-035	DDH-047-U-18	NV. 4045	18.75-18.90	Cuerpo Rosita/Veta Rubí
2019-MOR-036	DDH-047-U-18	NV. 4045	31.85-31.90	Cuerpo Rosita/Veta Rubí
2019-MOR-037	DDH-047-U-18	NV. 4045	32.30-32.35	Cuerpo Rosita/Veta Rubí
2019-MOR-038	DDH-047-U-18	NV. 4045	39.9	Cuerpo Rosita/Veta Rubí
2019-MOR-039	DDH-190-U-18	-	186.05-186.15	Ramal Alianza
2019-MOR-040	DDH-190-U-18	-	185.80-185.85	Ramal Alianza

Anexo B - Petrografía de muestras individuales

(Fotomicrografías de análisis minegráficos bajo luz reflejada y en algunos casos nicoles cruzados)



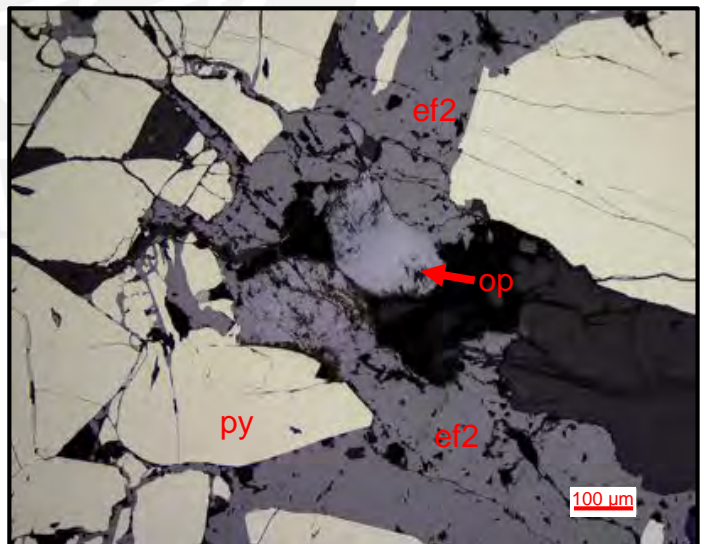
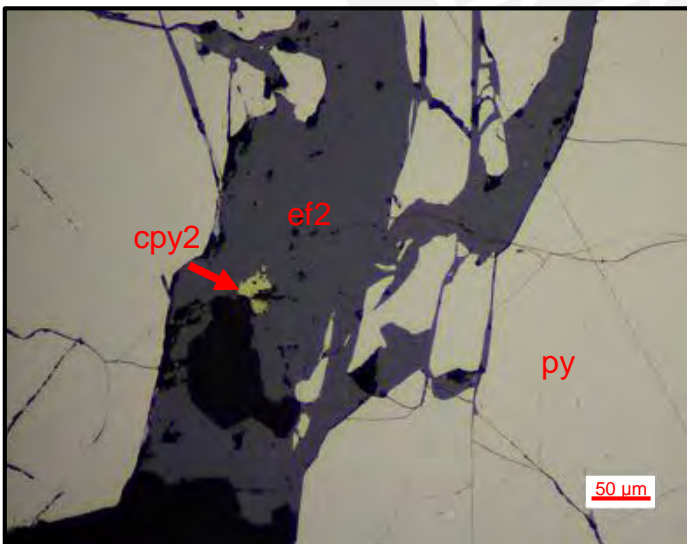
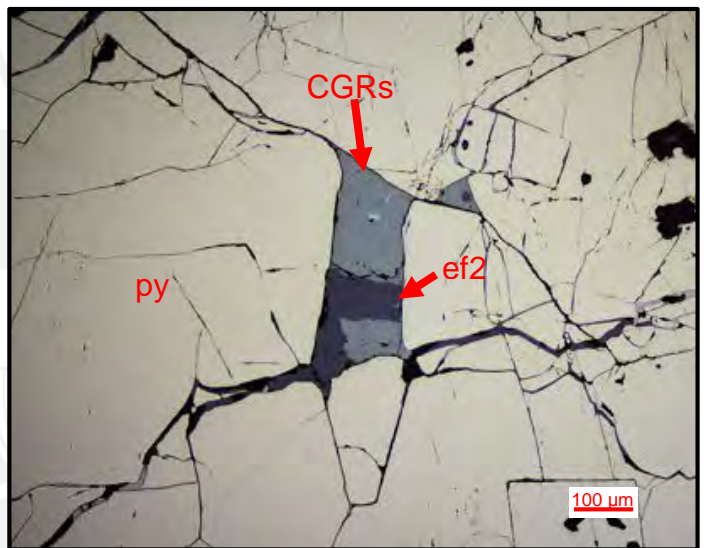
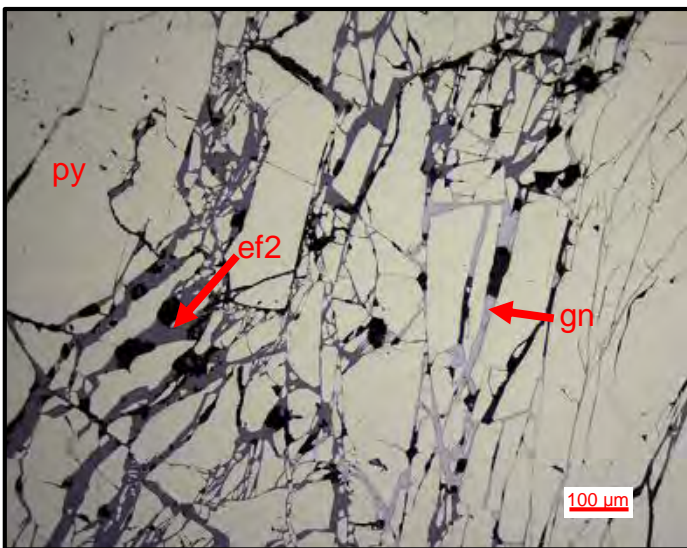
MORRO SOLAR



2019-MOR-01-SPA

Minerales: esfalerita(2) + pirita + esfalerita(1) + galena + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + oropimente + calcopirita (2) ± calcopirita (1) ± bornita

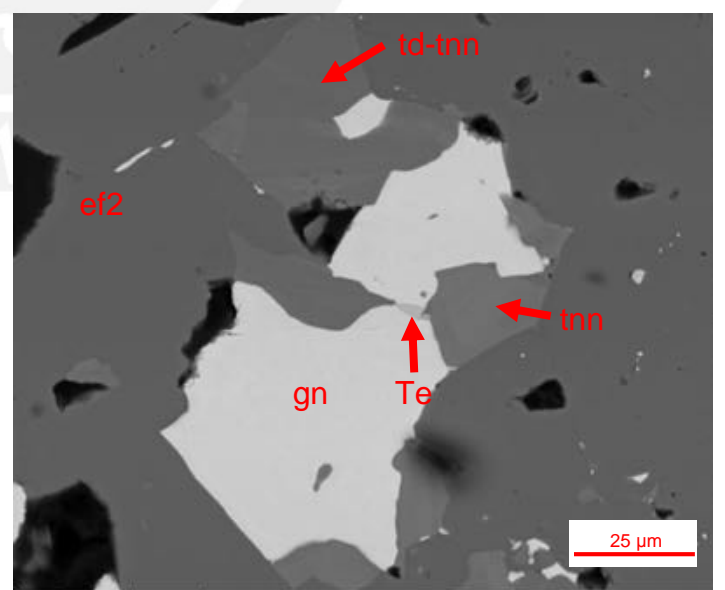
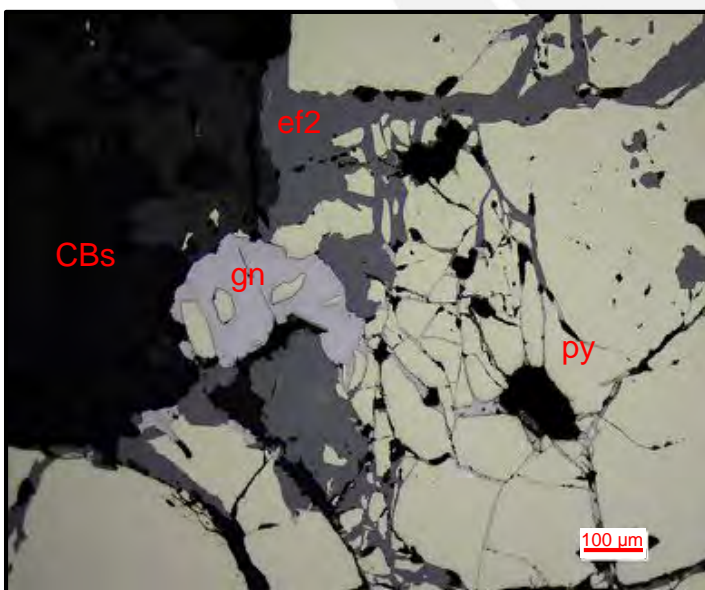
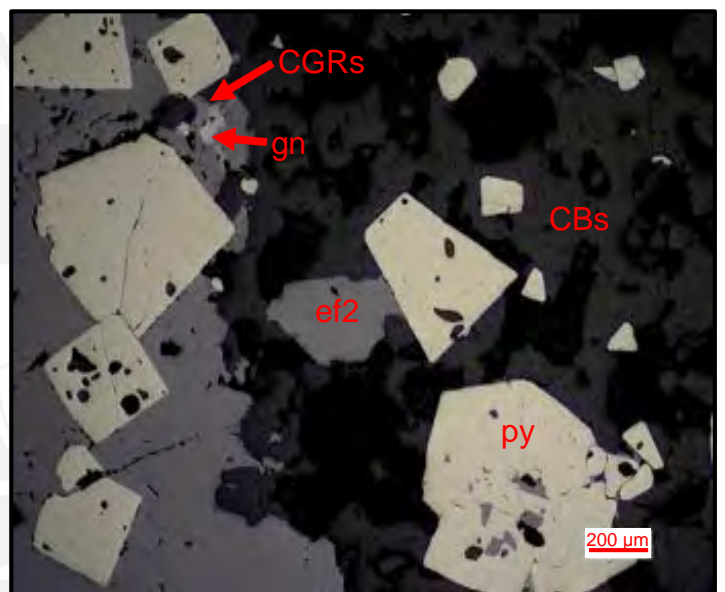
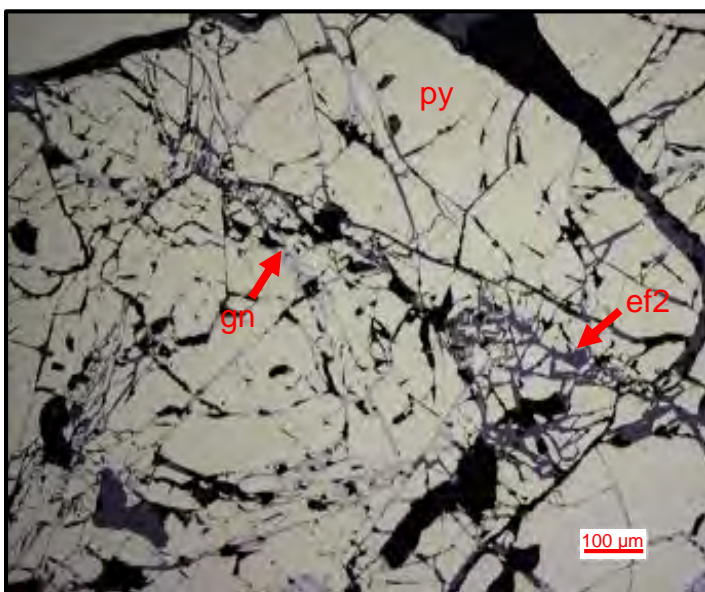
Agregados anhedrales a subhedrales de pirita en matriz de cuarzo y carbonatos, cuyas microfracturas, intersticios, bordes y porosidades han sido reemplazados principalmente por esfalerita (2) y, en menor proporción, por galena, cobres grises (tetraedrita-tennantita) y esfalerita (1) con diseminaciones de calcopirita (1). Por sectores, la esfalerita (2) aparece con porosidades rellenas por calcopirita (2) y bornita y, ocasionalmente, con bordes de oropimente (150 µm).



2019-MOR-01-SPB

Minerales: pirita + esfalerita (2) + galena ± cobres grises (tennantita-tetraedrita) ± calcopirita (2) ± bornita ± digenita ± telurio nativo

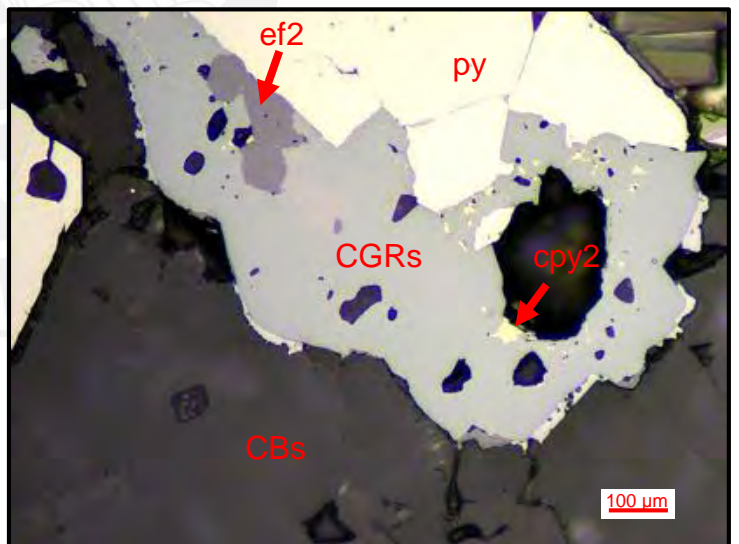
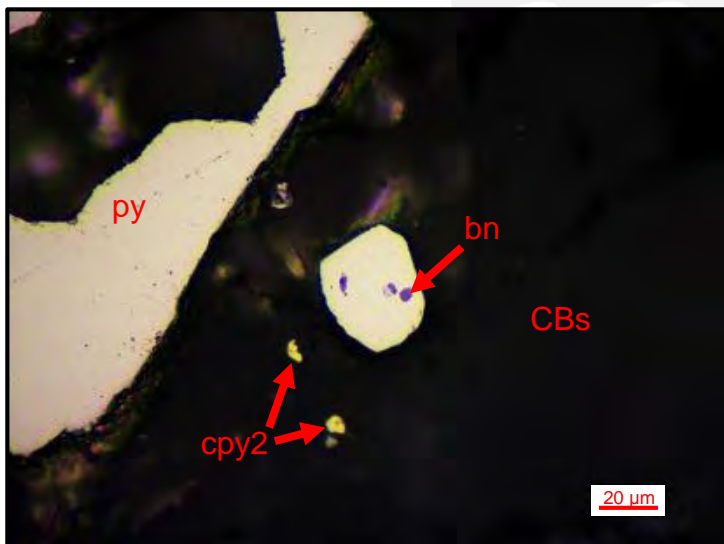
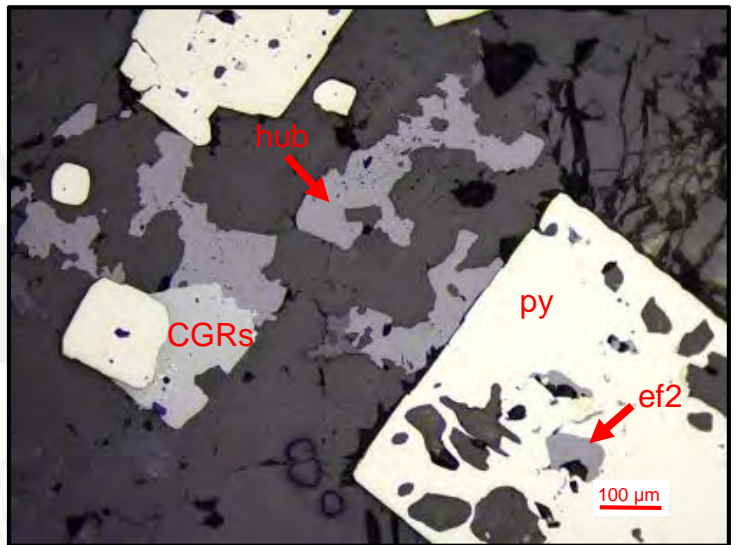
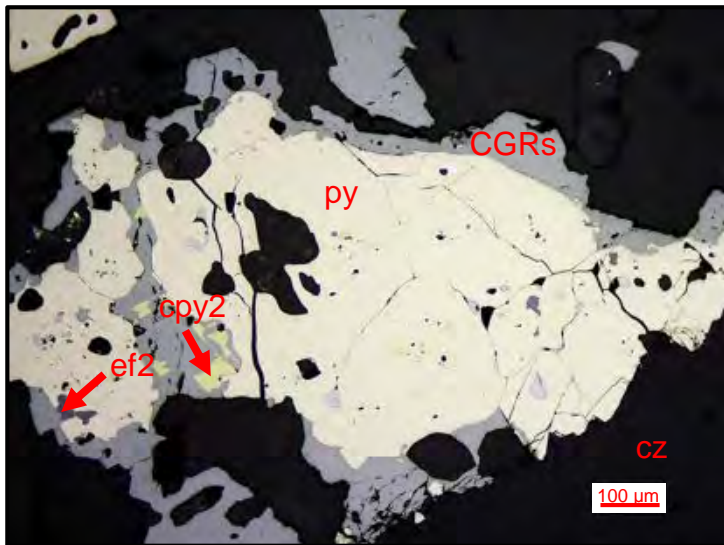
Agregados anhedrales a subhedrales de pirita que han sufrido un fuerte brechamiento y ha sido rellenos a través de microfracturas por esfalerita (2) con inclusiones de calcopirita (2), galena y cobres grises (tetraedrita-tennantita). Además, trazas de bornita y digenita en porosidades de pirita con tamaños de hasta 40 µm y 15 µm, respectivamente. De manera puntual, presencia de telurio nativo como inclusión en galena con una dimensión no mayor a 7 µm.



2019-MOR-01-SPC

Minerales: pirita + esfalerita (2) + cobres grises (tetraedrita-tennantita) ± hubnerita ± galena ± calcopirita (2) ± bornita

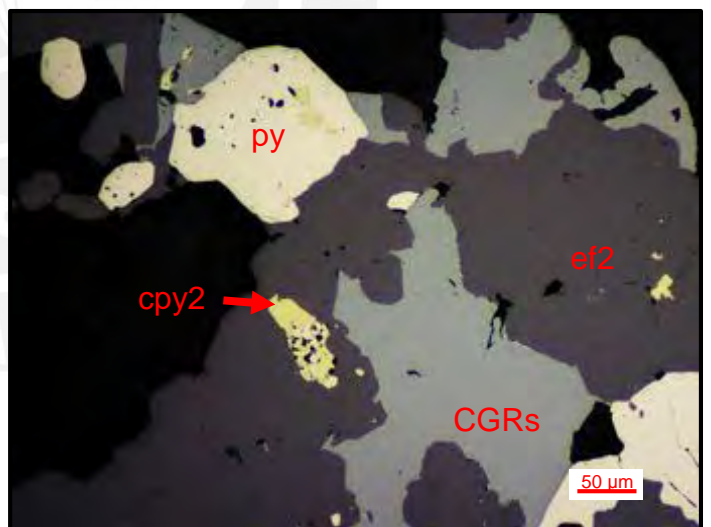
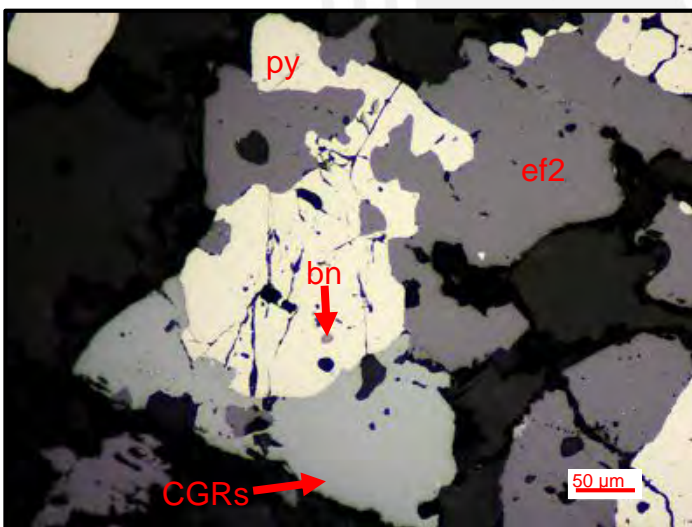
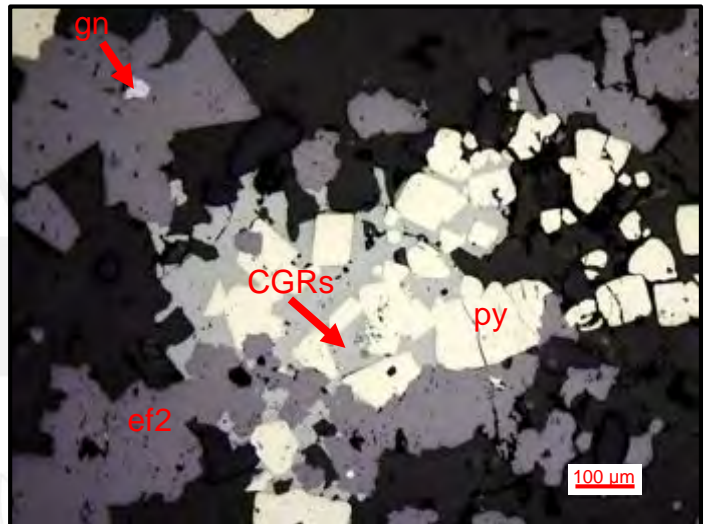
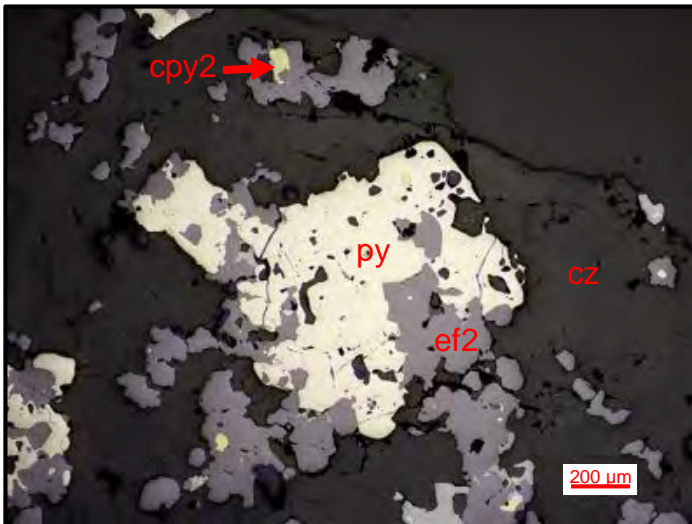
Agregados anhedrales a euhedrales de pirita, reemplazados por esfalerita (2), galena, cobres grises (tetraedrita-tennantita) y, en menor medida calcopirita (2) y bornita a través de bordes y porosidades. Además, escasos cristales de hubnerita incluidos en cuarzo con tamaños de hasta 375 µm.



2019-MOR-03-SPA

Minerales: pirita + esfalerita (2) + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + calcopirita (2) ± galena ± bornita

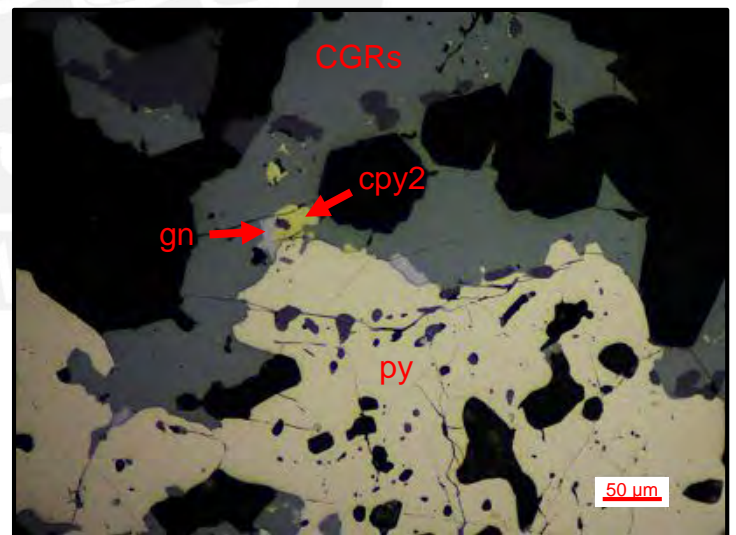
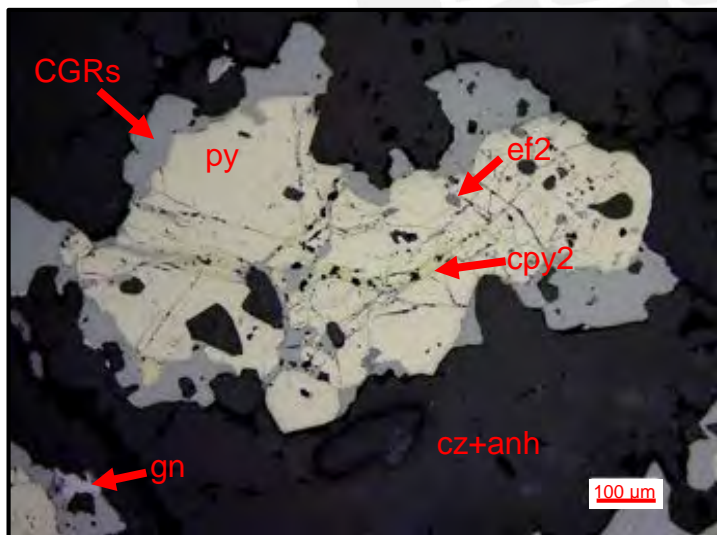
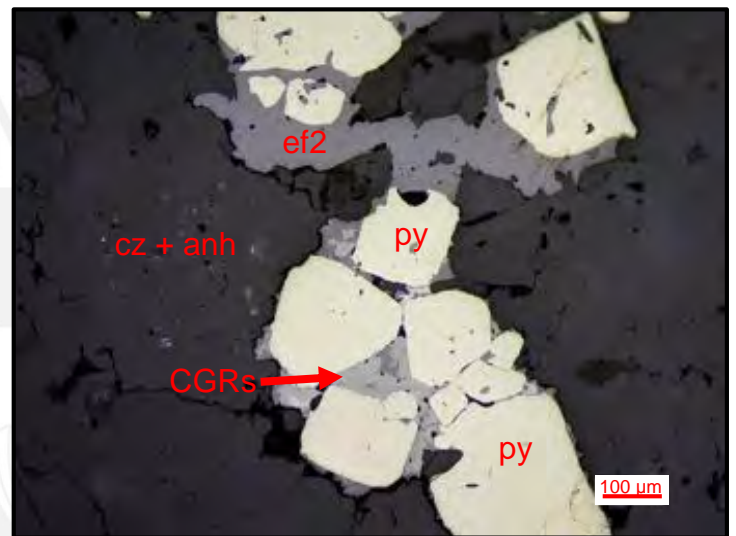
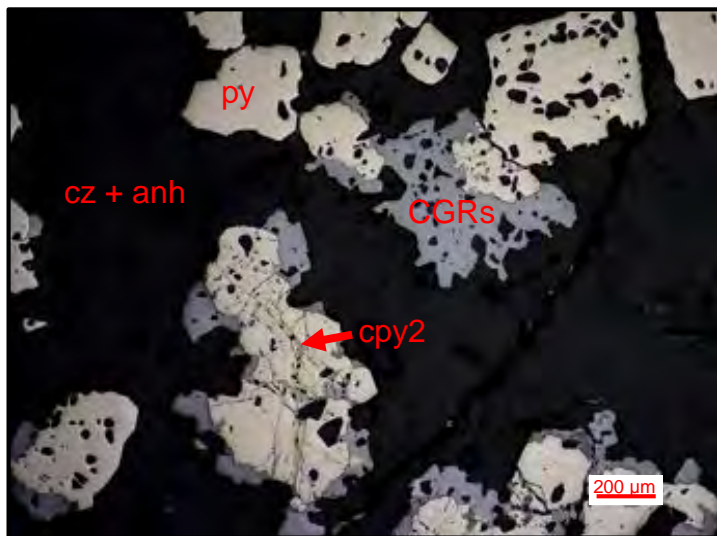
Cristales subhedrales de pirita reemplazados por esfalerita (2) y cobres grises (tetraedrita-tennantita) a través de bordes y cavidades. Escasos cristales subredondeados de calcopirita (2) presentes como inclusiones al interior de la esfalerita 2, así como trazas de galena y bornita con tamaños de hasta 30 µm y 10 µm, respectivamente.



2019-MOR-03-SPB

Minerales: pirita + cobres grises (tetraedrita y tennantita) + esfalerita (2) + galena + calcopirita (2) ± bornita

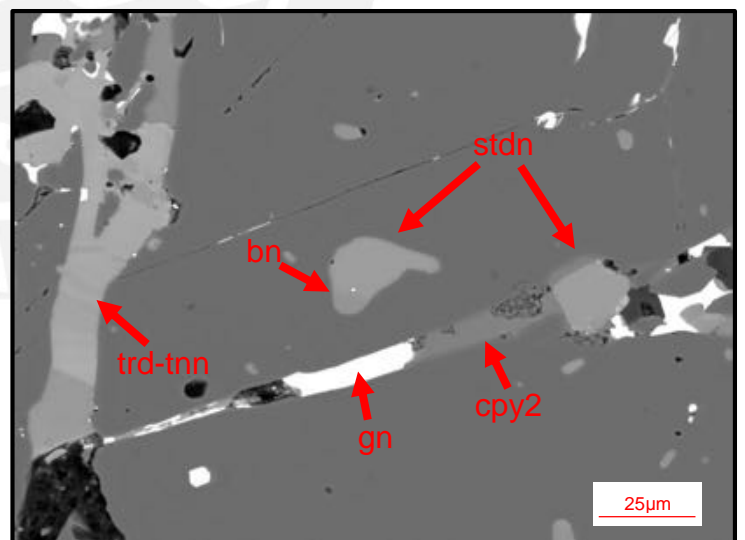
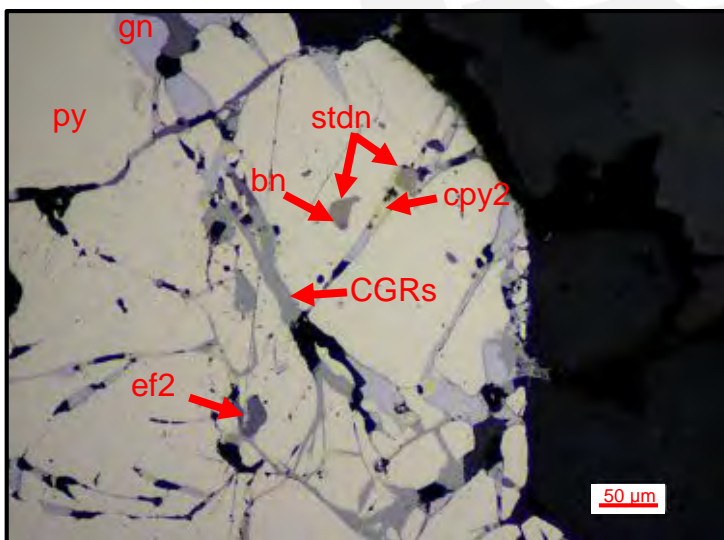
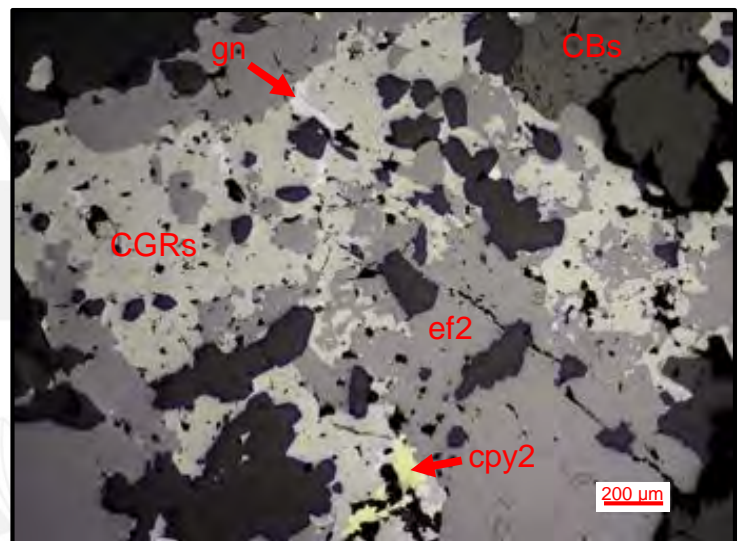
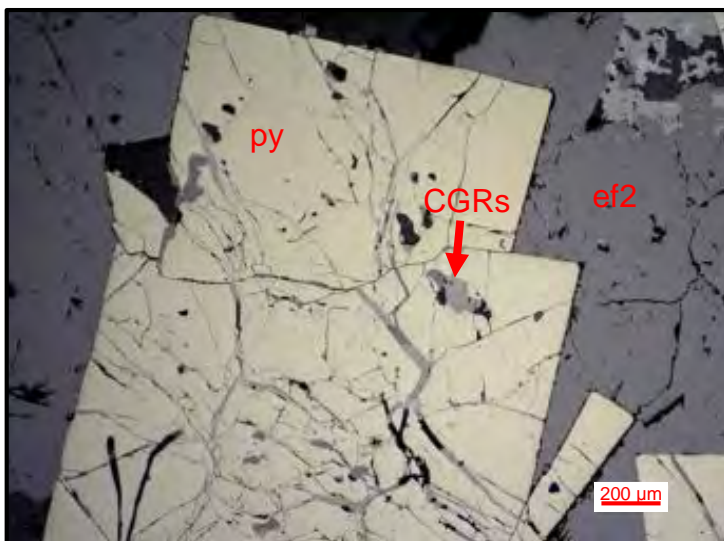
Agregados anhedrales a subhedrales de pirita microfracturados y con textura cataclástica, que han sido rellenos a través de microfracturas y porosidades por calcopirita (2), esfalerita (2), galena y cobres grises (tetraedrita-tennantita). De manera puntual, bornita en porosidades de pirita con dimensiones de hasta 10 µm.



2019-MOR-03-SPC

Minerales: pirita + esfalerita (2) + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + galena + calcopirita (2) ± bornita ± digenita ± oropimente ± estanoidita ± vinciennita

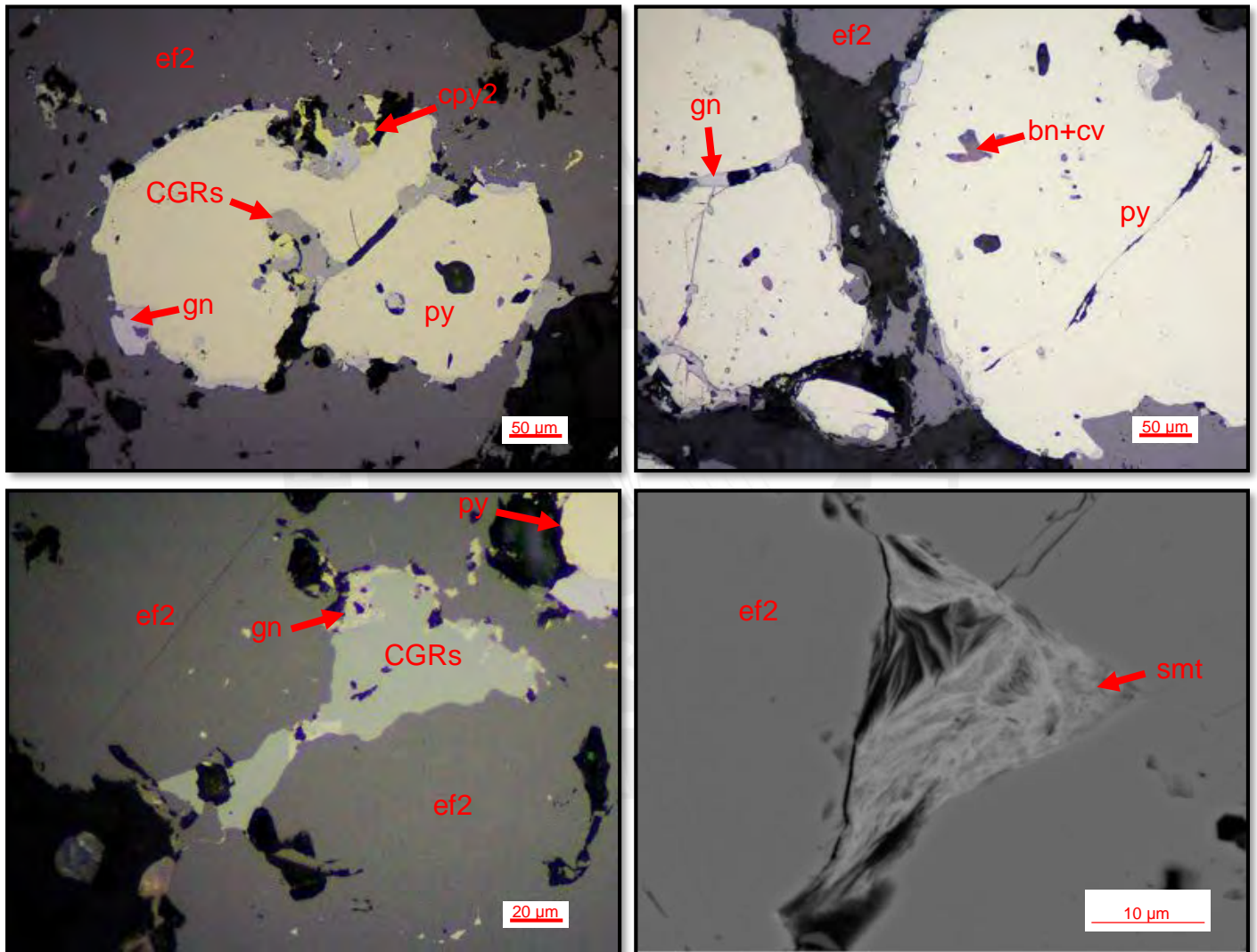
Cristales anhedrales a euhedrales de pirita en matriz de cuarzo, carbonatos, anhidrita y yeso, cuyas microfracturas y porosidades han sido rellenas por esfalerita (2), galena y cobres grises (tetraedrita-tennantita). Trazas de bornita y digenita en porosidades de 84 µm y 12 µm, respectivamente. Trazas de estanoidita (30 µm) y vinciennita (15 µm) como inclusiones en cobres grises y galena.



2019-MOR-04-SPA

Minerales: esfalerita (2) + pirita + galena + cobres grises (tetraedrita y tennantita) ± calcopirita (2) ± bornita ± covelita ± hessita ± smithita (?)

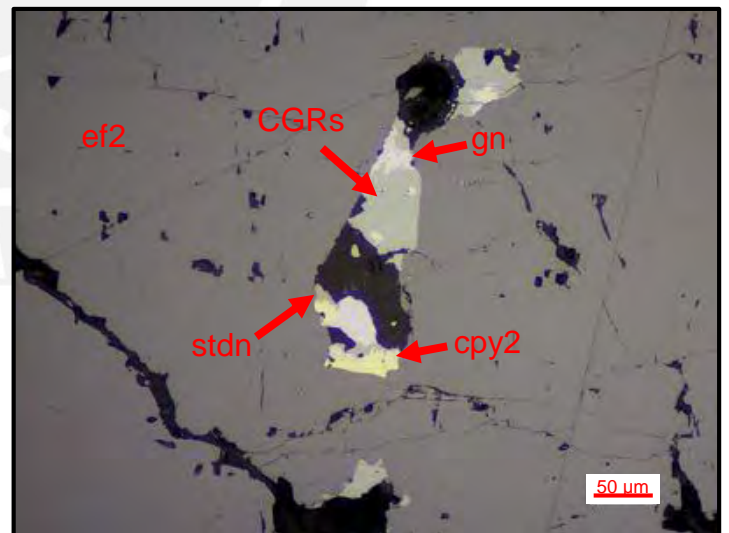
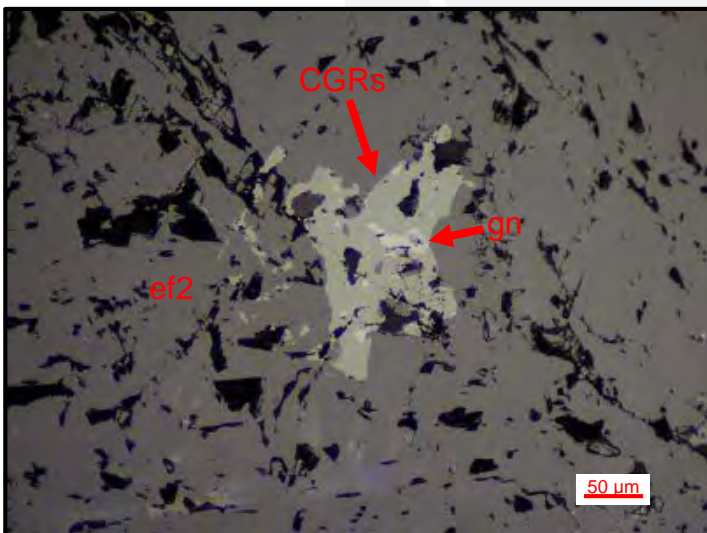
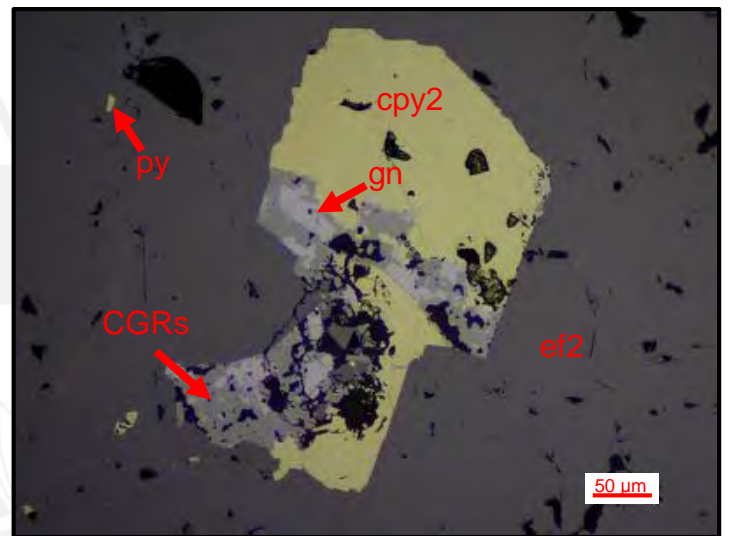
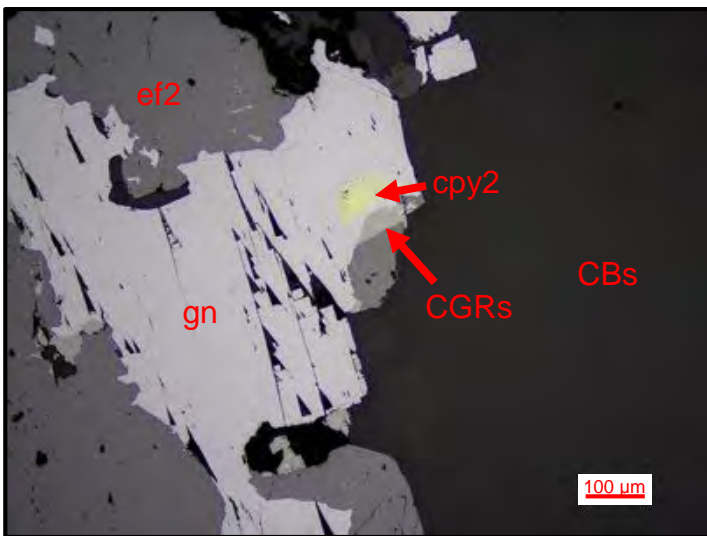
Cristales anhedrales de pirita disseminados en carbonatos, cuarzo, yeso y anhidrita, reemplazados por esfalerita (2); esta última con inclusiones de calcopirita (2) con bordes por galena, cobres grises (tetraedrita-tennantita) y hessita (12 µm). Escasos cristales de bornita, smithita (?) y covelita en porosidades de pirita.



2019-MOR-04-SPB

Minerales: esfalerita (2) + galena + calcopirita (2) ± cobres grises (tetraedrita-tennantita) ± pirita ± estanoidita

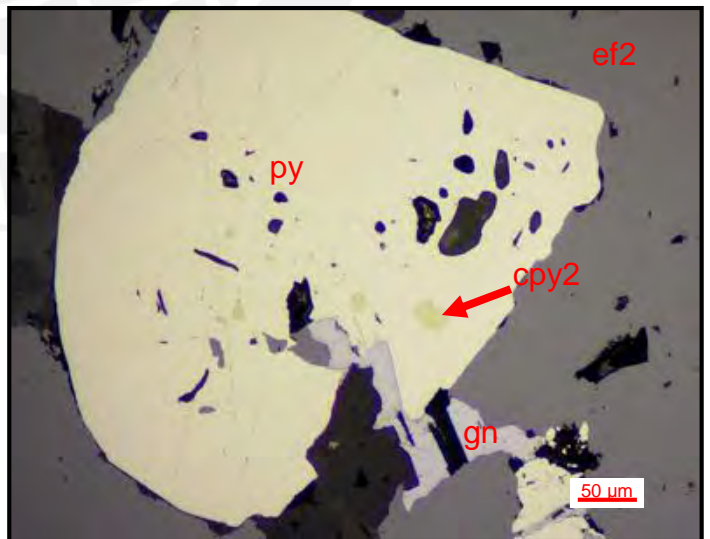
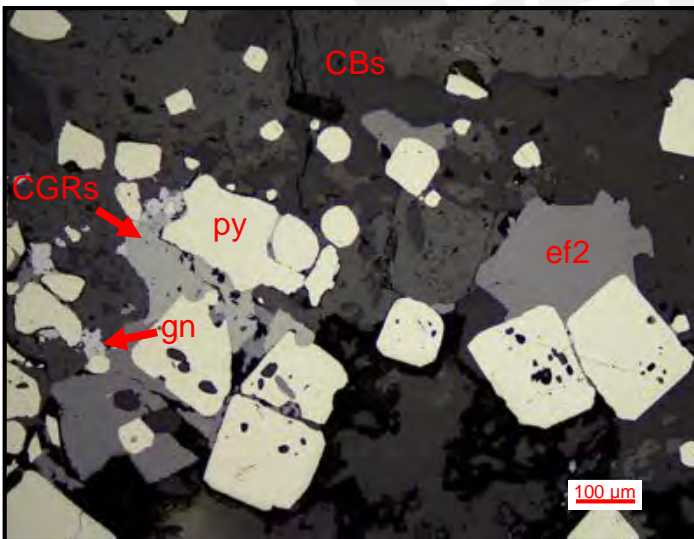
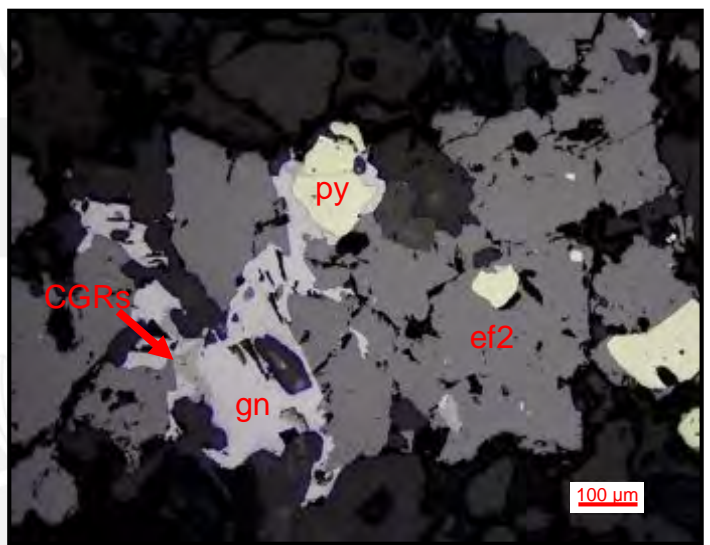
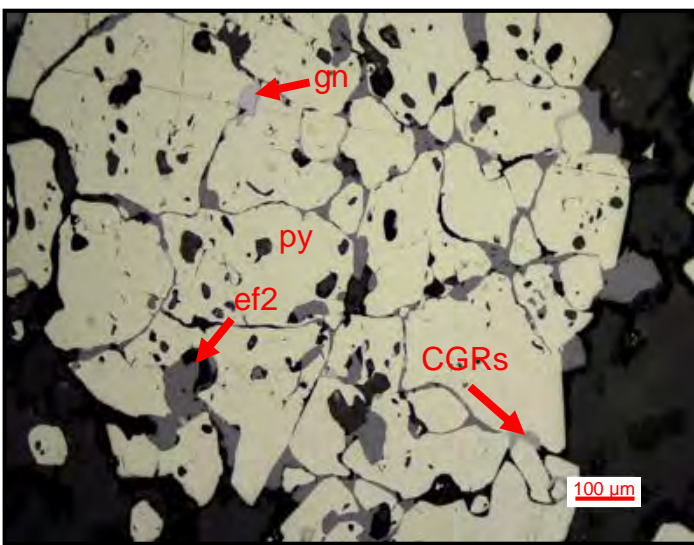
Escasos cristales anhedrales de pirita en matriz de carbonatos, yeso y anhidrita. Esfalerita (2) masiva con porosidades ocupadas por calcopirita (2); este último reemplazado por galena y cobres grises (tetraedrita-tennantita). De manera puntual, se observa una porosidad ocupada por galena, cobres grises, calcopirita (2) y estanoidita.



2019-MOR-04-SPC

Minerales: pirita + esfalerita (2) + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + galena ± calcopirita (2) ± bornita

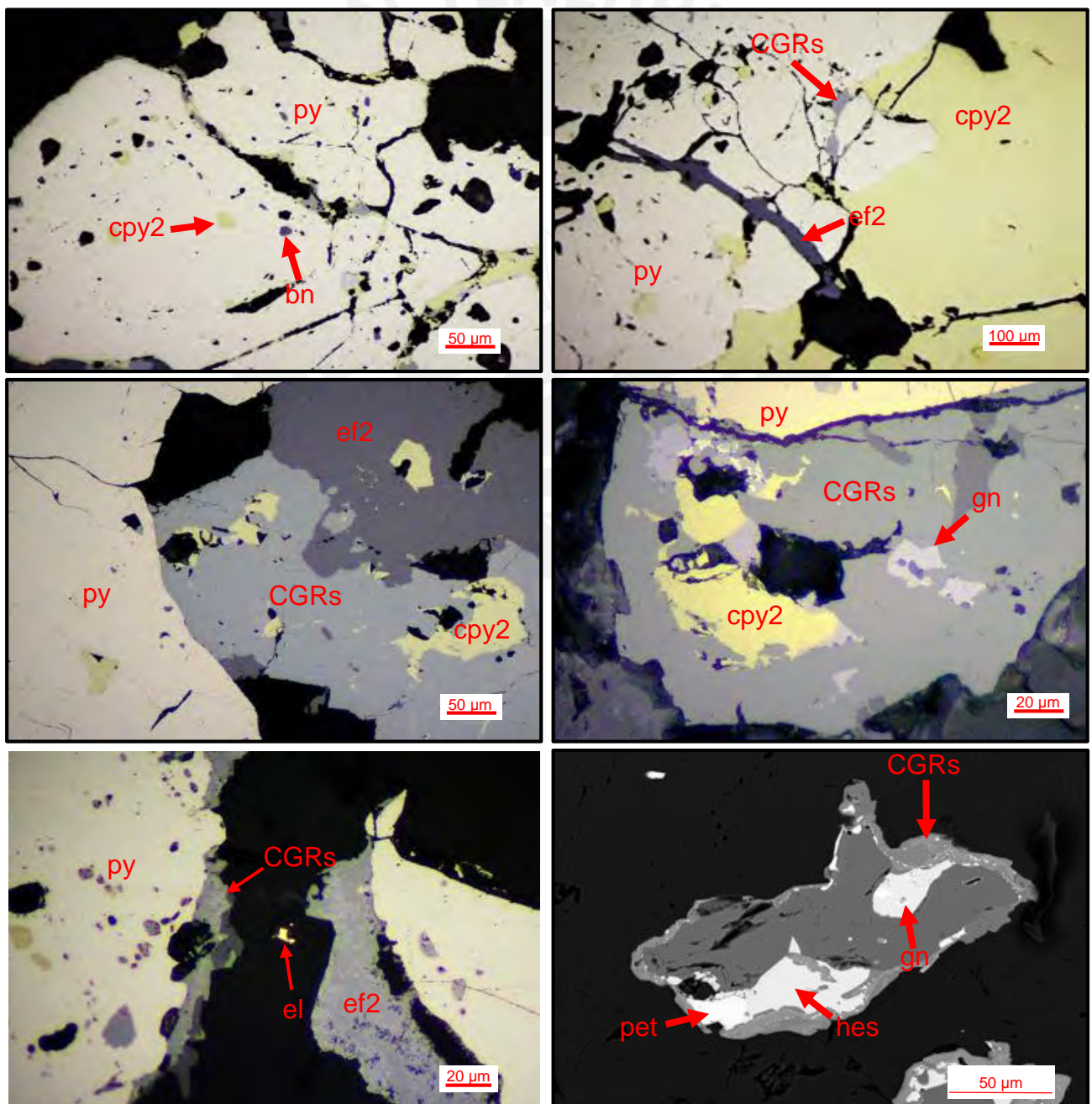
Cristales anhedrales a euhedrales de pirita con textura cataclástica, reemplazados por esfalerita (2), galena y en menor proporción, por cobres grises (tetraedrita-tennantita) desde sus bordes y microfracturas. De manera puntual, pequeños cristales de bornita en porosidades de pirita con tamaños de hasta 10 µm.



2019-MOR-05-SPA

Minerales: calcopirita (2) + pirita + esfalerita (2) + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + galena + wolframita ± bornita ± digenita ± telurobismutita ± hessita ± luzonita-estibiolumonita ± enargita ± petzita ± electrum ± proustita

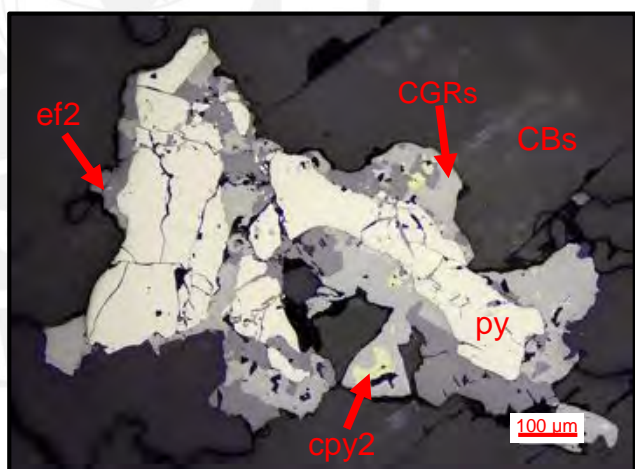
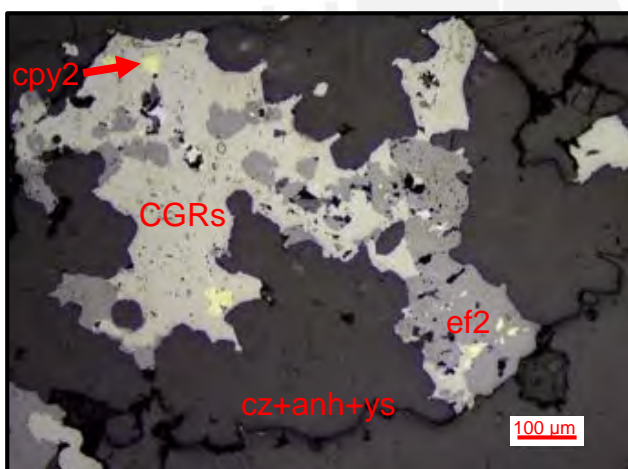
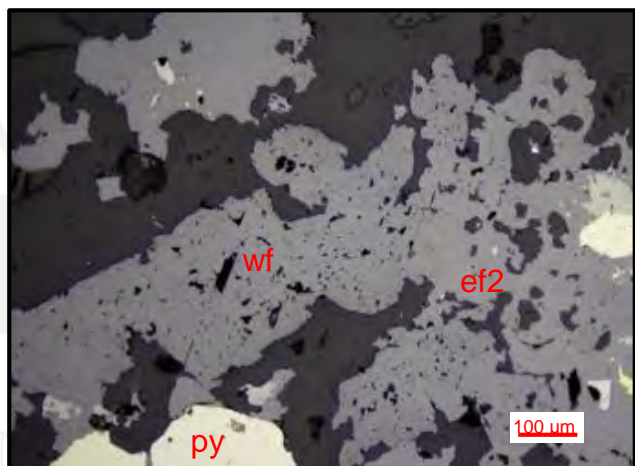
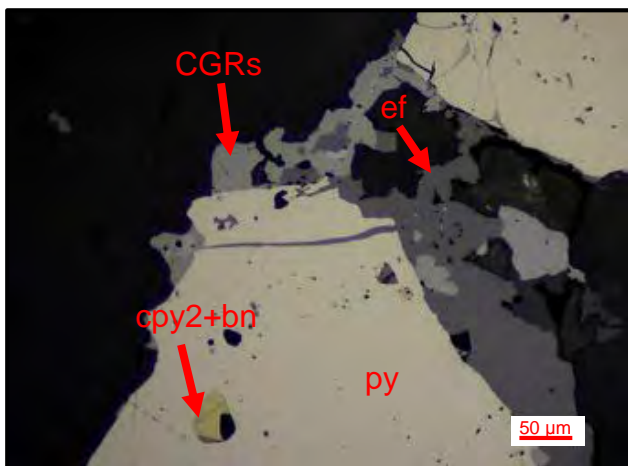
Agregados anhedrales de pirita en matriz de cuarzo, yeso y carbonatos reemplazados por calcopirita (2) y, en menor proporción, por cobres grises y esfalerita (2) a través de sus bordes, microfracturas y porosidades. Trazas de telurobismutita, bornita, digenita, covelita, luzonita-estibiolumonita y enargita en porosidades de pirita y, hessita como reemplazo de cobres grises (tetraedrita-tennantita) y calcopirita (2) y, en contacto con petzita. De manera puntual, presencia de electrum (8 µm) y proustita (3 µm) en porosidad de carbonato.



2019-MOR-05-SPB

Minerales: Pirita + Esfalerita (2) + Cobres grises (Tetraedrita-tennantita) + Calcopirita (2) + Wolframita ± Galena ± Bornita ± Digenita

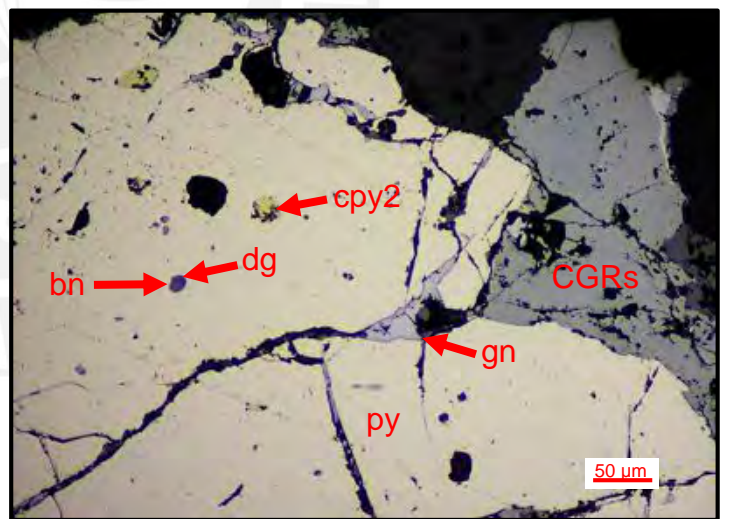
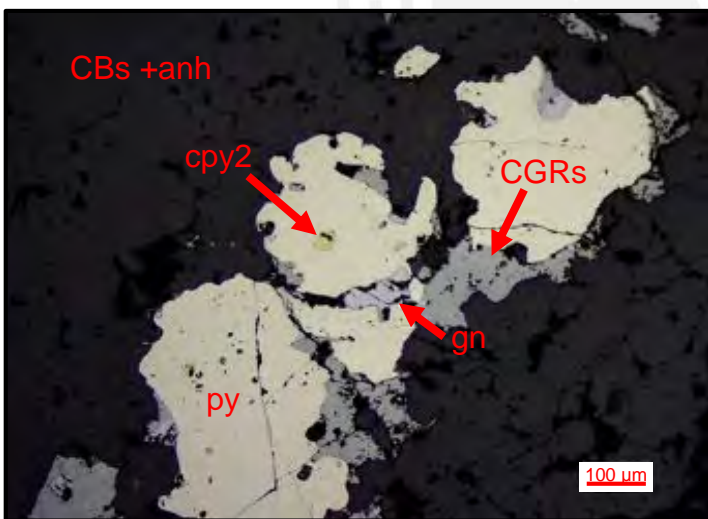
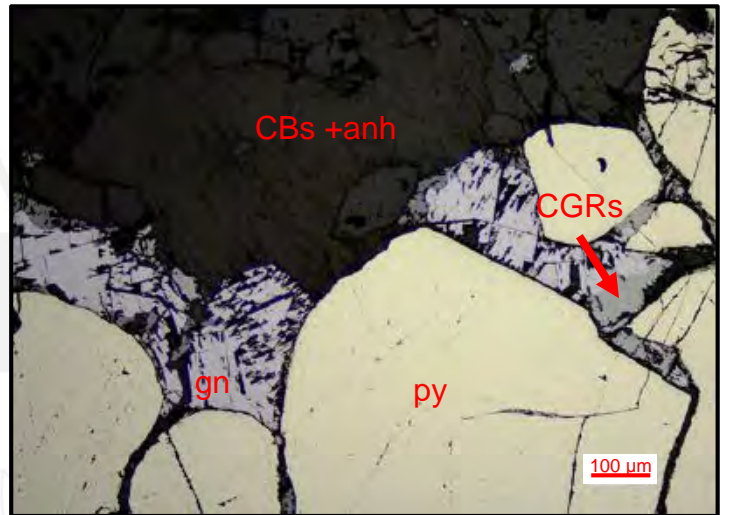
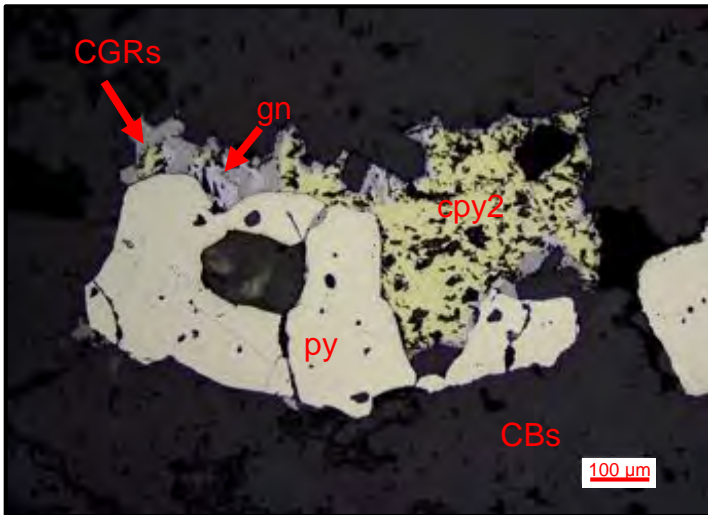
Agregados anhedrales a subhedrales de pirita en matriz de cuarzo, yeso y anhidrita, con oclusiones de wolframita y reemplazados por esfalerita (2), calcopirita (2), galena y cobres grises (tetraedrita-tennantita) a través de bordes y microfracturas. Por sectores, la calcopirita (2) aparece en contacto con bornita y digenita como relleno de porosidades en pirita.



2019-MOR-06-SPA

Minerales: Esfalerita (2) + Pirita + Galena + Cobres grises (Tetraedrita-Tennantita) + Calcopirita (2) ± Bornita ± Digenita

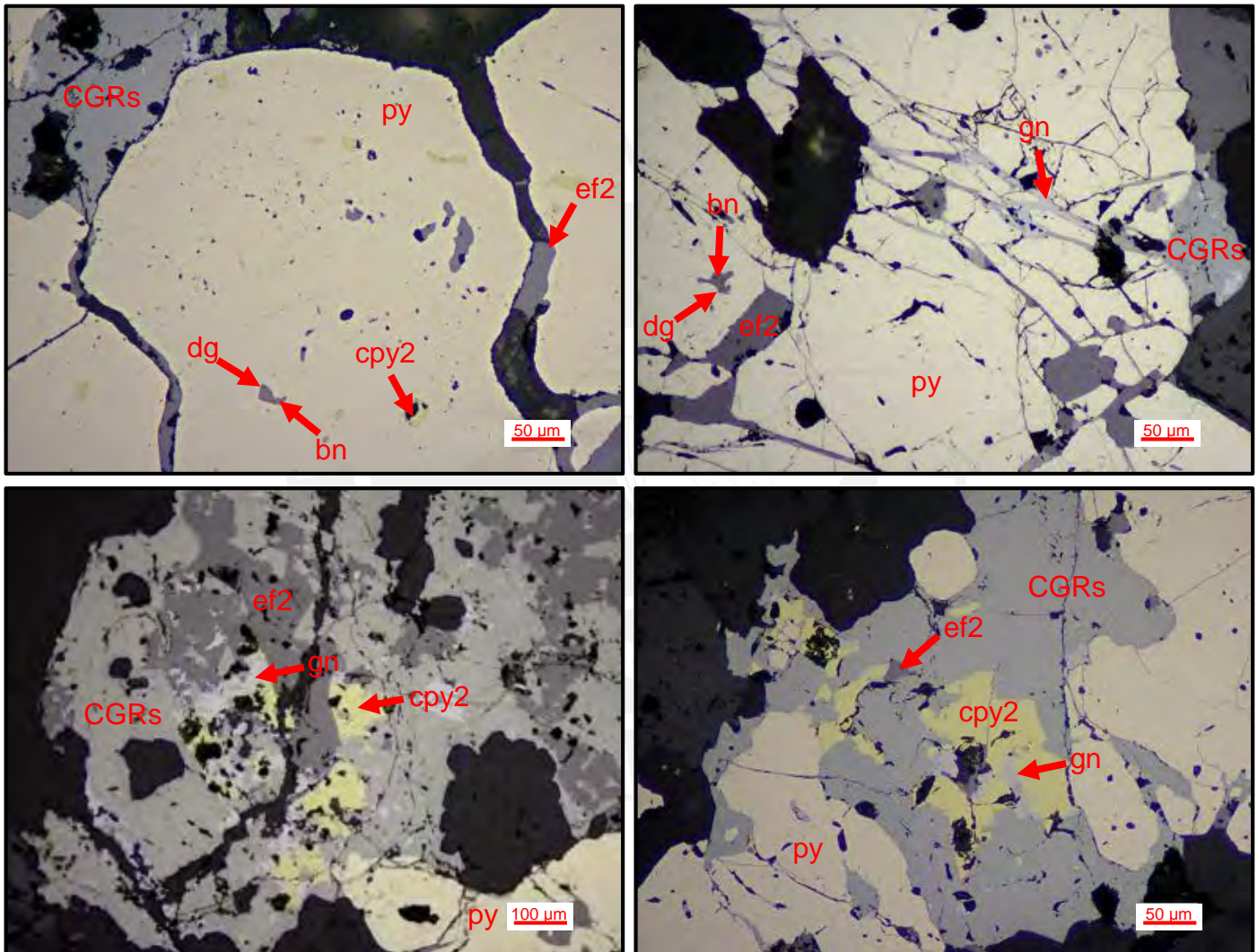
Agregados anhedrales a subhedrales de pirita en matriz de cuarzo, anhidrita y carbonatos, que han sido reemplazados y rellenos a través de sus microfracturas por esfalerita (2), cobres grises (tetraedrita-tennantita) y galena. Trazas de bornita y digenita con tamaños de hasta 10 y 5 µm, respectivamente en porosidades de pirita.



2019-MOR-06-SPB

Minerales: pirita + esfalerita (2) + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + calcopirita (2) + galena ± bornita ± digenita

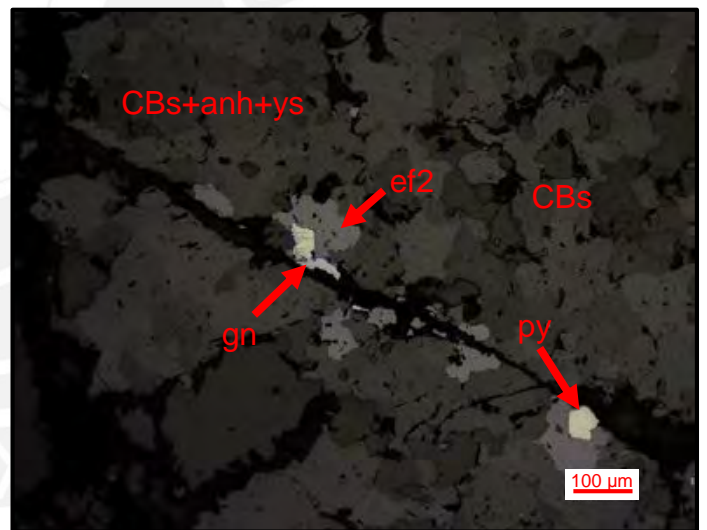
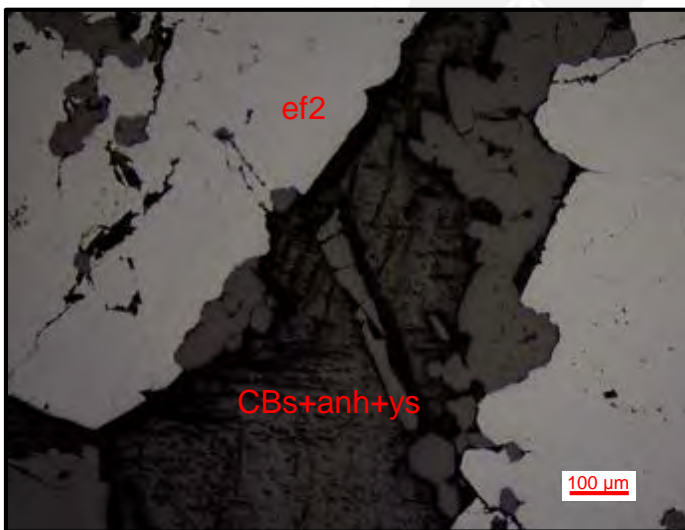
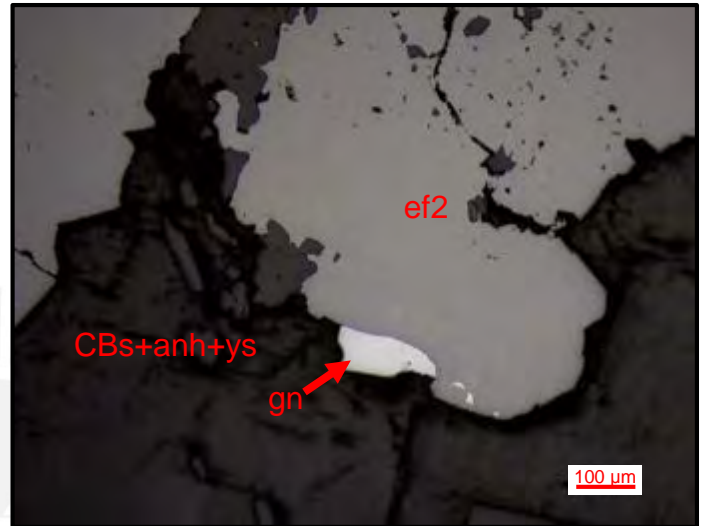
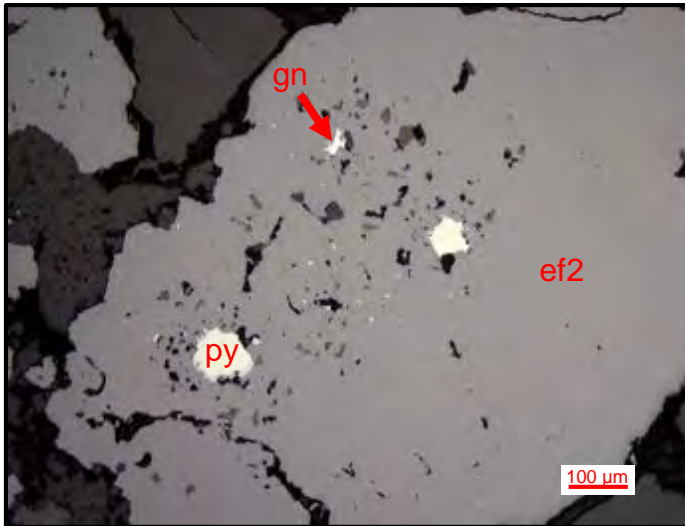
Cristales anhedrales a subhedrales de pirita que han sufrido un fuerte brechamiento, que originó microfracturas y porosidades que en el proceso han sido ocupadas por esfalerita (2), calcopirita (2), cobres grises (tetraedrita-tennantita) y galena. Por sectores, se observan cobres grises mostrando textura mirmequítica en galena.



2019-MOR-07-SP

Minerales: esfalerita (2) + pirita ± galena

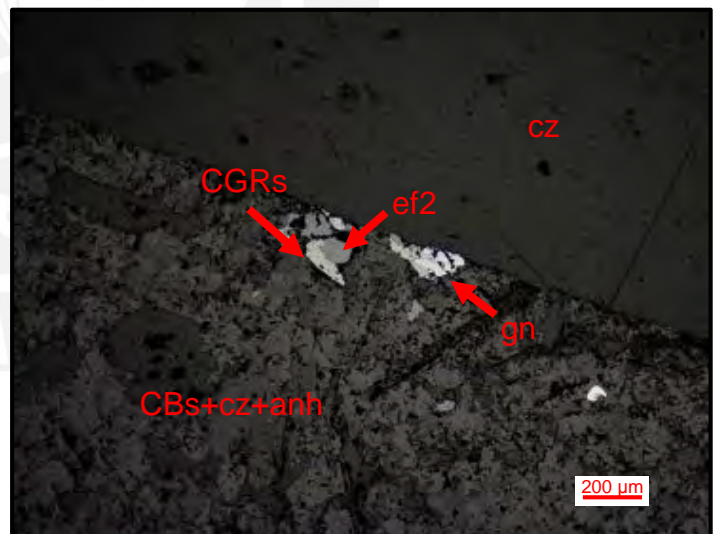
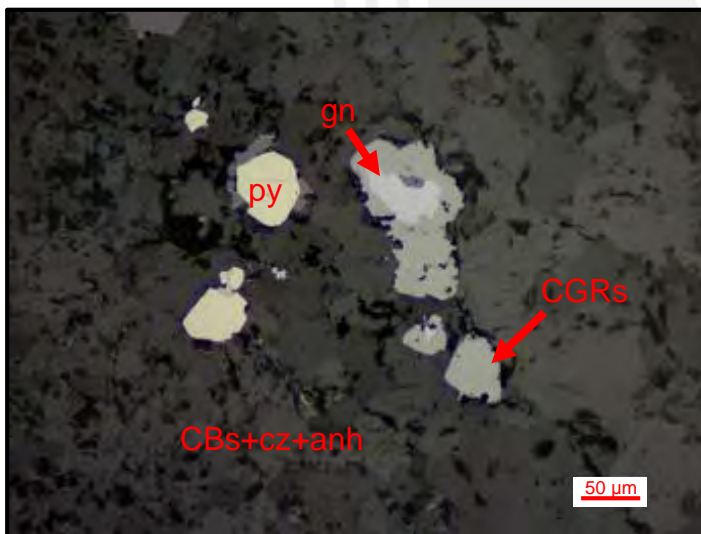
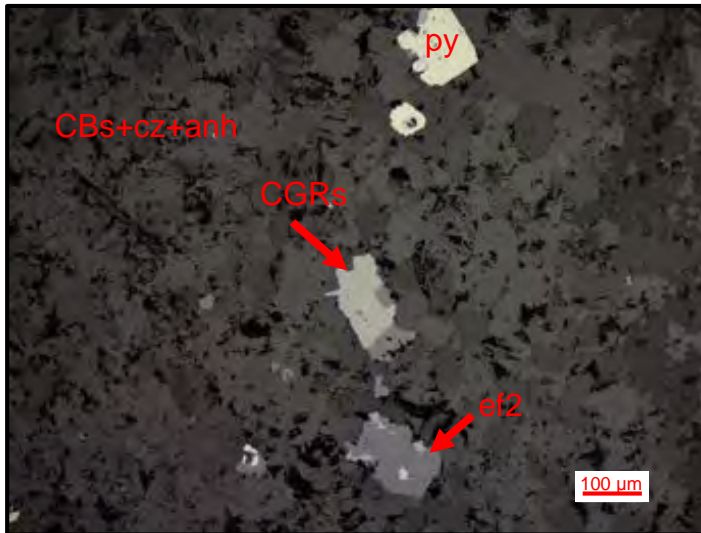
Esfalerita (2) masiva en matriz de cuarzo, anhidrita y carbonatos, con oclusiones de pirita (150 μm) e inclusiones de galena (180 μm).



019-MOR-08-SP

Minerales: pirita + galena + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + esfalerita (2)

Matriz compuesta por cuarzo, anhidrita y carbonatos con disseminaciones de pirita, esfalerita, cobres grises (tetraedrita-tennantita) y galena con tamaños de hasta 600 μm , 400 μm , 200 μm y 250 μm respectivamente.



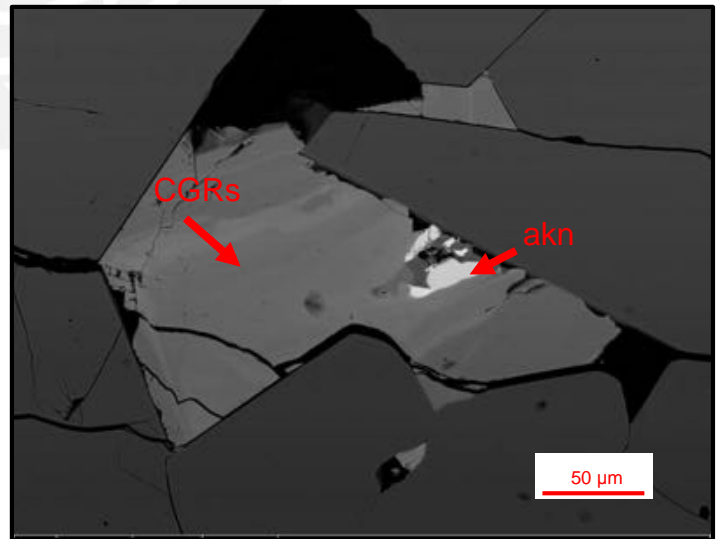
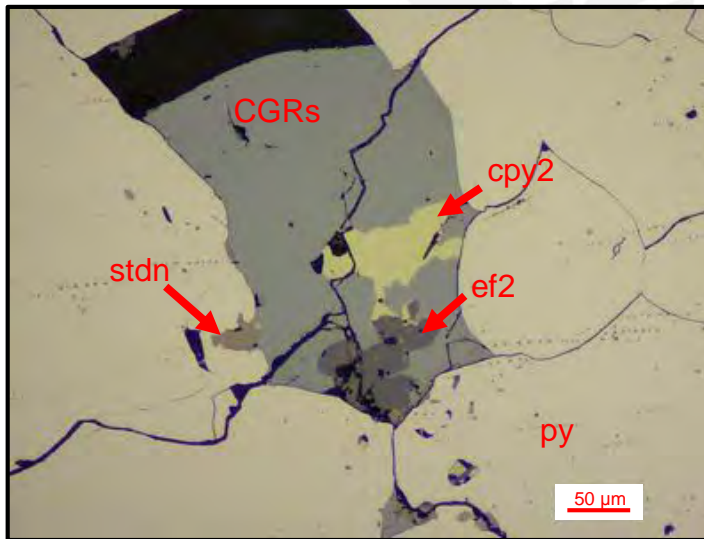
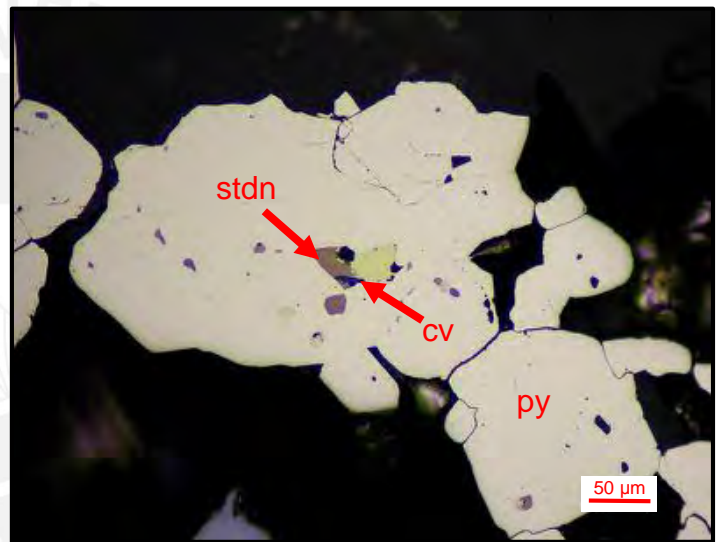
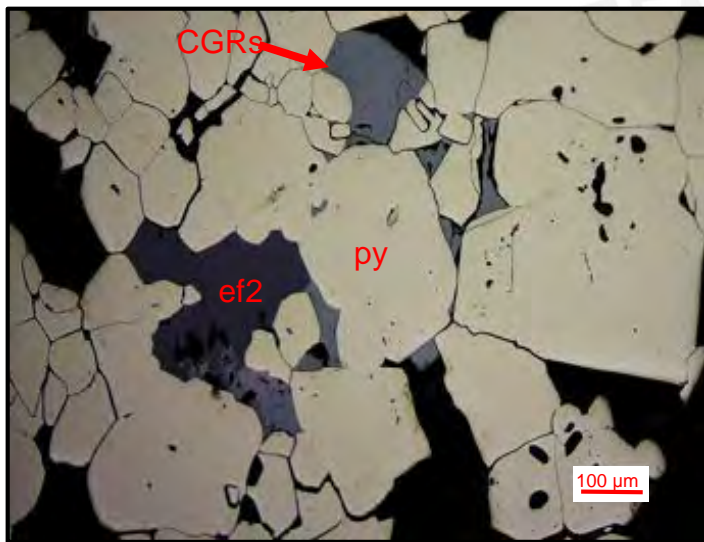
MANTO IVETTE



2019-MOR-09-SP

Minerales: pirita + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + esfalerita (2) + galena + calcopirita (2) ± bornita ± digenita ± covelita ± estanoidita ± aikinita

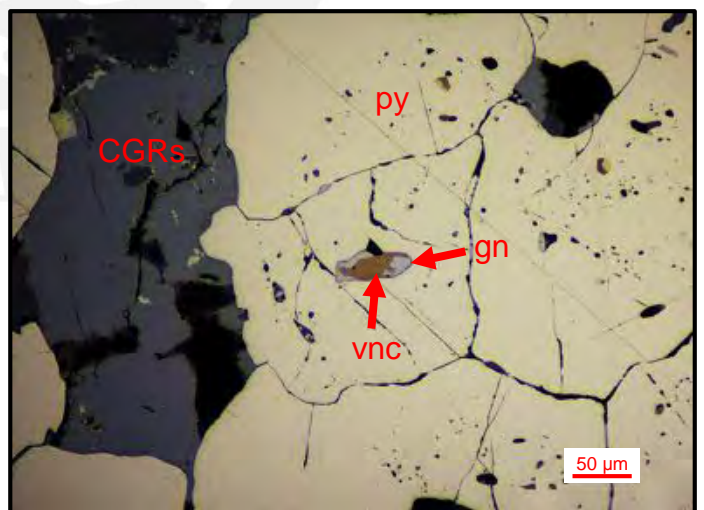
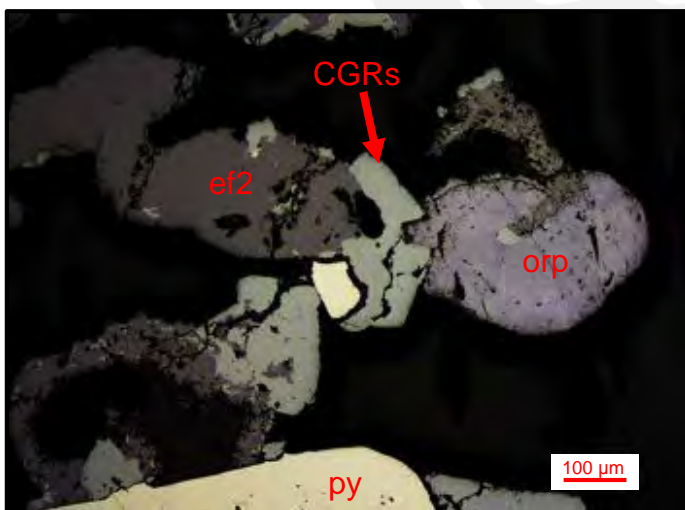
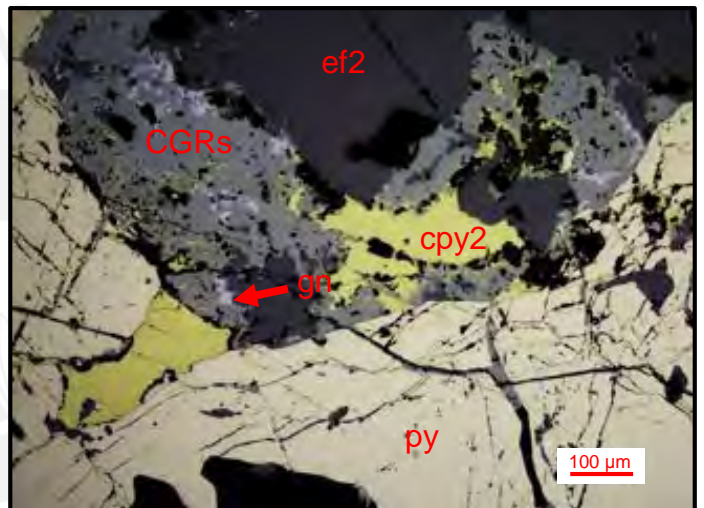
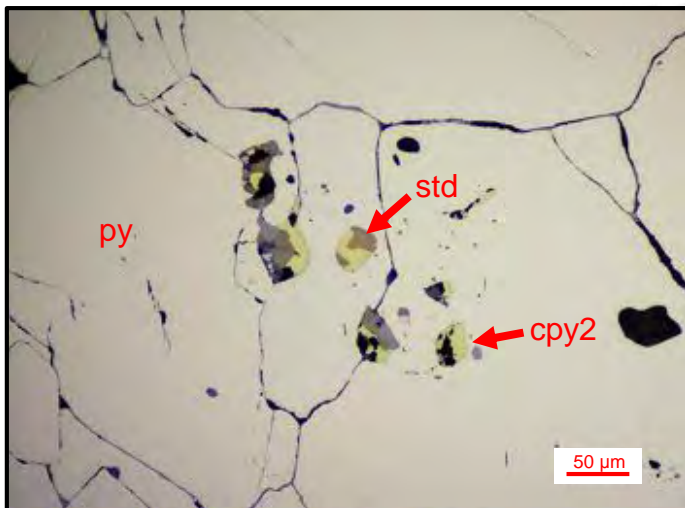
ristales anhedrales a subhedrales de pirita, con intersticios y porosidades ocupados principalmente por esfalerita (2), cobres grises (tetraedrita-tennantita) y galena. Trazas de calcopirita (2), bornita, digenita, estanoidita (40 µm) y covelita como relleno de porosidades en pirita. De manera local, escasos cristales de estanoidita y calcopirita (2) incluidos en cobres grises; este último en contacto con galena y aikinita.



2019-MOR-010-SPA

Minerales: pirita + esfalerita (2) + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + calcopirita (2) ± galena ± bornita ± estanoidita ± vinciennita ± oropimente

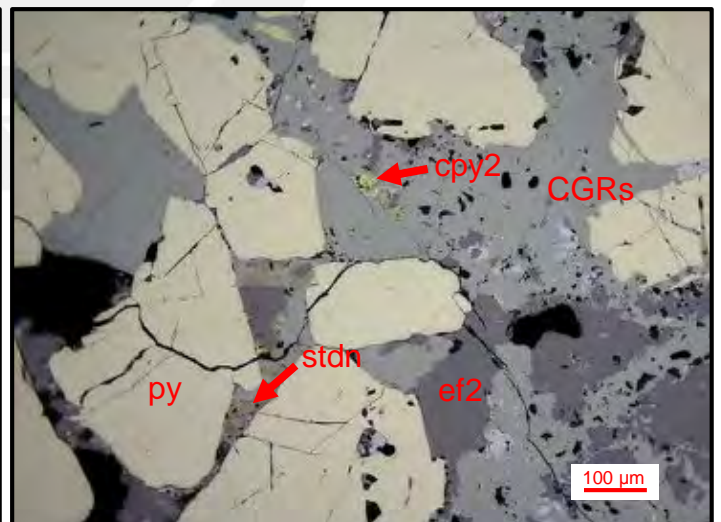
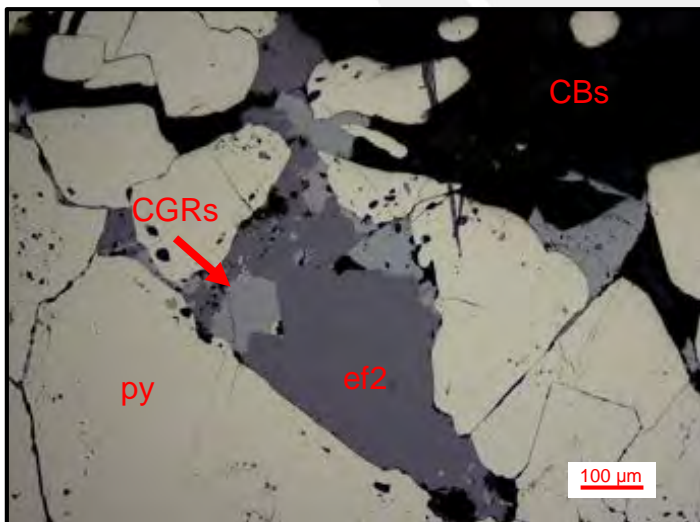
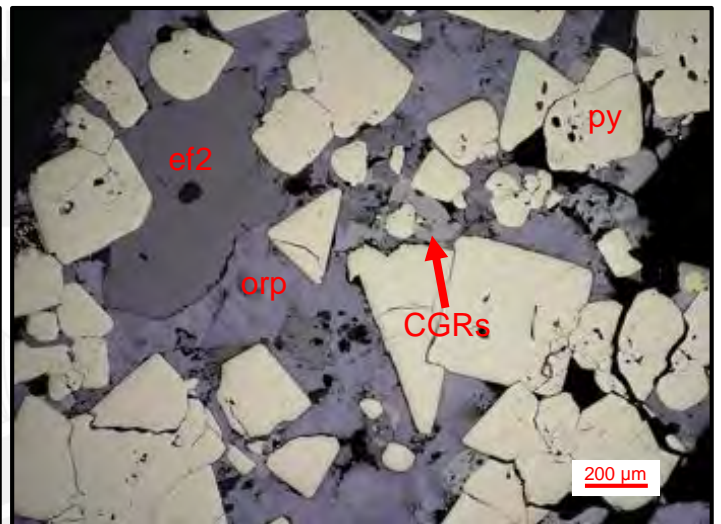
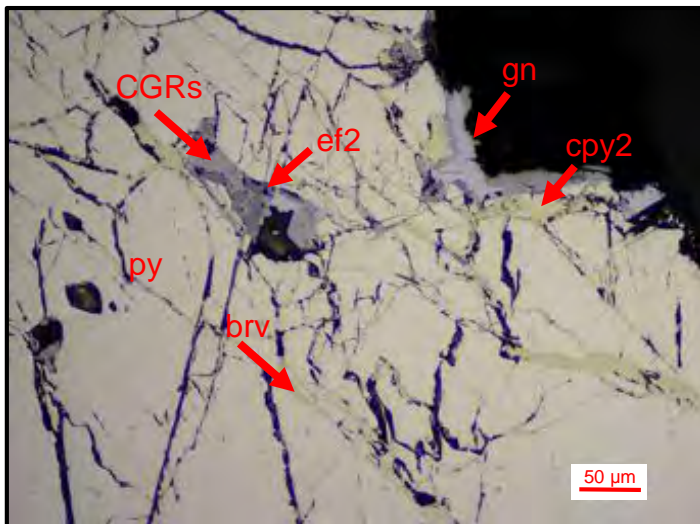
Agregados anhedrales de pirita reemplazados a través de sus microfracturas, intersticios y porosidades por esfalerita (2), cobres grises (tetraedrita-tennantita), galena y oropimente en matriz de carbonatos, anhidrita y cuarzo. Pequeños cristales de estanoidita y vinciennita en porosidades de pirita y cobres grises con dimensiones de 20 y 60 µm, respectivamente.



2019-MOR-010-SPB

Minerales: Pirita + Oropimente + Esfalerita (2) + Cobres grises (tetraedrita-tennantita) + Calcopirita (2) + Galena + Bravoita + Estanoidita ± Vinciennita ± Bornita

Cristales anhedrales a subhedrales de pirita en matriz de carbonatos, reemplazados por esfalerita (2), cobres grises (tetraedrita-tennantita), galena, oropimente y bravoíta. Bornita, colusita, estanoidita y vinciennita como trazas en porosidades de pirita. También, escasos cristales de estanoidita en cobres grises y en contacto con calcopirita (2) con tamaños de hasta 30 µm.

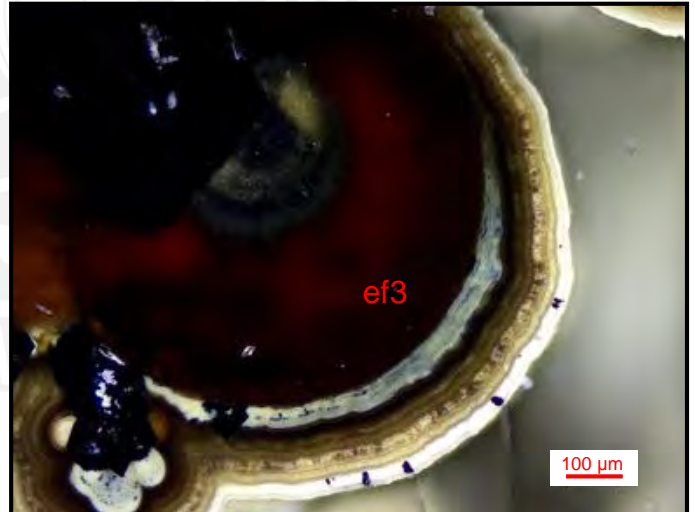
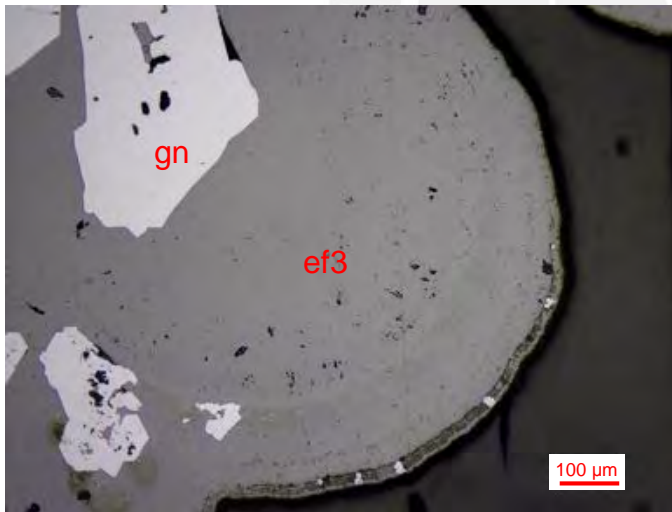
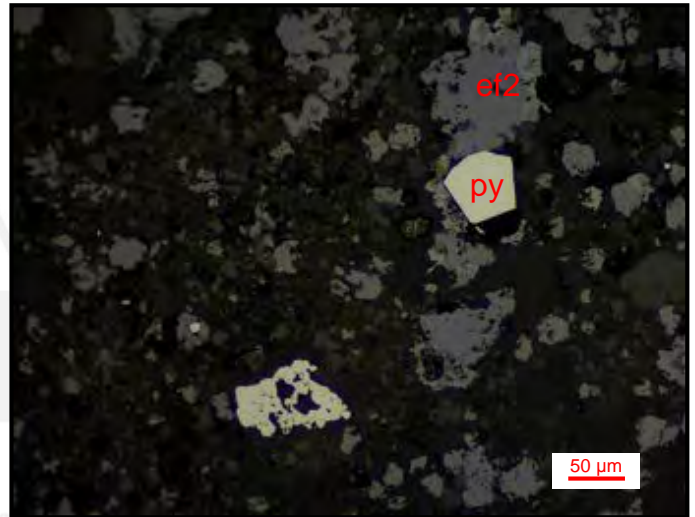
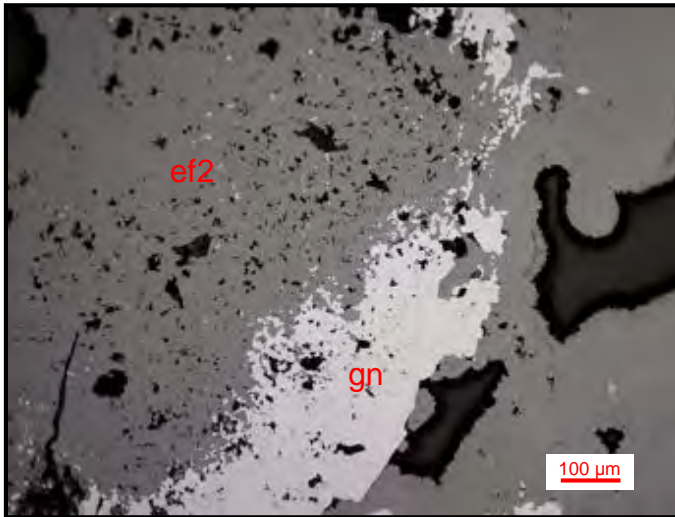


2019-MOR-011-SP

Minerales: esfalerita (3) + galena ± pirita

Agregados coliformes de esfalerita (3) reemplazados por galena y en contacto con yeso.

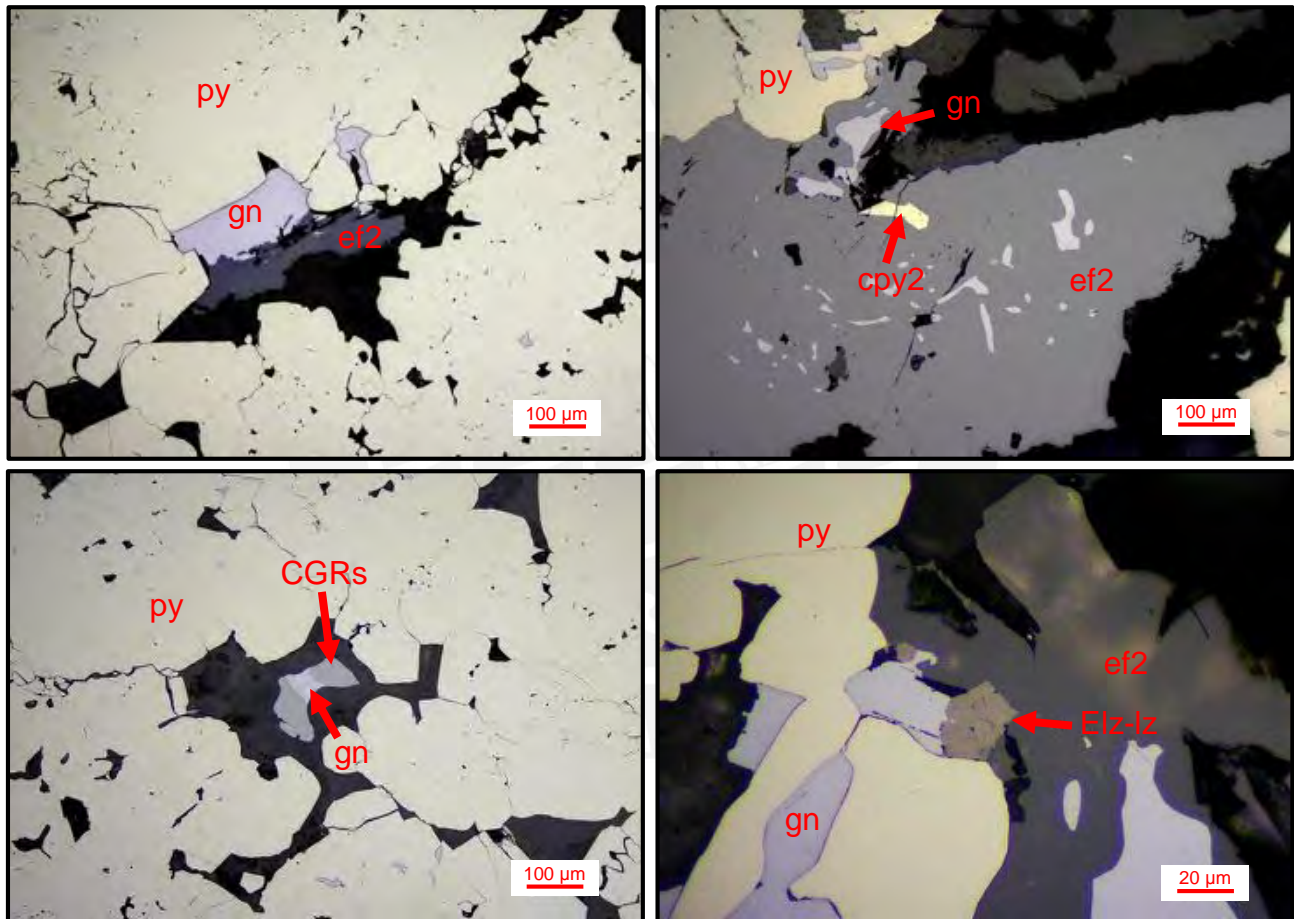
Por sectores, disseminaciones de pequeños cristales de pirita.



2019-MOR-012-SPA

Minerales: pirita + esfalerita (2) + galena + calcopirita (2) ± cobres grises (tetraedrita-tennantita) ± luzonita-estibiolumonita

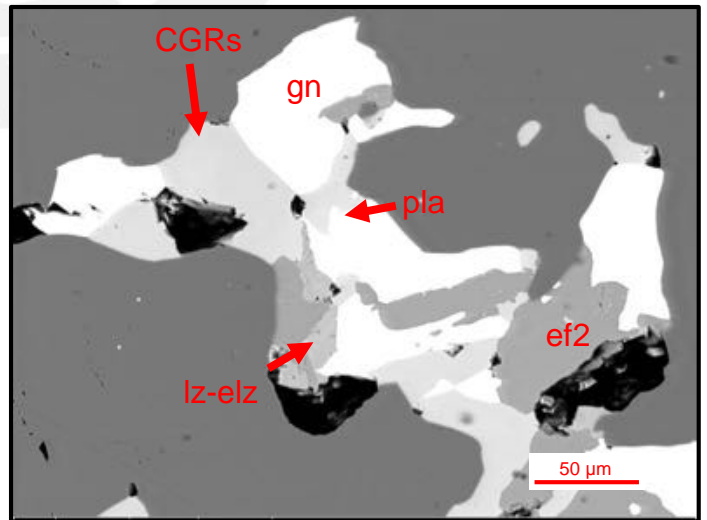
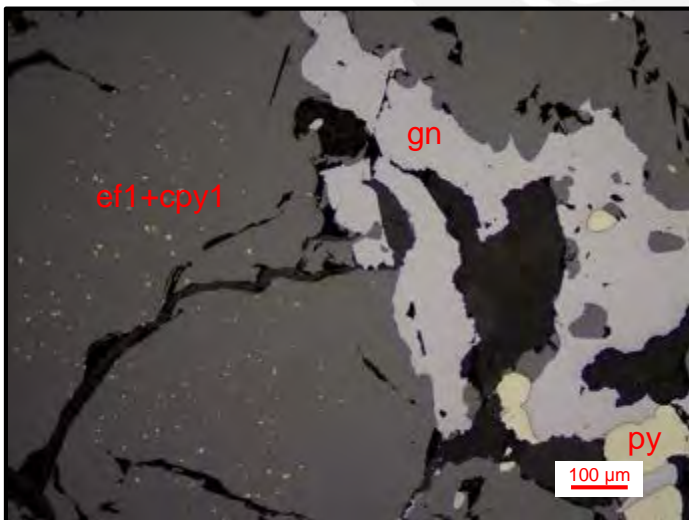
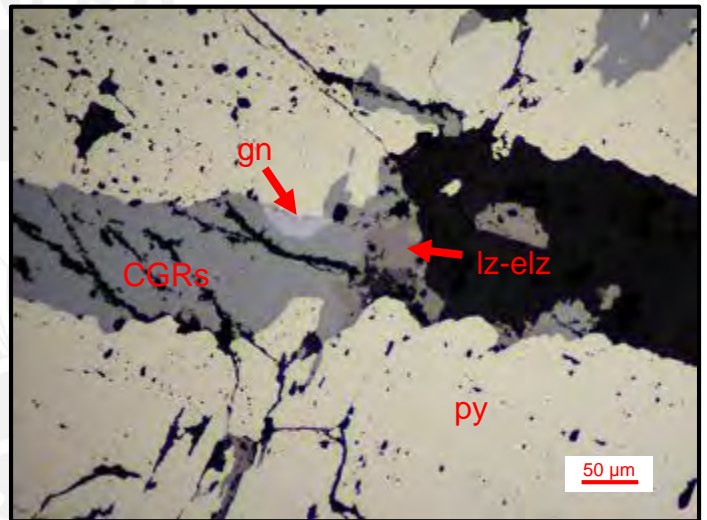
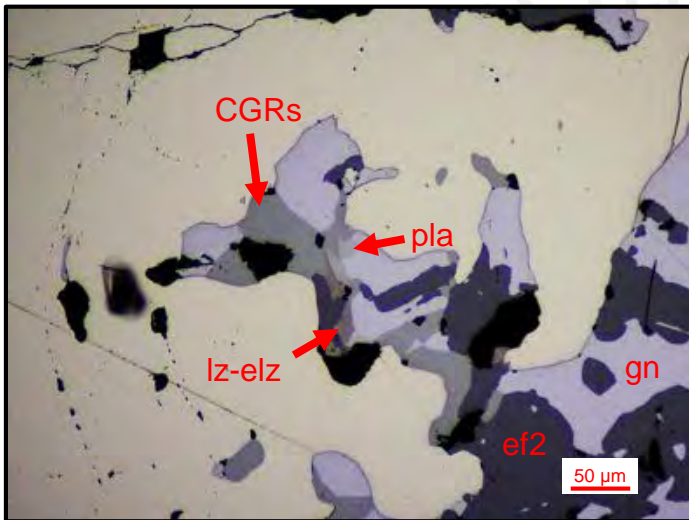
Pirita masiva en matriz de cuarzo que, a través de sus microfisuras y bordes, ha sido rellena y reemplazada principalmente por esfalerita (2), calcopirita (2) y galena. Cobres grises (tetraedrita-tennantita) como trazas en contacto con galena y con dimensiones de hasta 30 µm. De manera puntual, se observa un cristal de luzonita-estibiolumonita (40µm) en bordes de esfalerita y galena.



2019-MOR-012-SPB

Minerales: pirita + esfalerita (2) + galena + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + esfalerita (1) + luzonita-estibiolumonita ± calcopirita (1) ± plagionita (?)

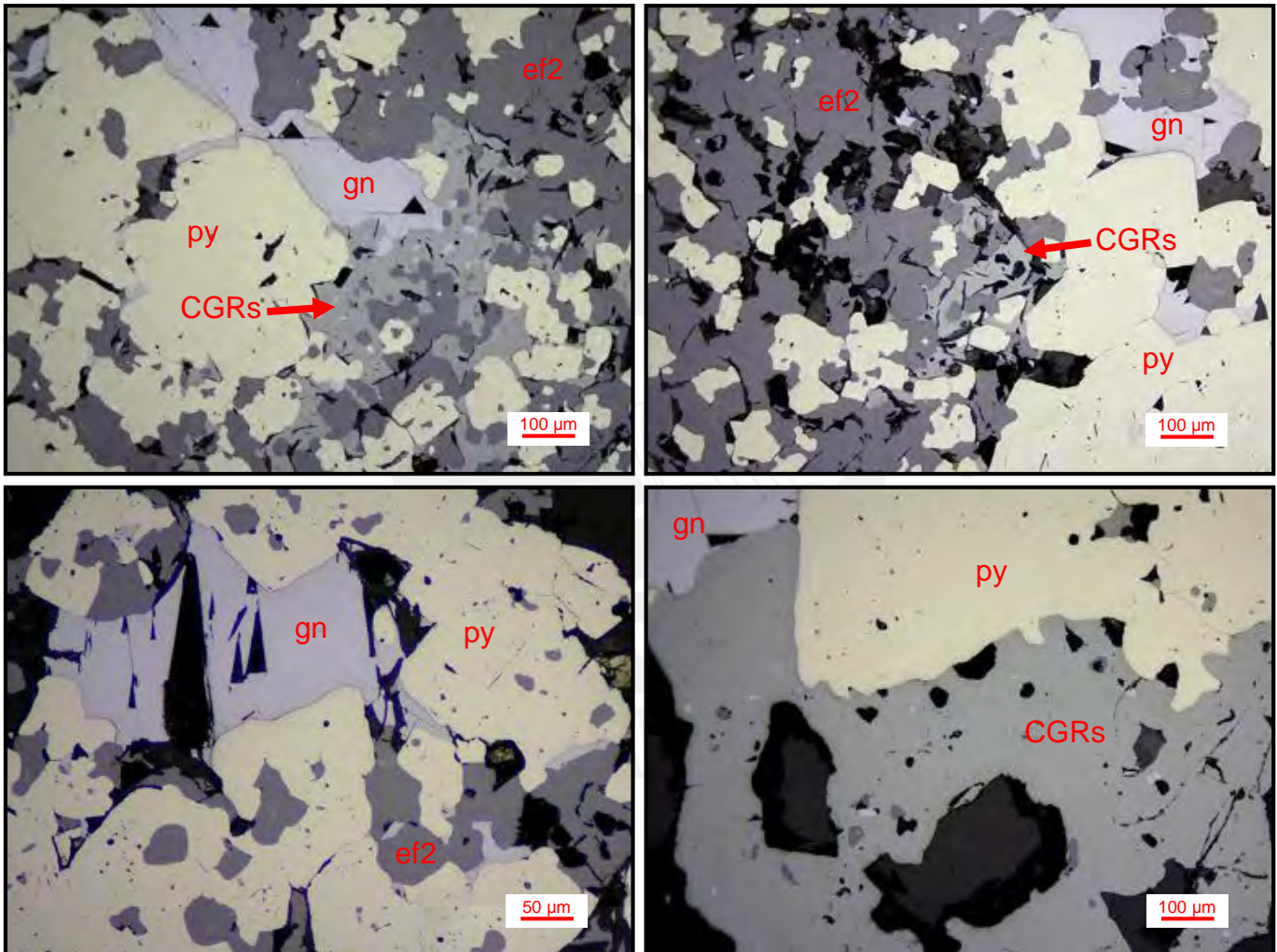
Agregados anhedrales de pirita en matriz de cuarzo y anhidrita que, a través de sus cavidades, bordes y microfracturas han sido reemplazados por esfalerita (2), galena, esfalerita (1) con finas diseminaciones de calcopirita (1) y cobres grises (tetraedrita-tennantita). Al interior de los cobres grises y en contacto con éste, se aprecian escasos cristales de luzonita-estibiolumonita, así como plagionita.



2019-MOR-013-SPA

Minerales: esfalerita (2) + pirita + galena + cobres grises (tetraedrita-tennantita) ± esfalerita (1) ± calcopirita (1)

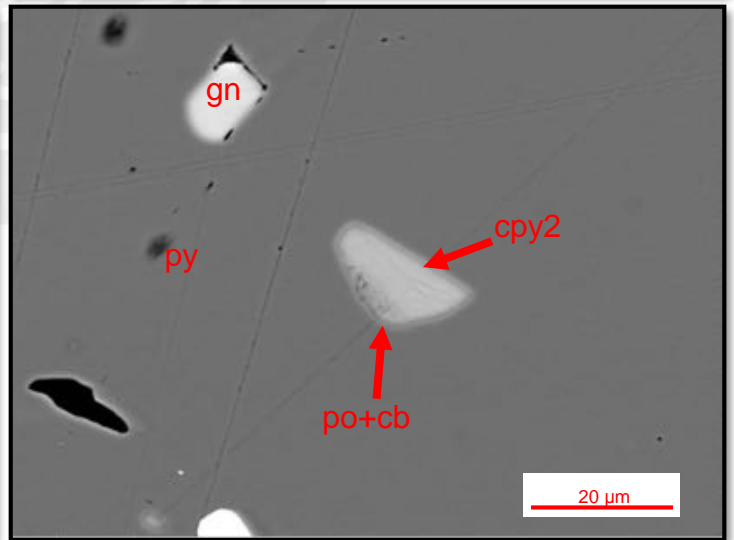
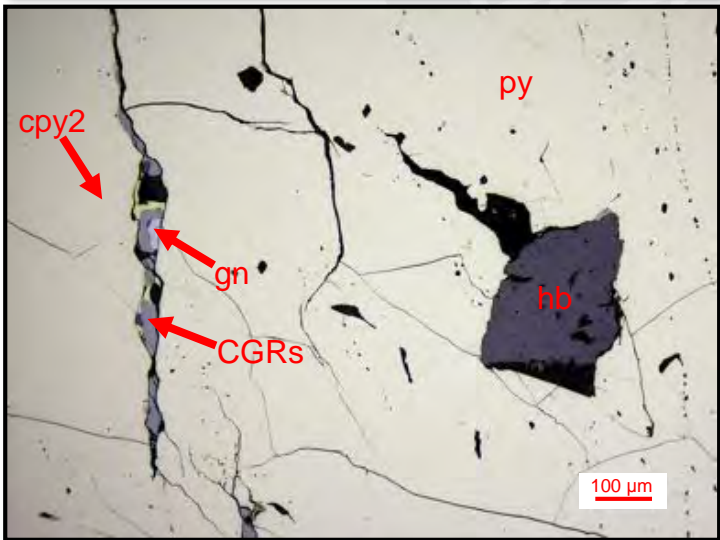
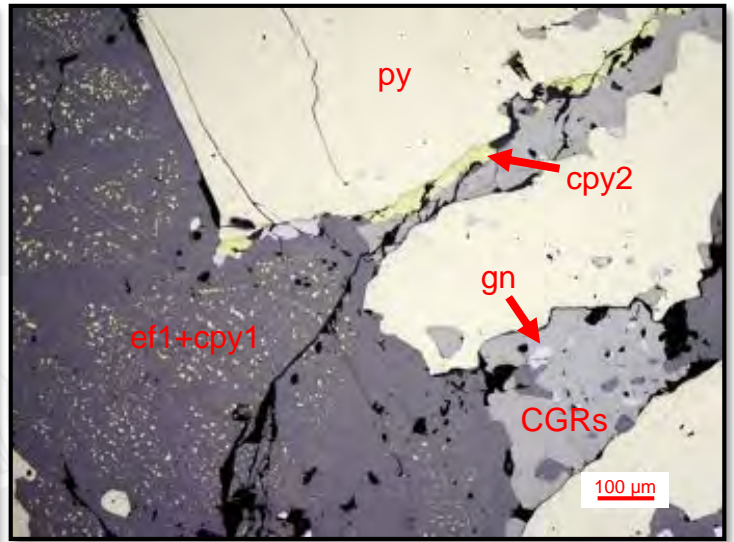
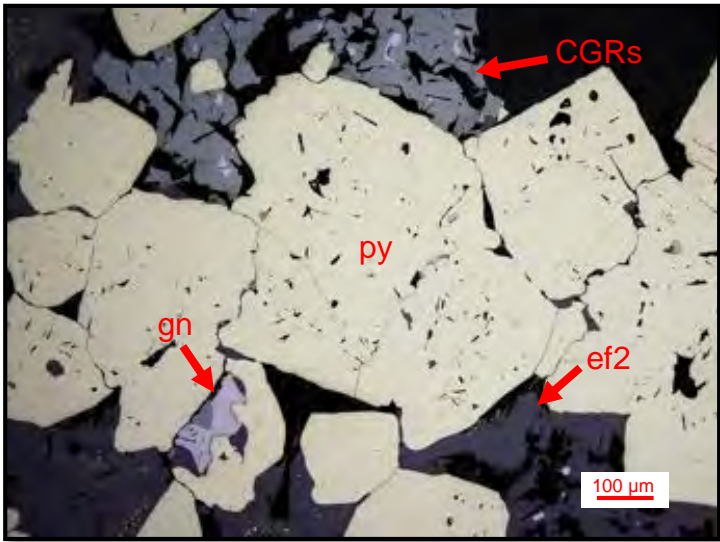
Cristales anhedrales a euhedrales de pirita, reemplazados por esfalerita (2), cobres grises (tetraedrita-tennantita), galena y escasamente, por la primera generación de esfalerita (1) con finas diseminaciones de calcopirita (1).



2019-MOR-013-SPB

Minerales: Pirita + Esfalerita (1) + Cobres grises (tetraedrita-tennantita) + Calcopirita (2) + Galena ± Calcopirita (1) ± Bornita ± Pirrotina ± cubanita ± hubnerita

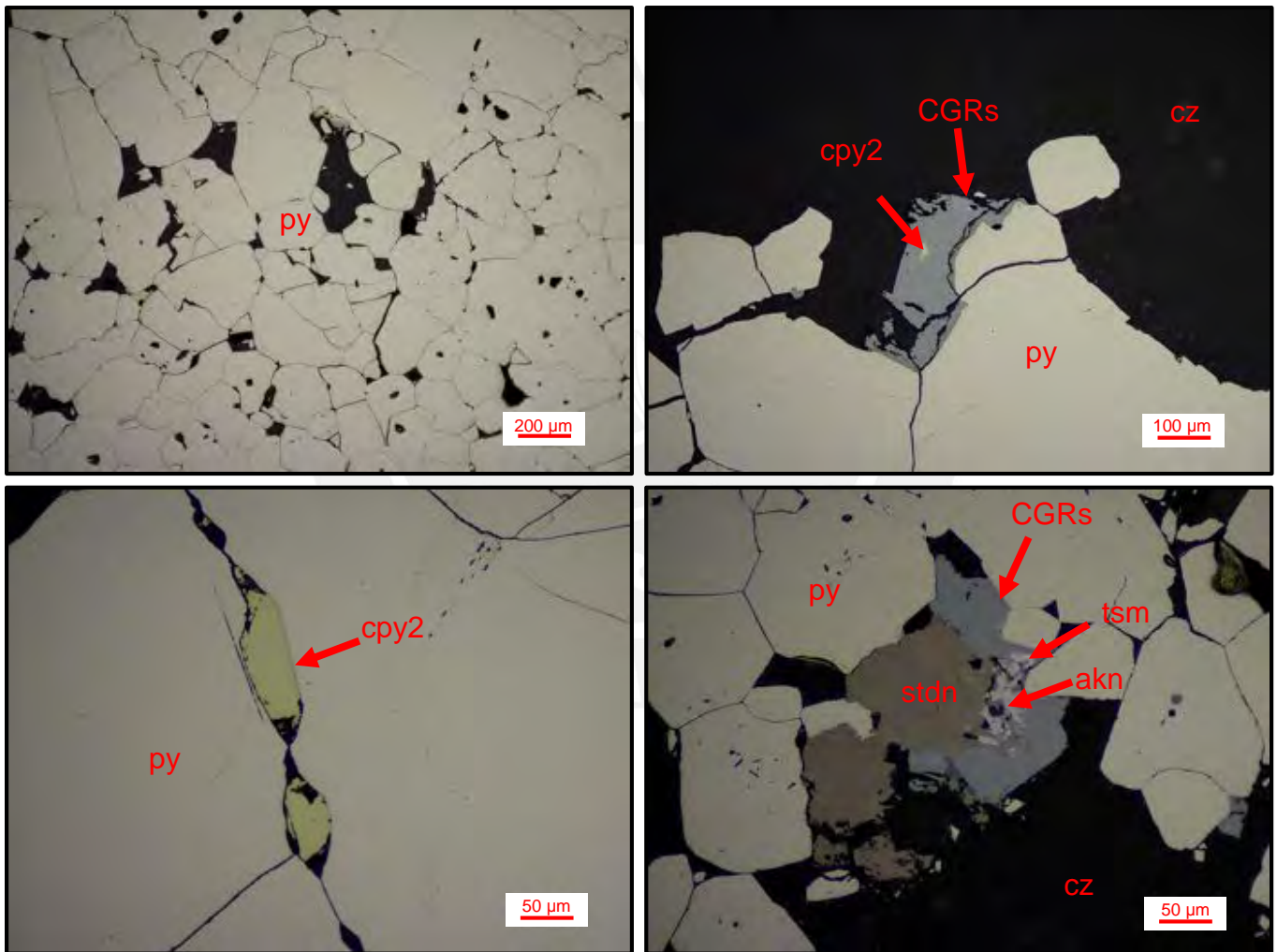
Agregados anhedrales a euhedrales de pirita, con pequeñas inclusiones de hubnerita de hasta 250 μm . Asimismo, la pirita ha sido reemplazada a través de microfracturas e intersticios por esfalerita (1) con finas diseminaciones de calcopirita (1), calcopirita (2), galena y cobres grises (tetraedrita-tennantita). De manera puntual, presencia de cubanita y pirrotina en porosidad de pirita y con tamaños de hasta 5 y 10 μm , respectivamente.



2019-MOR-014-SP

Minerales: pirita + calcopirita (2) + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + esfalerita (2) ± bornita ± digenita ± estanoidita ± aikinita ± tsumoita

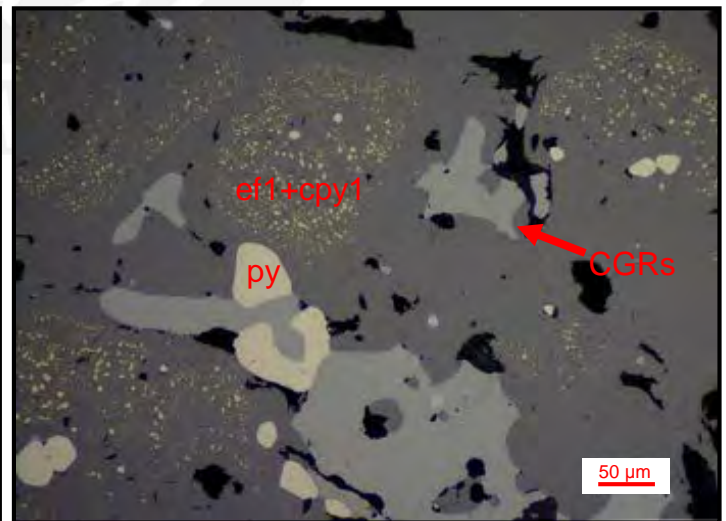
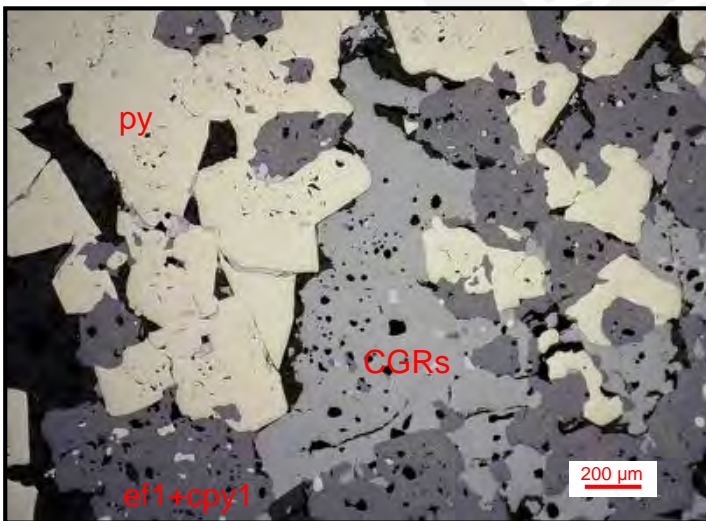
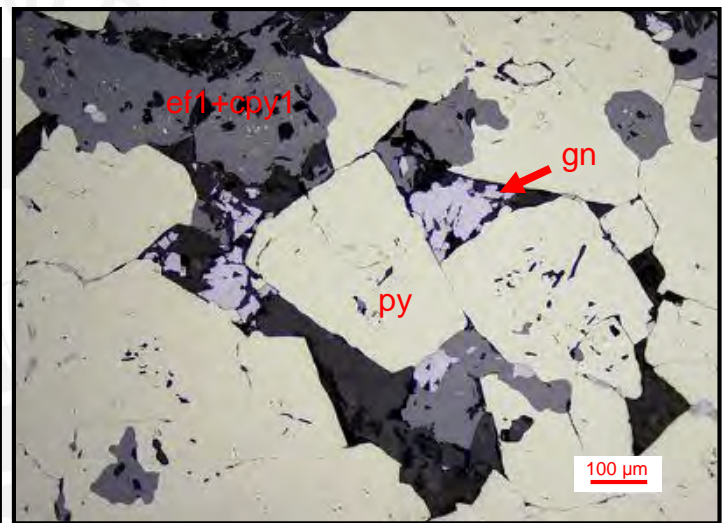
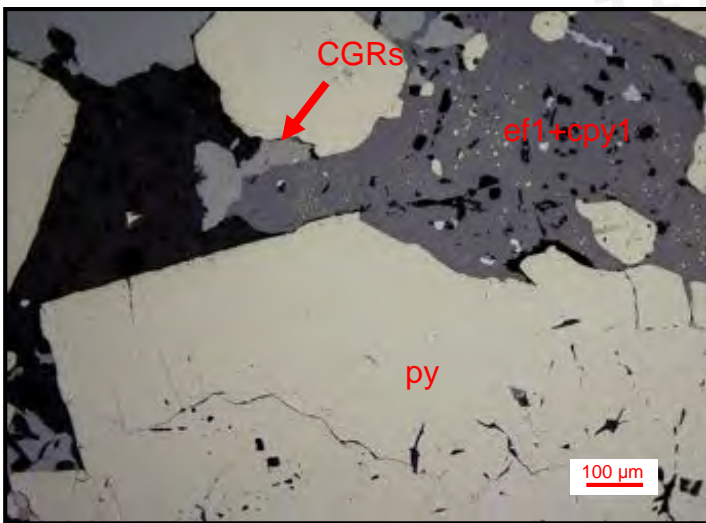
Agregados de pirita cuyos intersticios han sido ocupados principalmente por calcopirita (2), esfalerita (2) y en menor medida cobres grises (tetraedrita-tennantita); estos últimos, también en algunos bordes de pirita. Asimismo, presencia de bornita (8 μm) y digenita en porosidades de pirita. Los cobres grises presentan oclusiones de calcopirita (2) e inclusiones de pequeños cristales de estanoidita, aikinita y tsumoita.



2019-MOR-015-SP

Minerales: esfalerita (1) + pirita + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + galena + calcopirita (2) ± calcopirita (1)

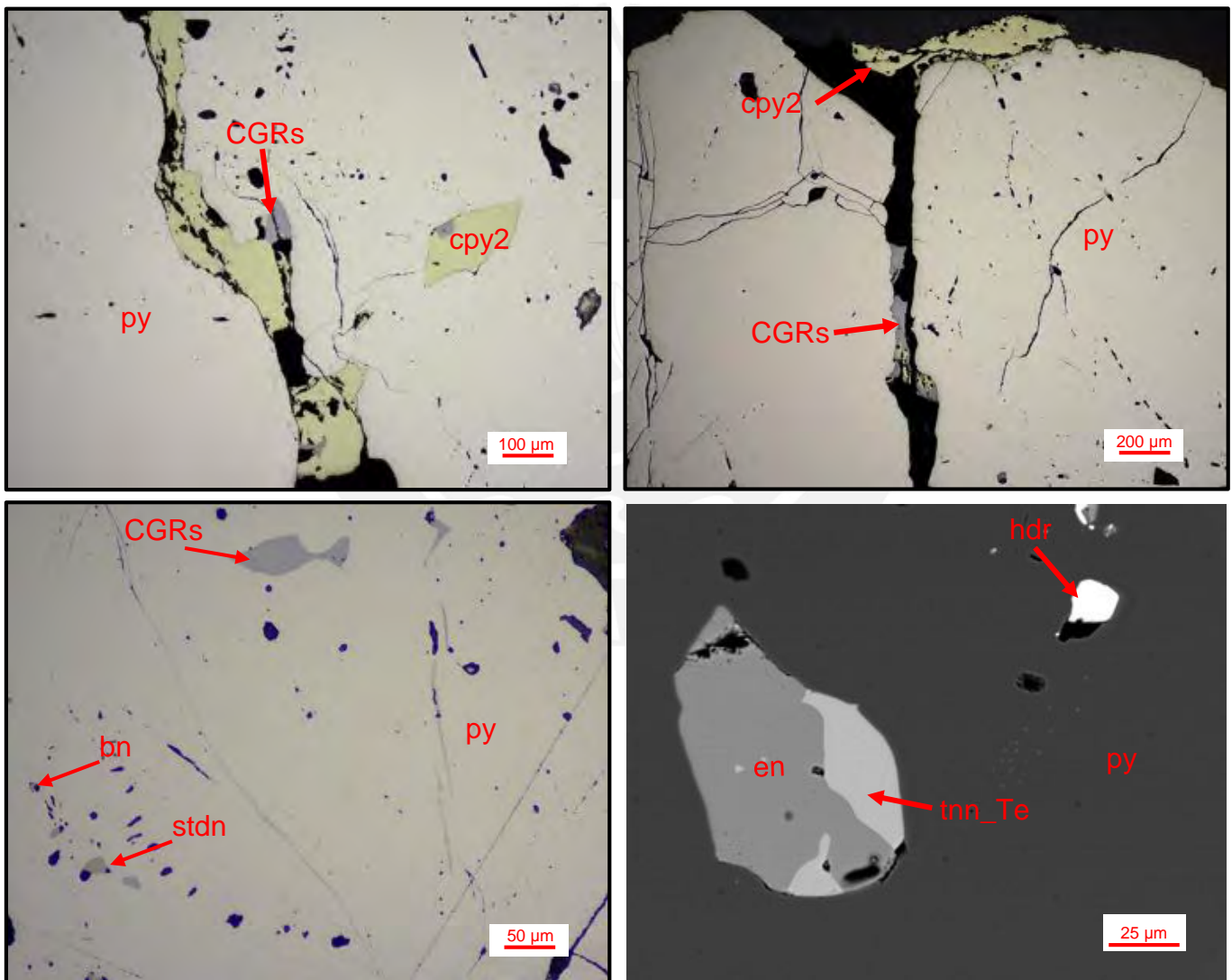
Agregados anhedrales a euhedrales de pirita, reemplazados por esfalerita masiva (1) con finas segregaciones de calcopirita (1), y agregados de galena. Escasos cristales subredondeados de calcopirita (2) como traza en esfalerita (1). De manera local, se observaron cobres grises (tetraedrita-tennantita) como reemplazo de esfalerita (2) y con tamaños de hasta 900 µm.



2019-MOR-016-SP

Minerales: pirita + calcopirita (2) + cobres grises (tetraedrita-tennantita/ teluriotennantita) + galena + esfalerita (2) + enargita ± bornita ± covelita ± estanoidita ± hodrusita

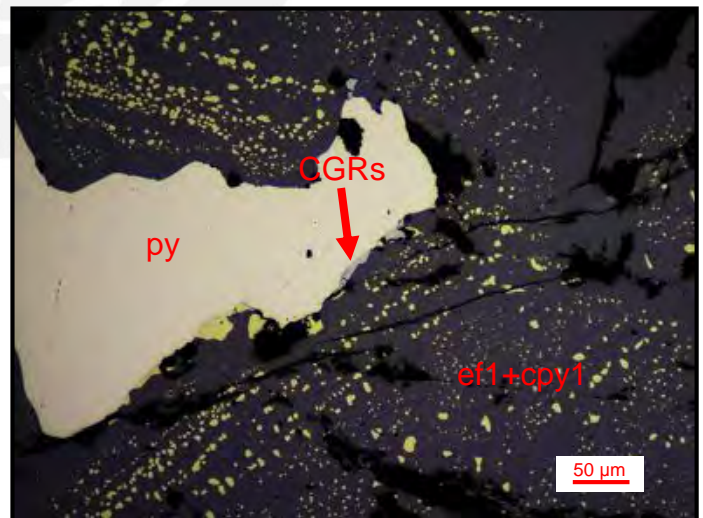
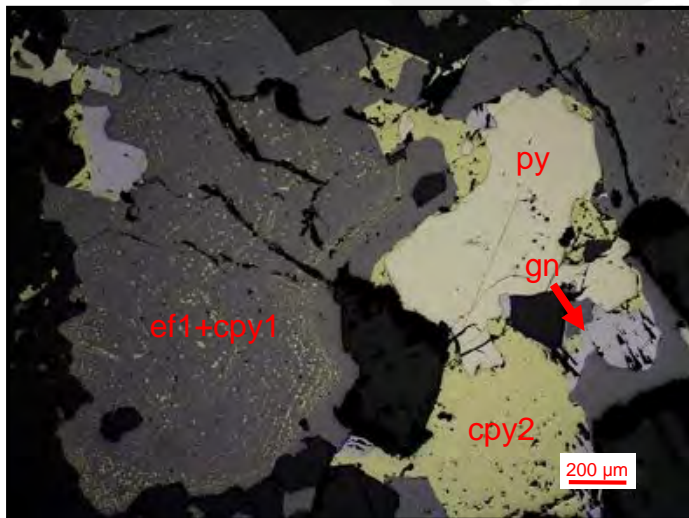
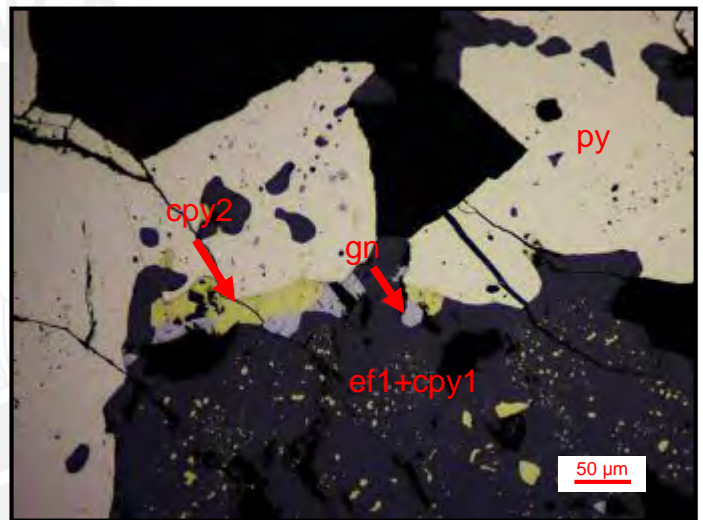
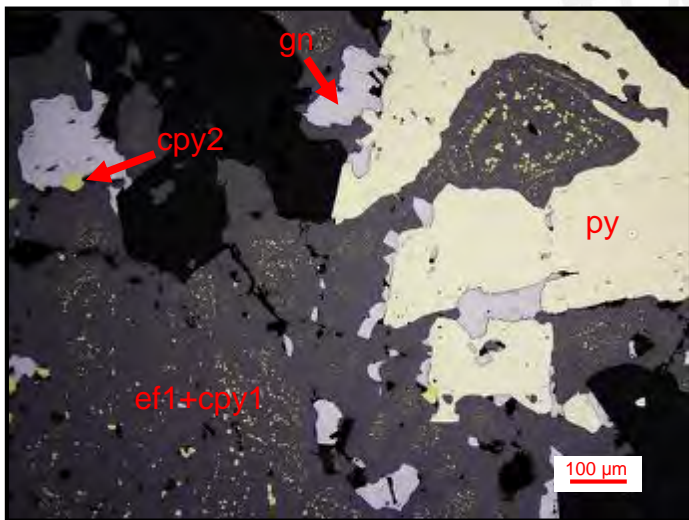
Pirita masiva reemplazada por calcopirita (2) y en menor proporción, por cobres grises (tetraedrita-tennantita), galena y esfalerita (2) a través de bordes y microfracturas. Además, se apreciaron pequeños cristales de bornita, covelita y enargita en porosidades de pirita que alcanzan dimensiones de hasta 10µm, 15 µm y 40 µm, respectivamente. Escasos cristales de estanoidita presentes como traza en cobres grises y en contacto con galena. De manera puntual, hodrusita (6 µm) en porosidad de pirita.



2019-MOR-017-SP

Minerales: esfalerita (1) + pirita + galena + calcopirita (2) ± calcopirita (1) ± cobres grises (tetraedrita-tennantita)

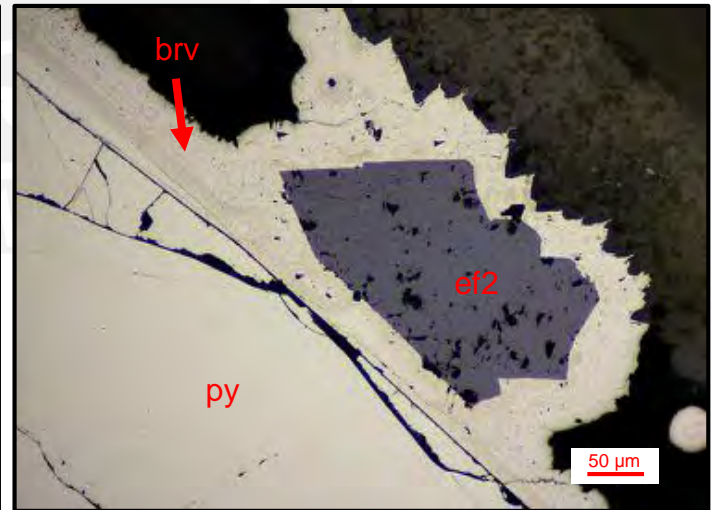
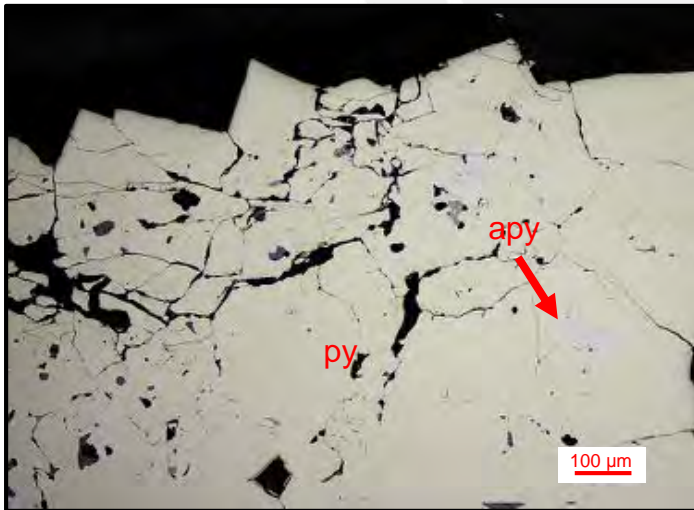
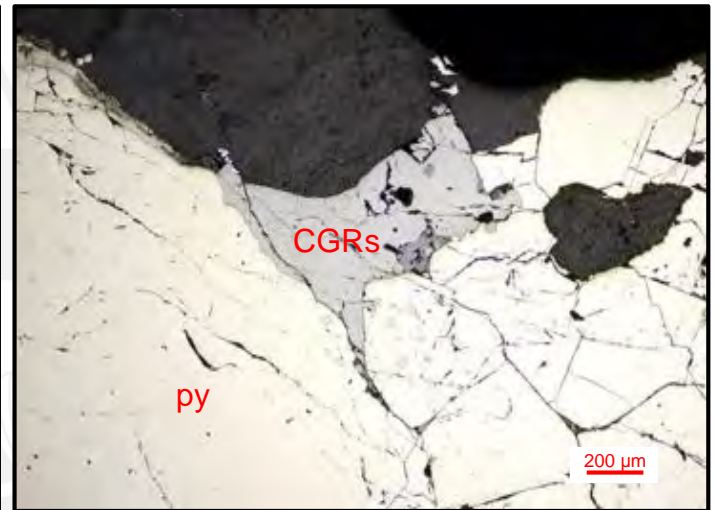
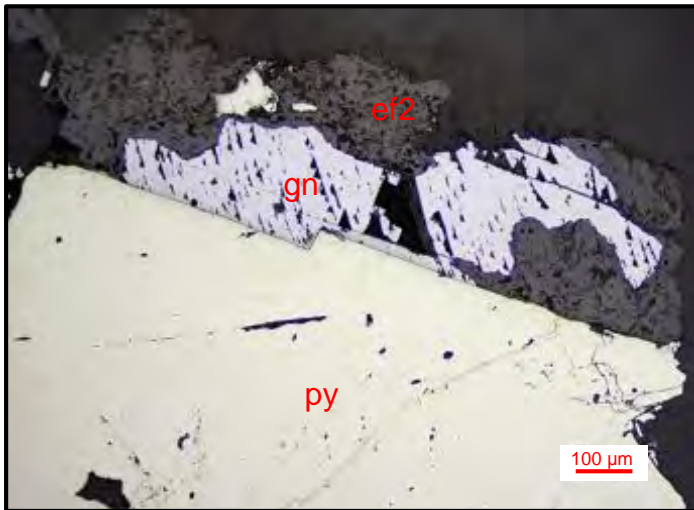
Cristales anhedrales a euhedrales de pirita en matriz de carbonatos, que han sido reemplazados a partir de sus bordes y en menor medida porosidades por esfalerita (1) con finas disseminaciones de calcopirita (1), calcopirita (2) y galena. Trazas de cobres grises (tetraedrita-tennantita) en intersticios, porosidades y bordes de pirita con tamaños de hasta 20 µm.



2019-MOR-018-SP

Minerales: pirita + esfalerita (2) + galena + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + bravoita (variedad pirita) ± arsenopirita

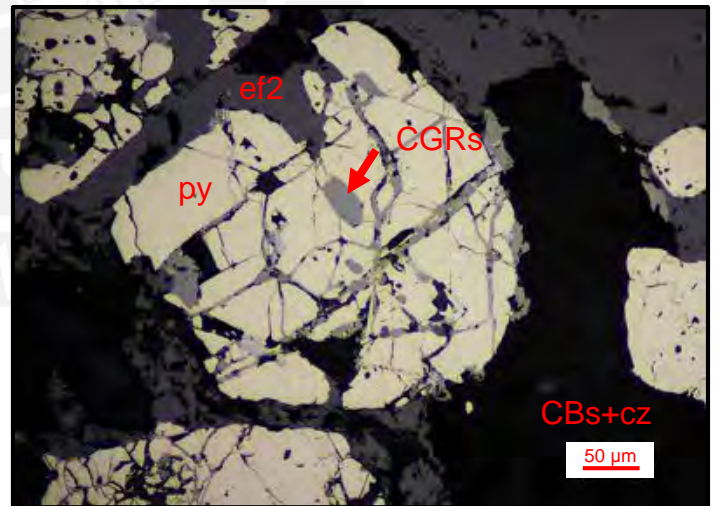
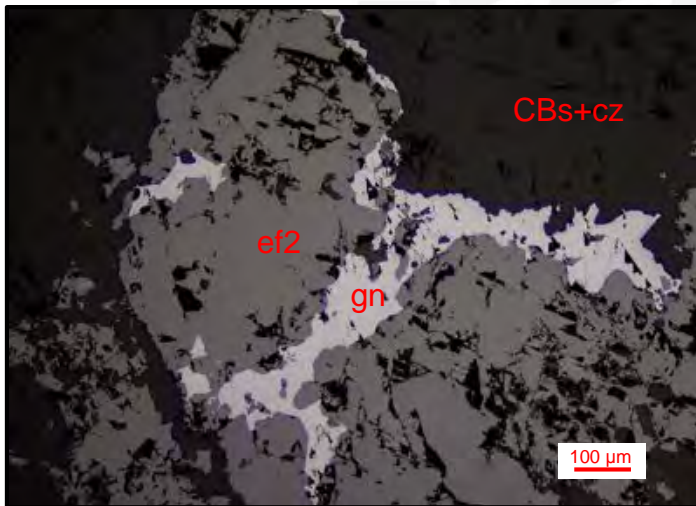
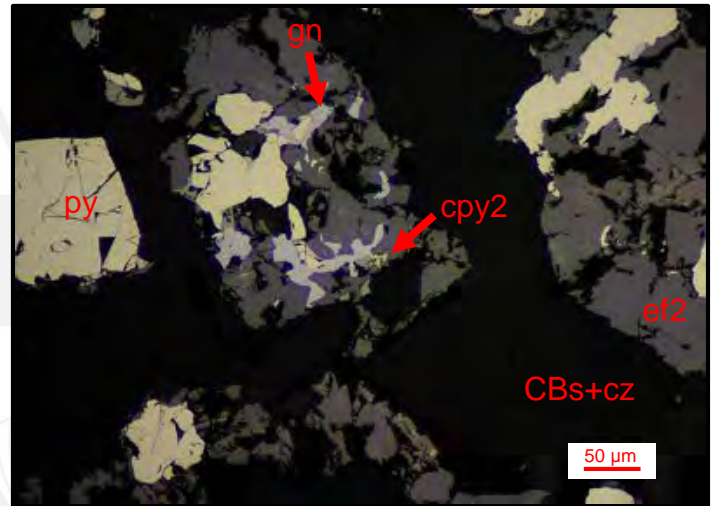
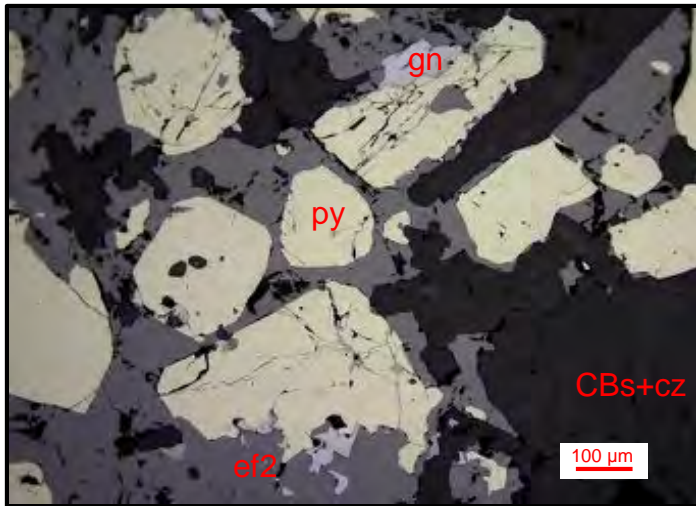
Agregados anhedrales a subhedrales de pirita, cuyos bordes y microfracturas han sido reemplazados/rellenas por cobres grises (tetraedrita-tennantita), galena y esfalerita (2) a través de bordes e intersticios. Por sectores, la pirita ha sufrido alteración a bravoíta desde sus bordes, llegando a englobar por sectores a la esfalerita (2). De manera puntual, arsenopirita en porosidades de pirita con tamaños de hasta 15 μm .



2019-MOR-019-SPA

Minerales: esfalerita (2) + pirita + calcopirita (2) + galena ± cobres grises (tetraedrita-tennantita)

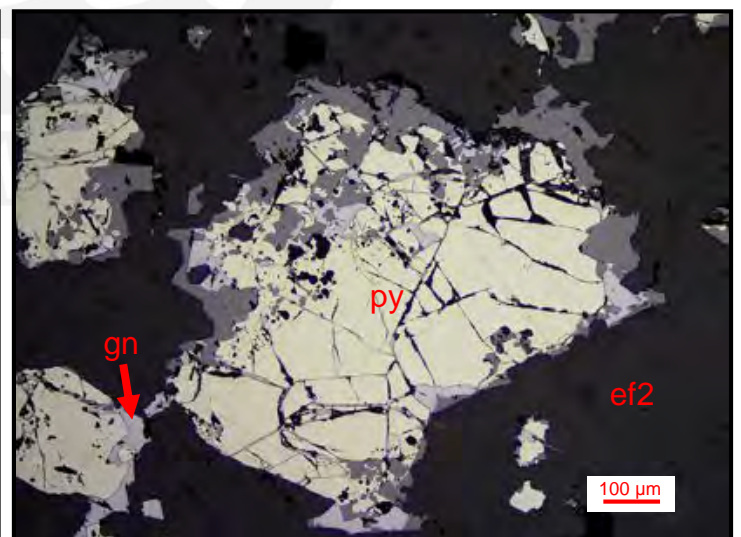
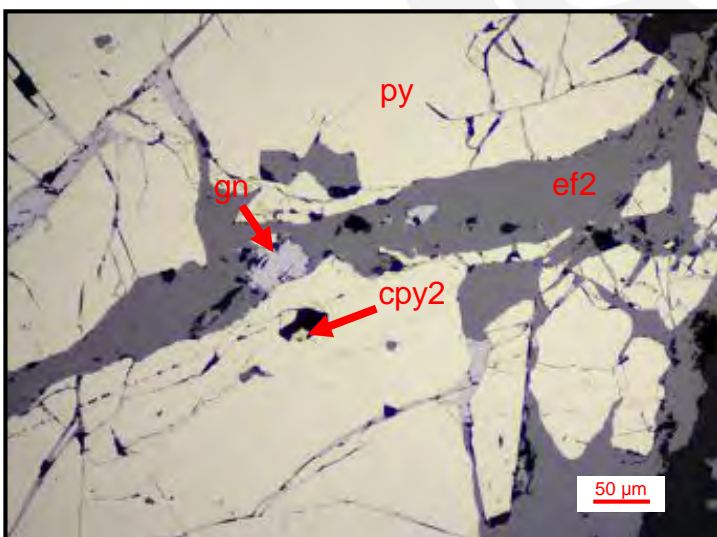
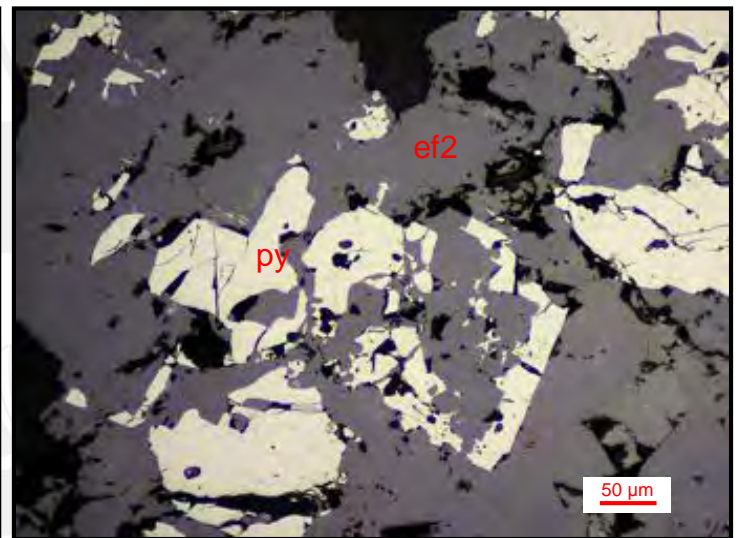
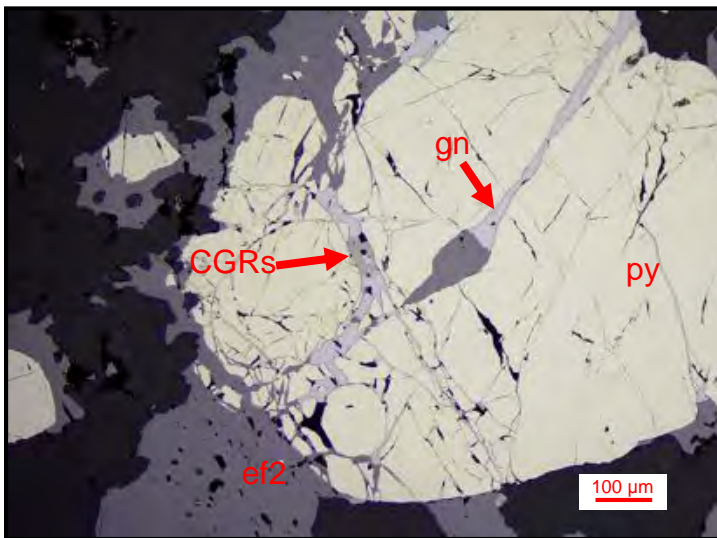
Cristales anhedrales a subhedrales de pirita que han sido reemplazados por esfalerita (2) a partir de sus bordes e intersticios. Presencia de cobres grises (tetraedrita-tennantita) en porosidades de pirita con dimensiones de hasta 50 μm . Calcopirita (2) como inclusiones en esfalerita (2) y por sectores, reemplazada por galena y cobres grises.



2019-MOR-019-SPB

Minerales: esfalerita (2) + pirita + galena ± cobres grises (tetraedrita-tennantita) ± calcopirita (2)

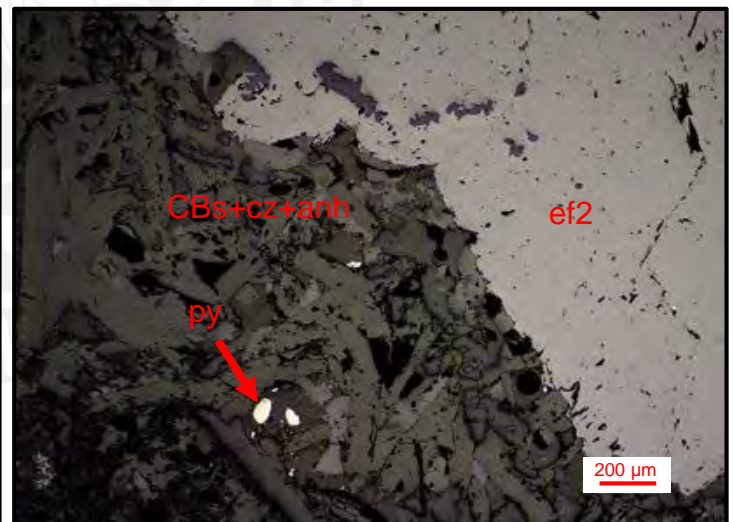
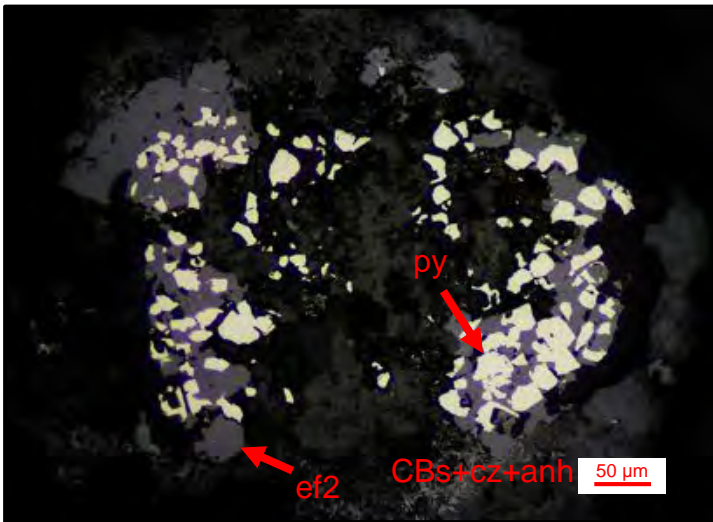
Agregados de cristales anhedrales a euhedrales de pirita, cuyas microfracturas y bordes aparecen rellenas/reemplazados por esfalerita (2) y, en menor medida, por galena, llegándose a notar en algunos cristales de pirita una textura cataclástica (esqueletica). Además, trazas de cobres grises (tetraedrita-tennantita) en microfracturas de pirita y en contacto con galena.



2019-MOR-020-SPA

Minerales: esfalerita (2) + pirita \pm galena

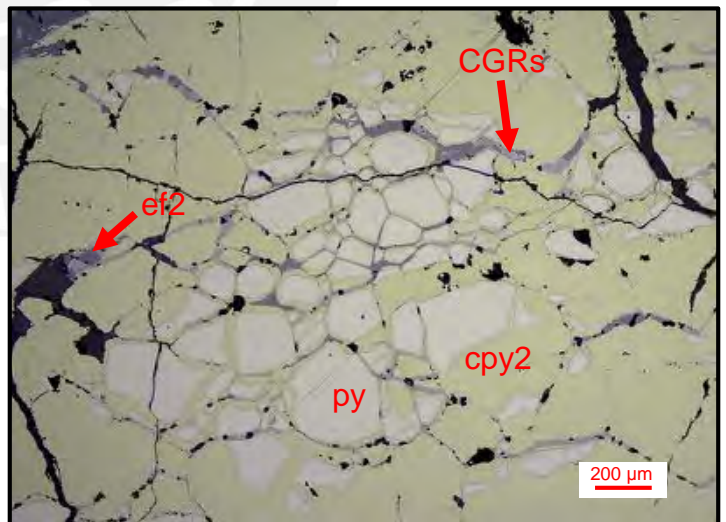
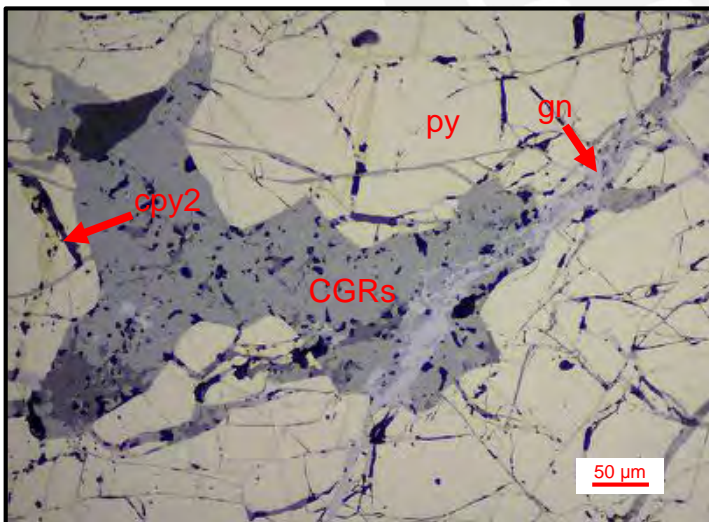
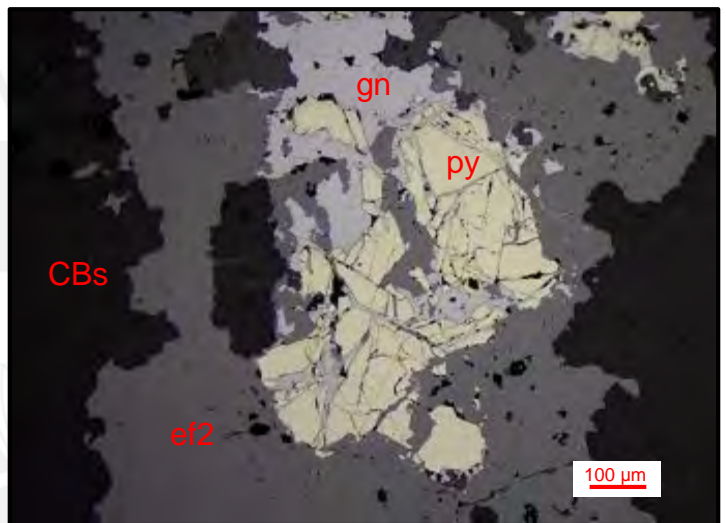
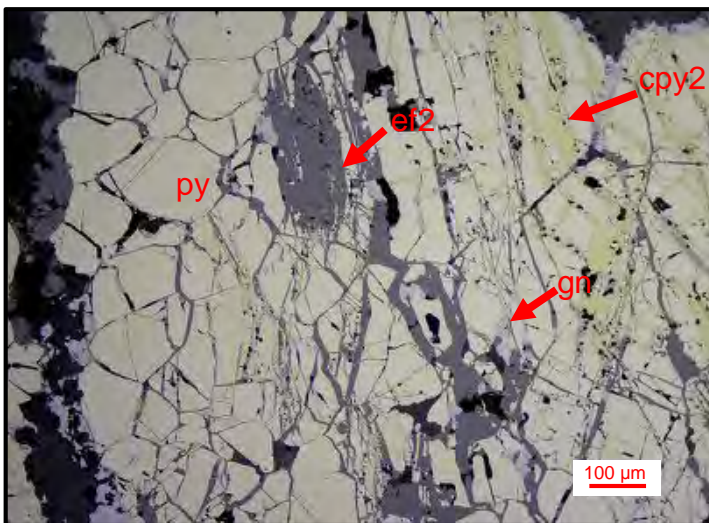
Agregados de esfalerita masiva (2) con oclusiones de pirita (20 μ m) y finas disseminaciones de galena en matriz de anhidrita, cuarzo y carbonatos.



2019-MOR-020-SPB

Minerales: pirita + esfalerita (2) + calcopirita (2) + galena + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + goethita

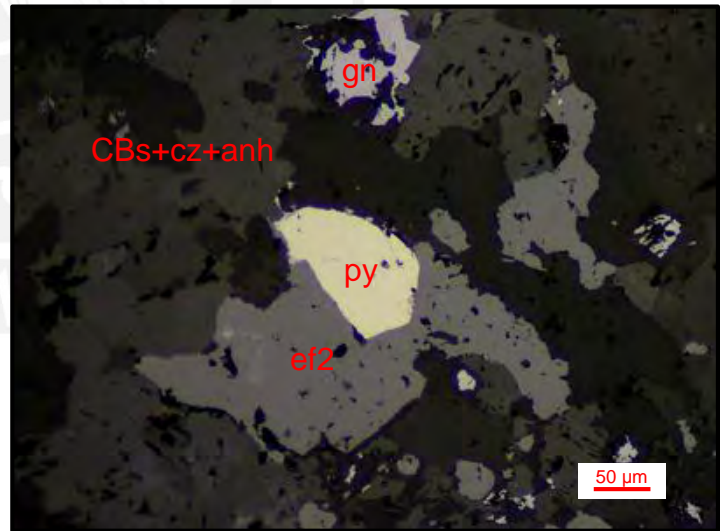
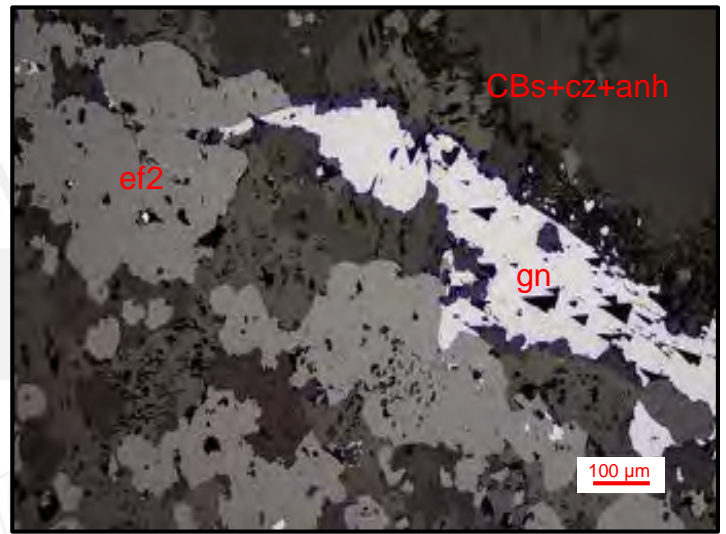
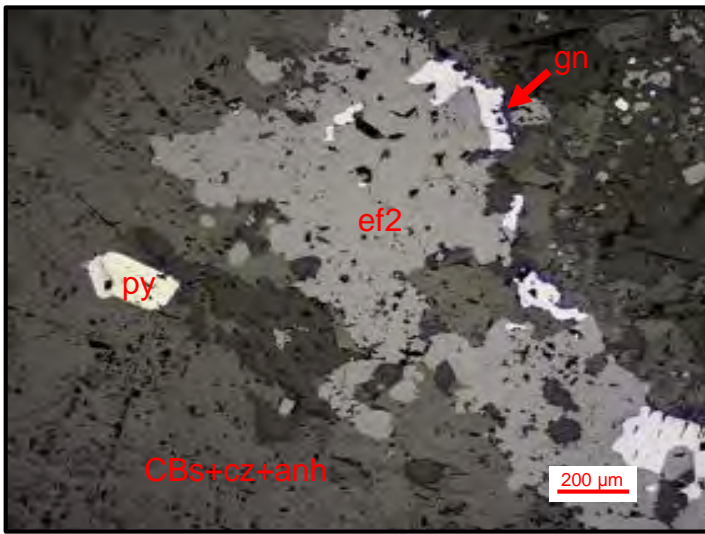
Agregados anhedrales a subhedrales de pirita en matriz de carbonatos, cuyas microfracturas han sido rellenas principalmente por calcopirita (2) y, en menor medida, por esfalerita (2) y galena. Por sectores, se observa alteración a goethita en algunos cristales de pirita. De manera puntual, se aprecian agregados de cobres grises (tetraedrita-tennantita) en intersticios de pirita y con tamaños de hasta 350 μm .



2019-MOR-021-SP

Minerales: esfalerita (2) + galena + pirita

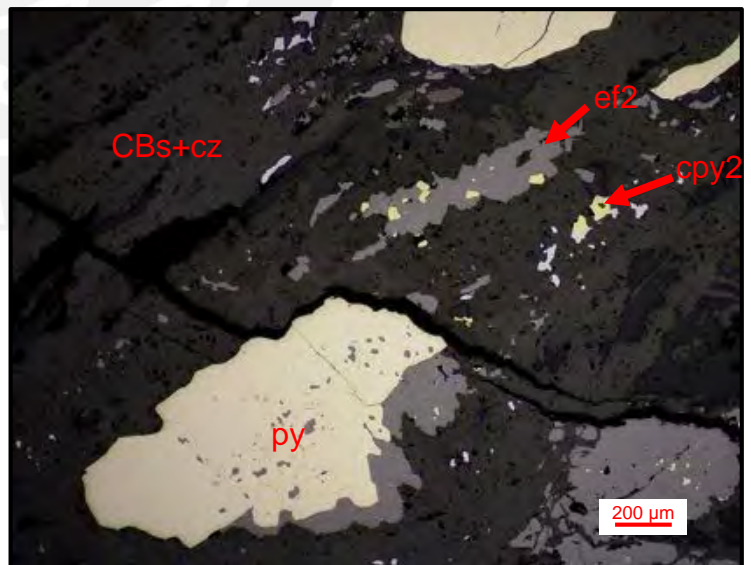
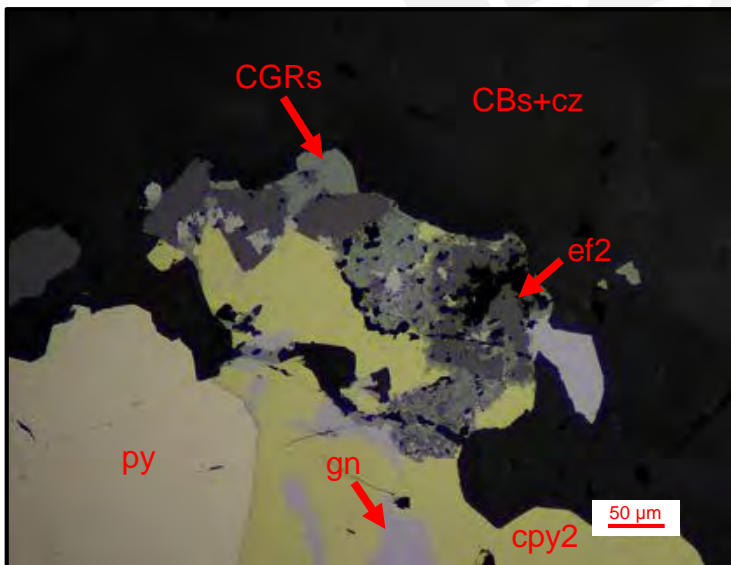
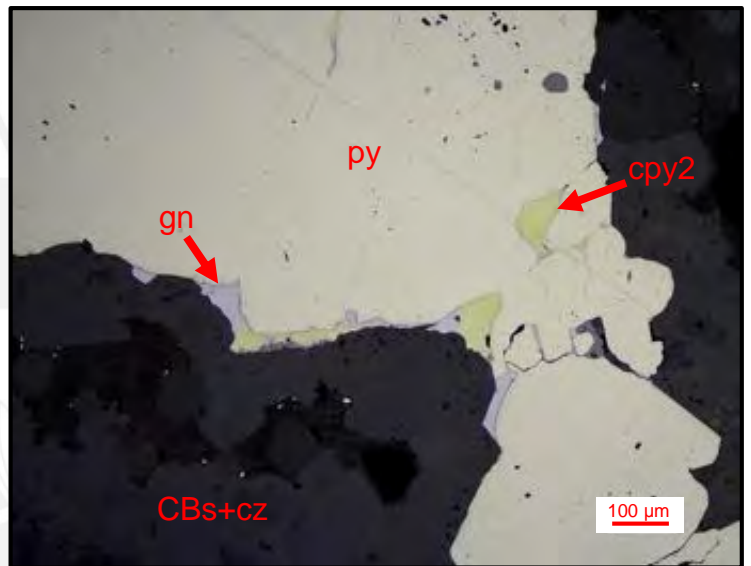
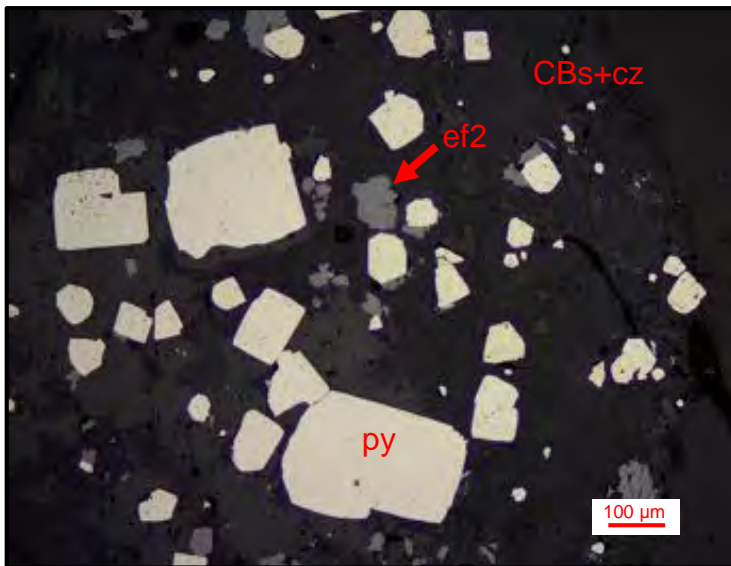
Escasos cristales anhedrales de pirita, reemplazados por esfalerita (2) y ésta a su vez, por galena a través de bordes, intersticios y porosidades. La disposición de estos minerales, muestran, junto con la matriz de cuarzo, anhidrita y carbonatos, una estructura bandeada coloforme.



2019-MOR-022-SP

Minerales: pirita + esfalerita (2) + calcopirita (2) + galena ± cobres grises (tetraedrita-tennantita)

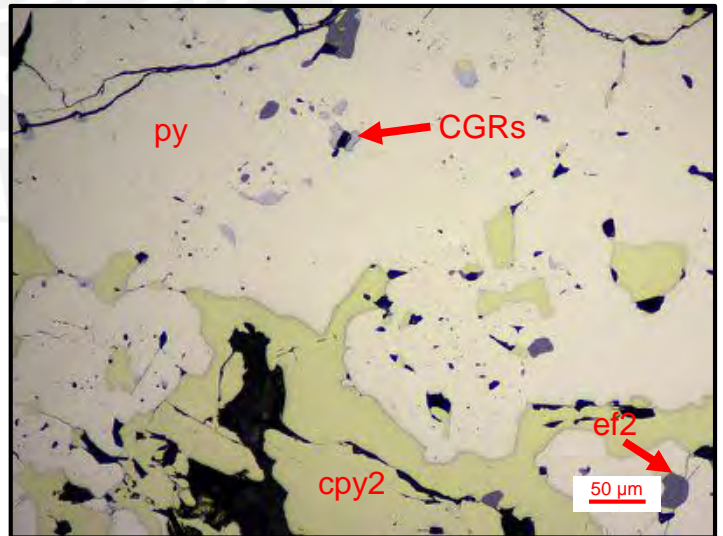
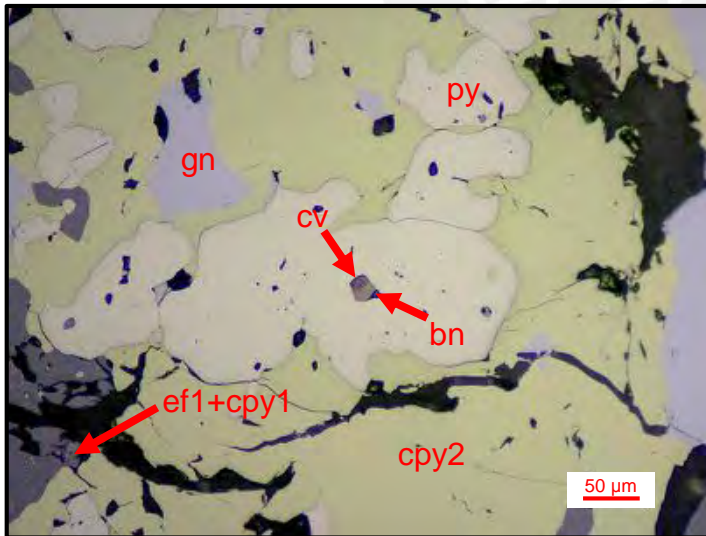
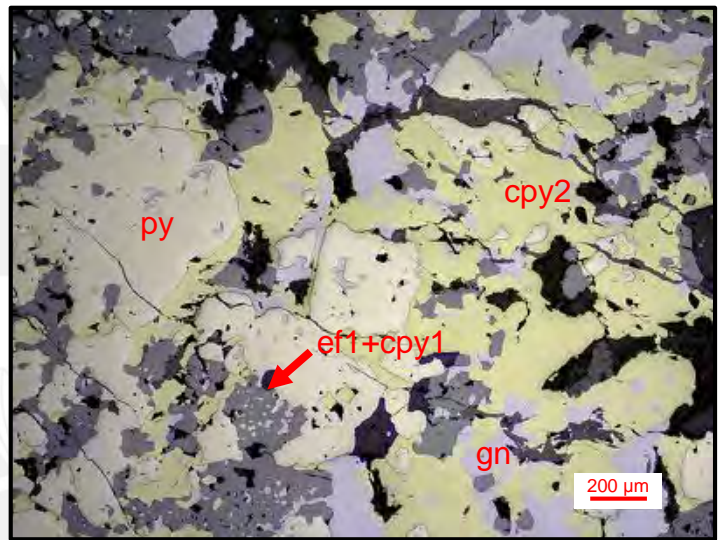
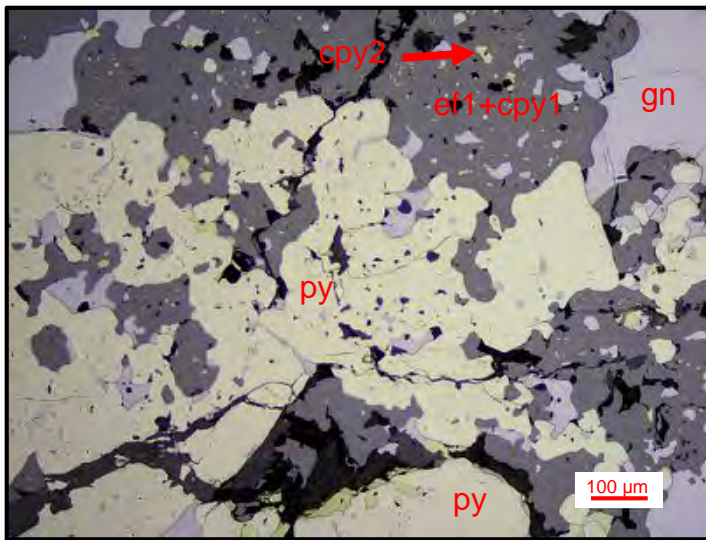
Pirita anhedral a euhedral, tanto en agregados como en cristales individuales, reemplazada por esfalerita (2), calcopirita (2) y galena a través de bordes y porosidades. De manera puntual, se aprecia cobres grises (tetraedrita-tennantita) que han reemplazado desde sus bordes a calcopirita (2) y esfalerita (2) con tamaños de hasta 60 µm.



2019-MOR-023-SPA

Minerales: pirita + esfalerita (1) + calcopirita (1) + galena + calcopirita (2) ± cobres grises (tetraedrita-tennantita) ± bornita ± covelita

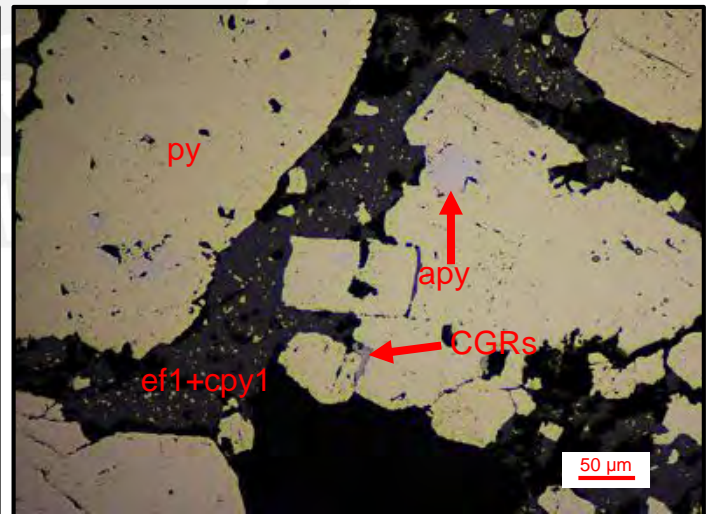
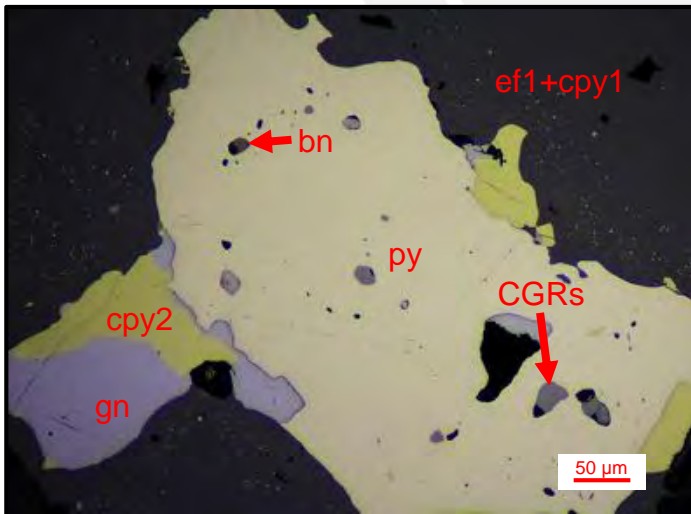
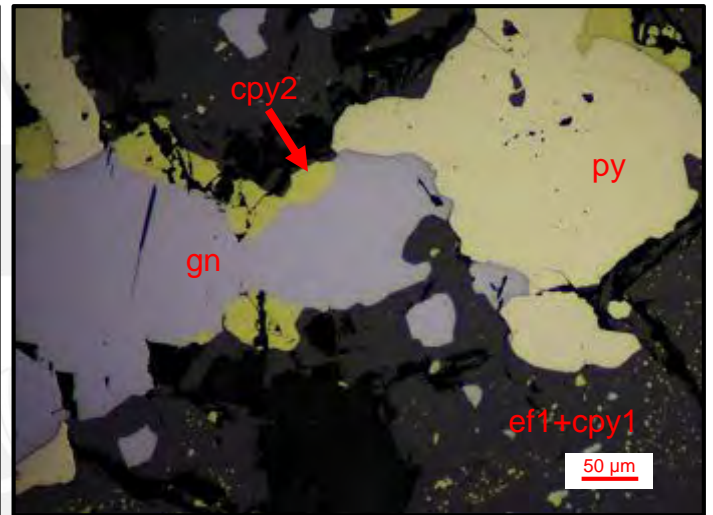
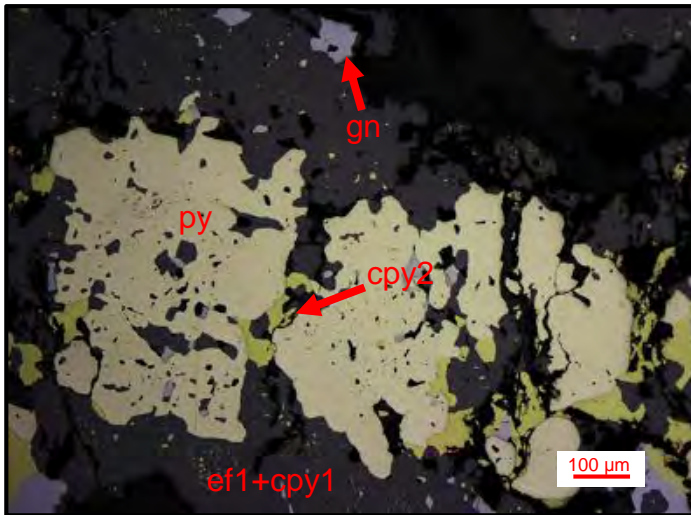
Agregados anhedrales de pirita reemplazados principalmente por esfalerita (1) con disseminaciones de calcopirita (1), agregados masivos de calcopirita (2) y en menor medida, galena y cobres grises (tetraedrita-tennantita, 20 µm) a través de microfisuras, bordes e intersticios. Trazas de bornita y covelita en porosidades de pirita con dimensiones de hasta 20 y 5 µm, respectivamente.



2019-MOR-023-SPB

Minerales: esfalerita (1) + pirita + galena + calcopirita (1) + calcopirita (2) + arsenopirita ± esfalerita (2) ± bornita ± cobres grises (tetraedrita-tennantita) ± hessita

Agregados anhedrales de pirita reemplazados principalmente por esfalerita (1) con finas disseminaciones de calcopirita (1) y galena y, en menor medida por calcopirita (2) y cobres grises (tetraedrita-tennantita, 450 µm) a partir de bordes y porosidades. Ocasionalmente, se observaron cristales de hessita (50 µm) incluidos en galena.



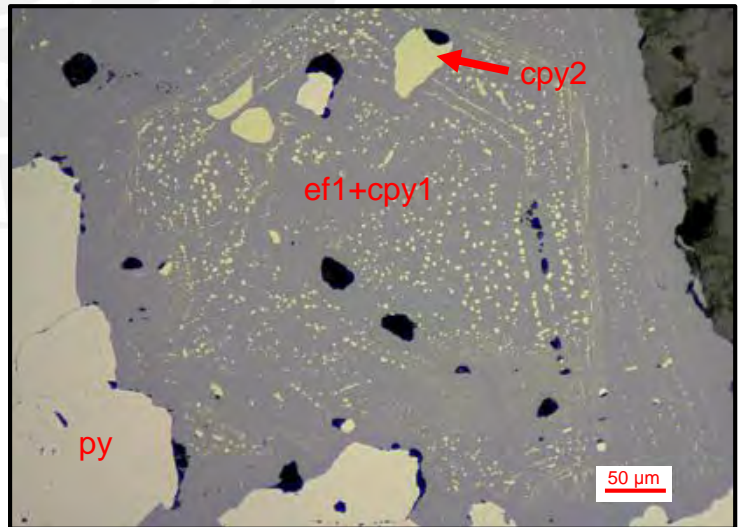
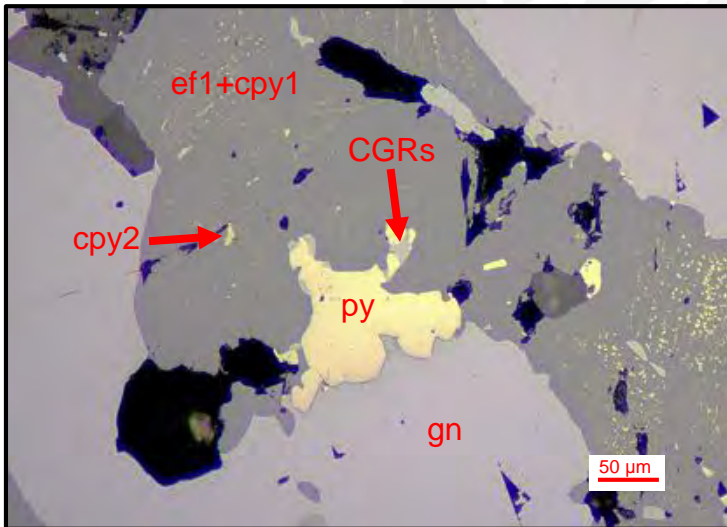
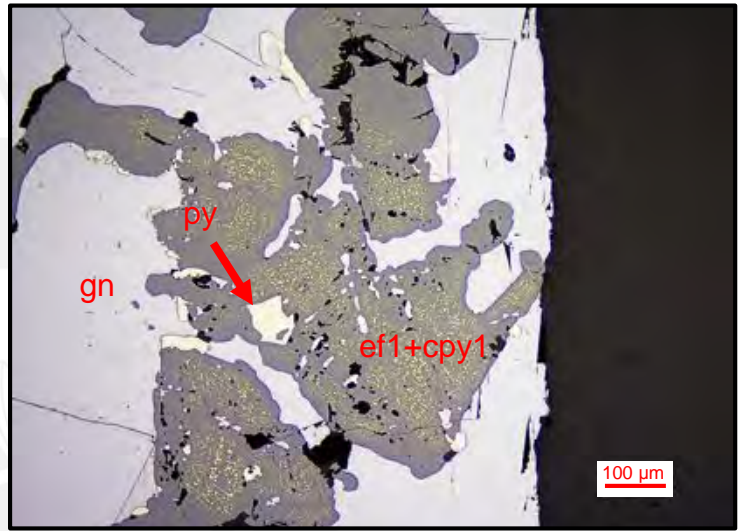


**CUERPO ROSITA/
VETA RUBÍ**

2019-MOR-026-SP

Minerales: pirita + galena + esfalerita (1) + calcopirita (1) ± calcopirita (2) ± cobres grises (tetraedrita-tennantita)

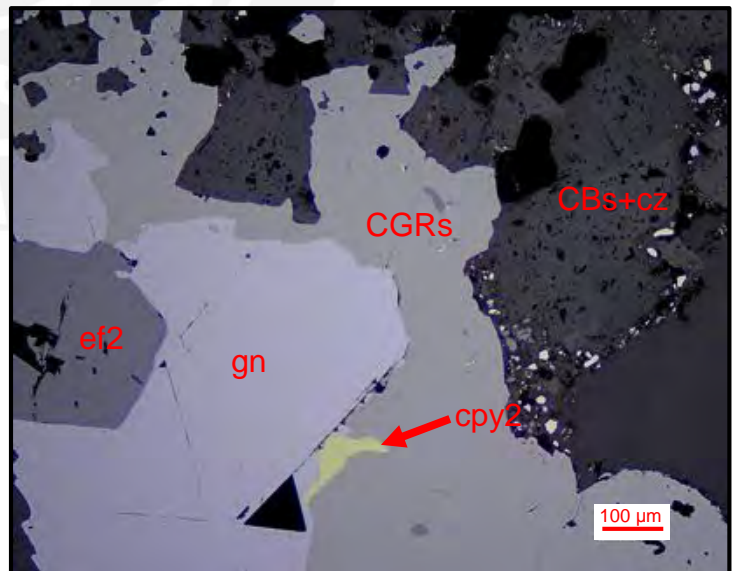
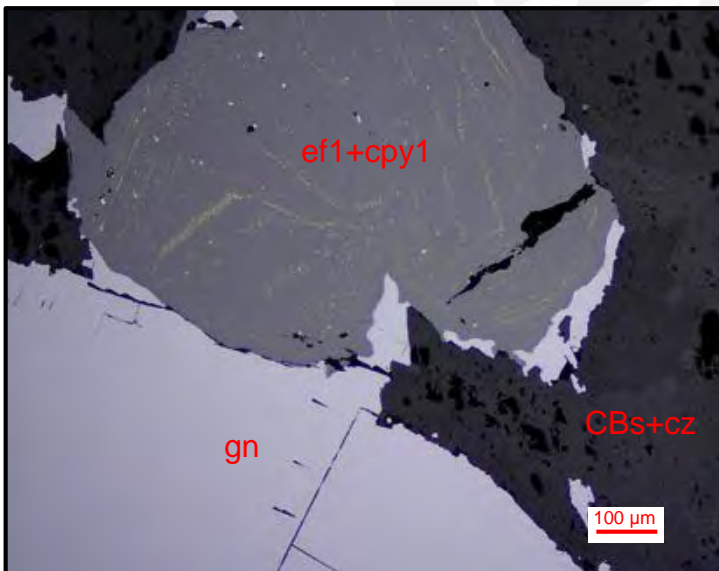
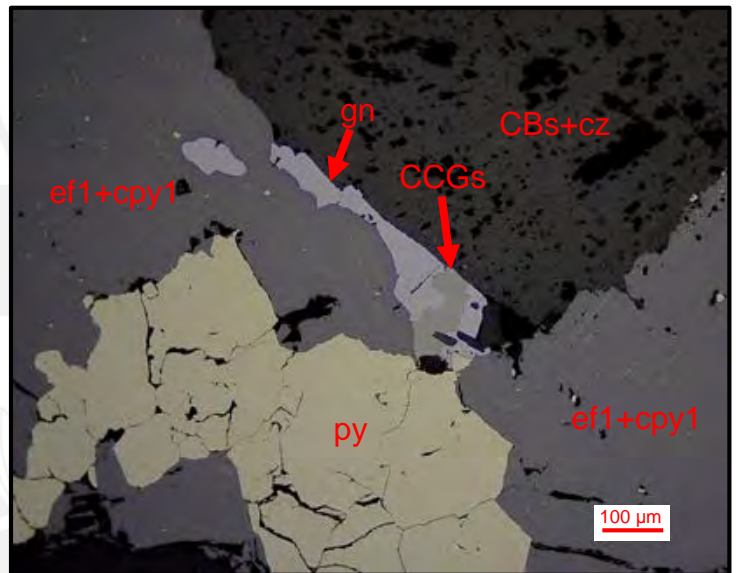
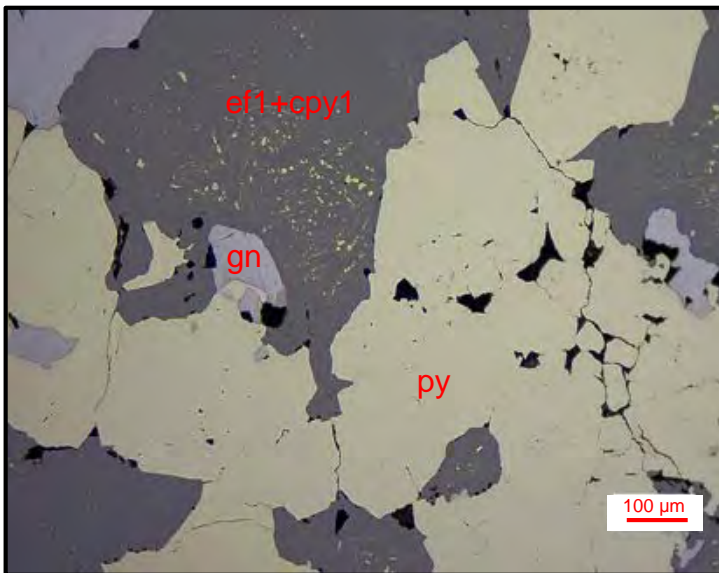
Cristales anhedrales a euhedrales de pirita reemplazados por esfalerita (1) con finas segregaciones de calcopirita (1) y, galena a través de sus bordes, intersticios y cavidades. Escaso contenido de calcopirita (2) como oclusiones en esfalerita (1). Presencia de cobres grises (tetraedrita-tennantita) en contacto con esfalerita (1) y pirita con tamaños de hasta 100 µm.



2019-MOR-027-SPA

Minerales: pirita + esfalerita (1) + galena + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + calcopirita (2)
± calcopirita (1)

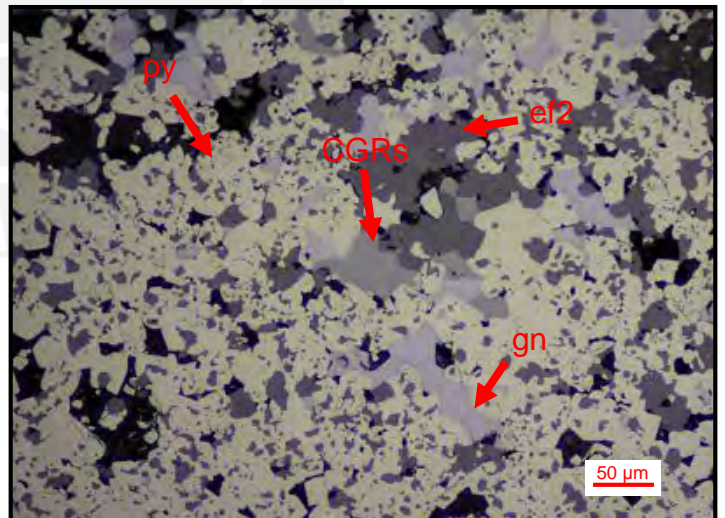
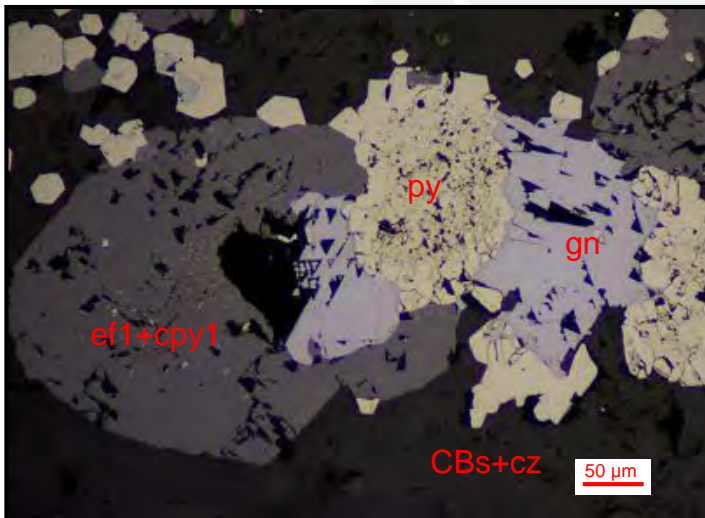
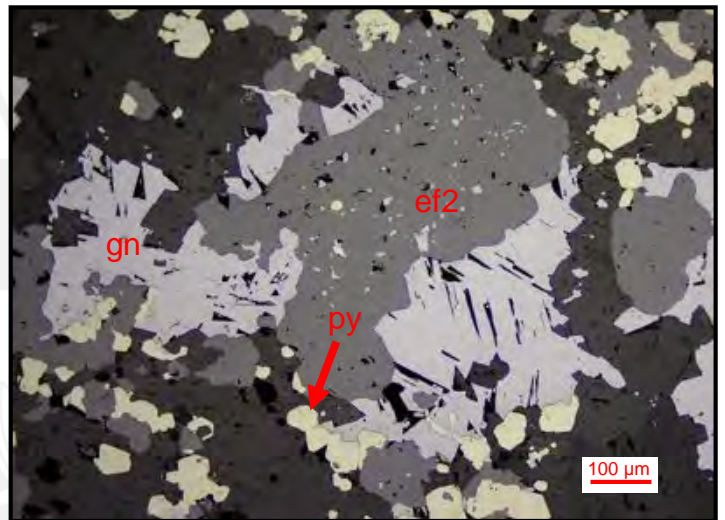
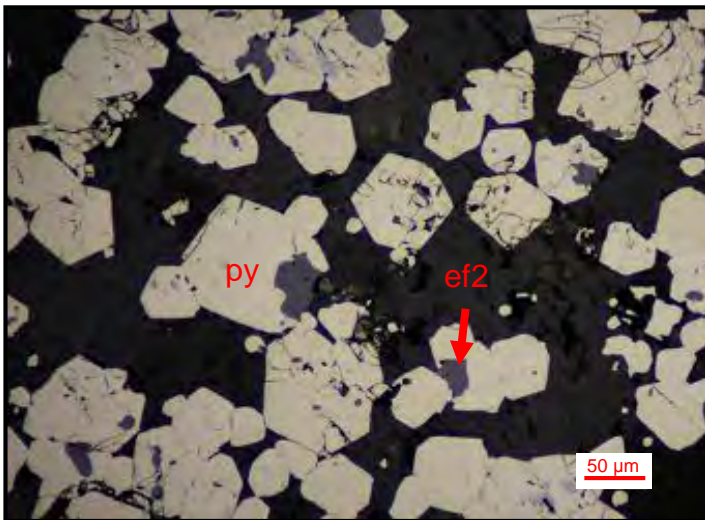
Agregados anhedrales de pirita en matriz de cuarzo y carbonatos, reemplazados por esfalerita (1) con diseminaciones de calcopirita (1) y galena a través de bordes e intersticios. Escasos cristales de calcopirita (2) ocluidos en galena y cobres grises (tetraedrita-tennantita); estos últimos con tamaños de hasta 1600 μm .



2019-MOR-027-SPB

Minerales: esfalerita (2) + pirita + galena + esfalerita (1) + cobres grises (tetraedrita-tennantita) ± calcopirita (1)

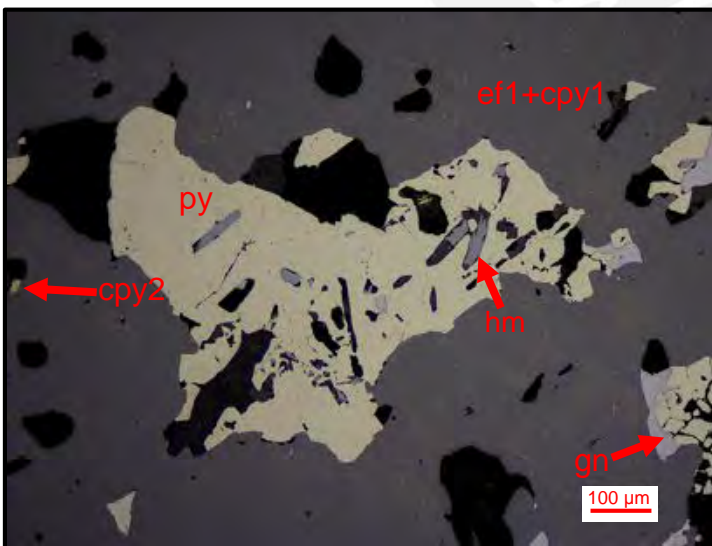
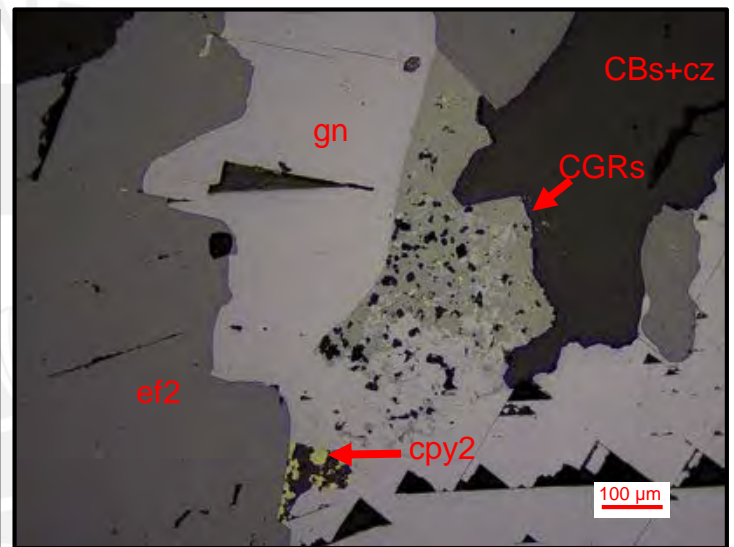
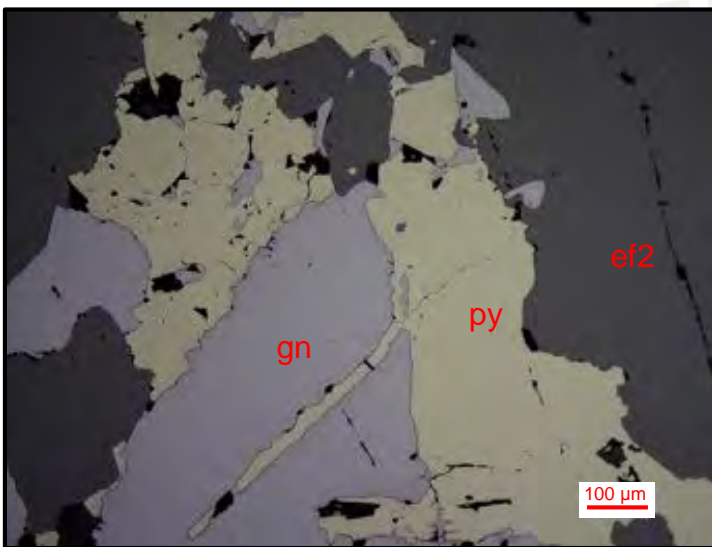
Cristales anhedrales a subhedrales de pirita, diseminados en matriz de carbonatos y reemplazados principalmente por esfalerita (2) y galena. En menor proporción, los cristales de pirita han sido reemplazados por esfalerita (1) con diseminaciones de calcopirita (1) y cobres grises (tetraedrita-tennantita), con tamaños de hasta 30 µm.



2019-MOR-029-SPA

Minerales: esfalerita (1) + esfalerita (2) + galena + pirita + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + calcopirita (2) + calcopirita (1) + hematita (especularita)

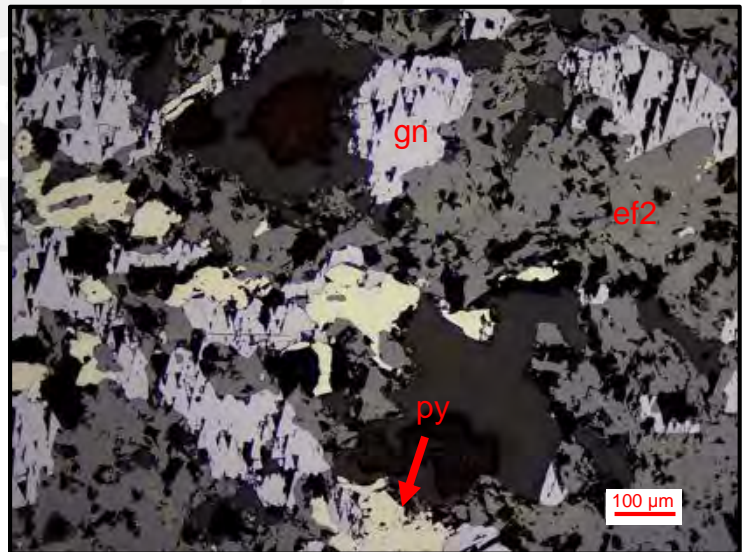
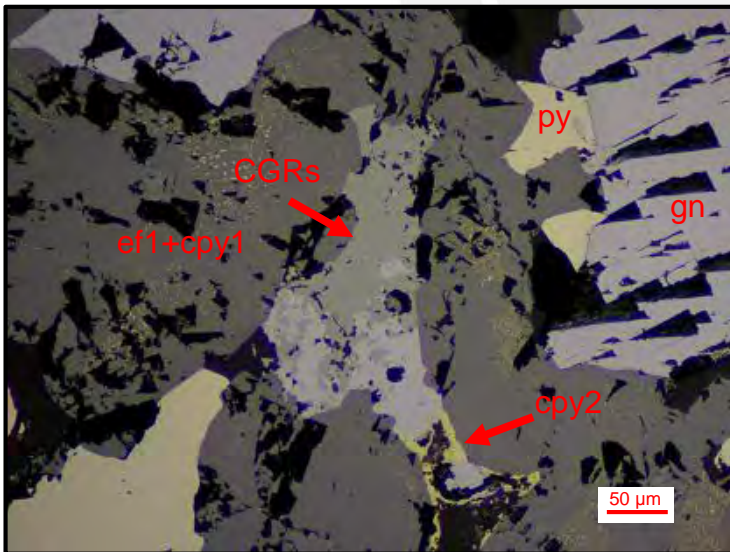
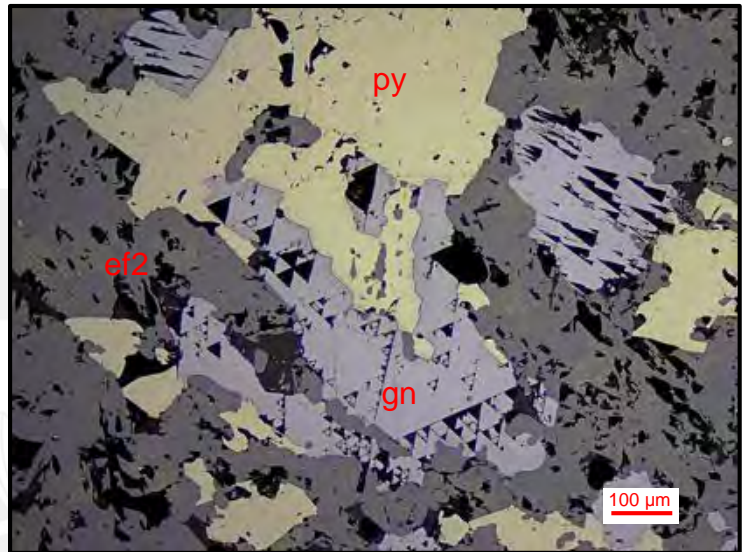
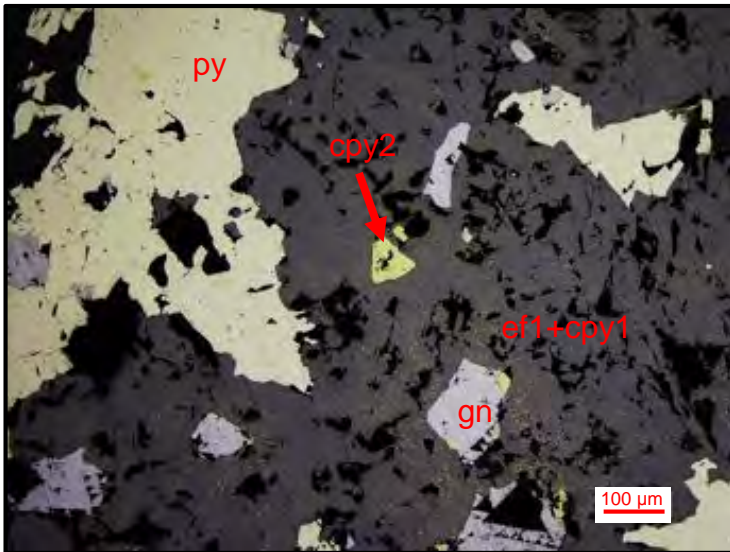
Cristales anhedrales a subhedrales de pirita en matriz de cuarzo y carbonatos, reemplazados por esfalerita (1) con diseminaciones de calcopirita (1), esfalerita (2), galena y cobres grises (tetraedrita-tennantita) a través de bordes, intersticios y microfracturas. Pequeños cristales de calcopirita (2) en esfalerita (1) y hematita (especularita) incluida en pirita con tamaños de hasta 100 μm .



2019-MOR-029-SPB

Minerales: esfalerita (2) + esfalerita (1) + pirita + galena + calcopirita (2) ± calcopirita (1) ± cobres grises (tetraedrita-tenantita)

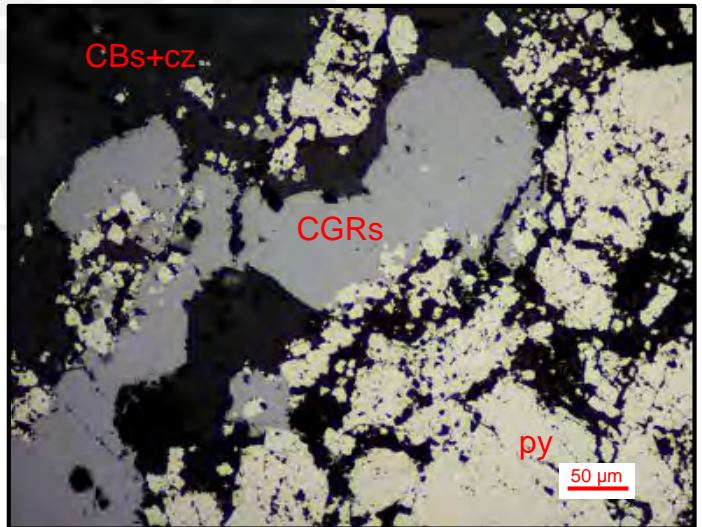
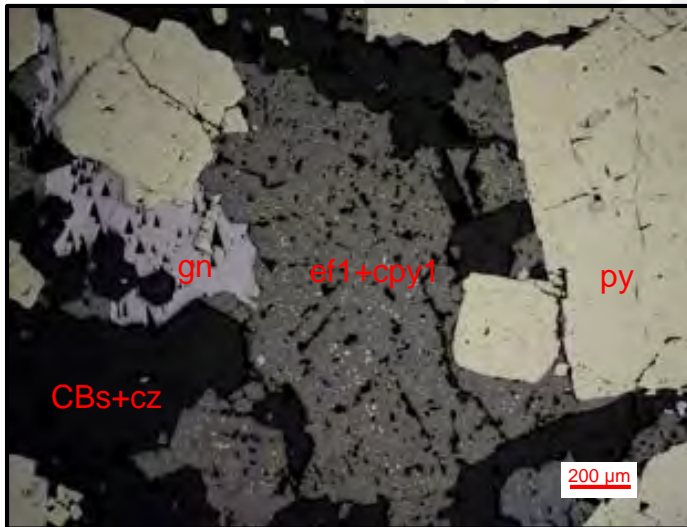
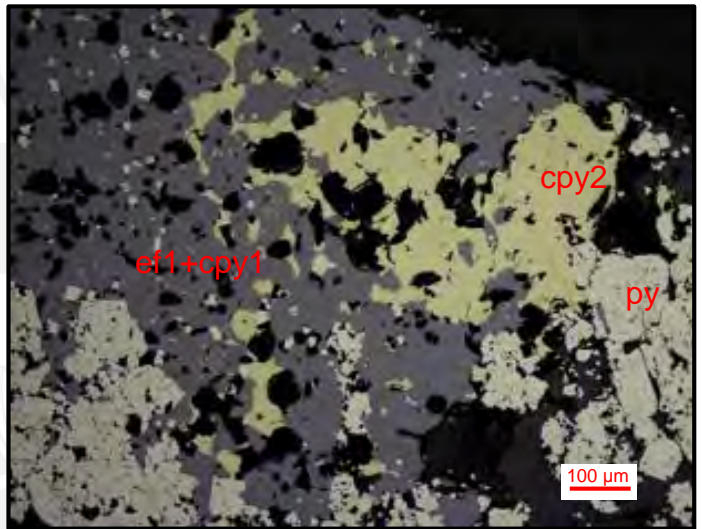
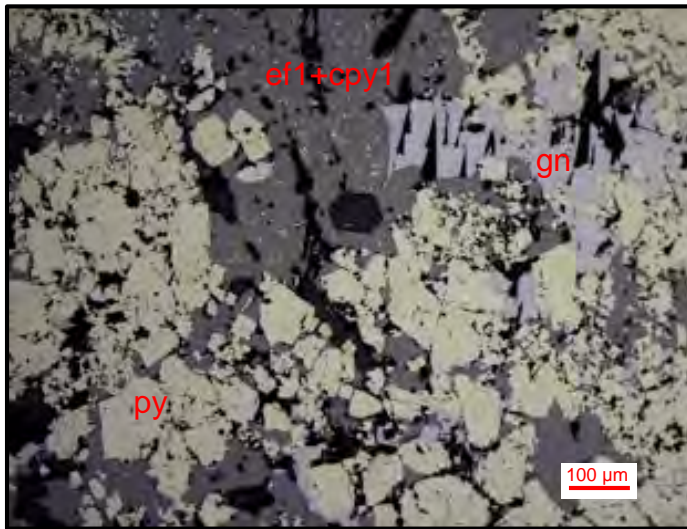
Agregados anhedrales a euhedrales de pirita, reemplazados principalmente por esfalerita (2), esfalerita (1) con finas diseminaciones de calcopirita (1) y galena desde sus bordes y, en menor proporción, por cobres grises de hasta 40 µm. Escasos cristales de calcopirita (2) ocurren como inclusiones en la esfalerita (2).



2019-MOR-030-SPA

Minerales: pirita + esfalerita (1) + calcopirita (2) + galena + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + calcopirita (1) ± arsenopirita

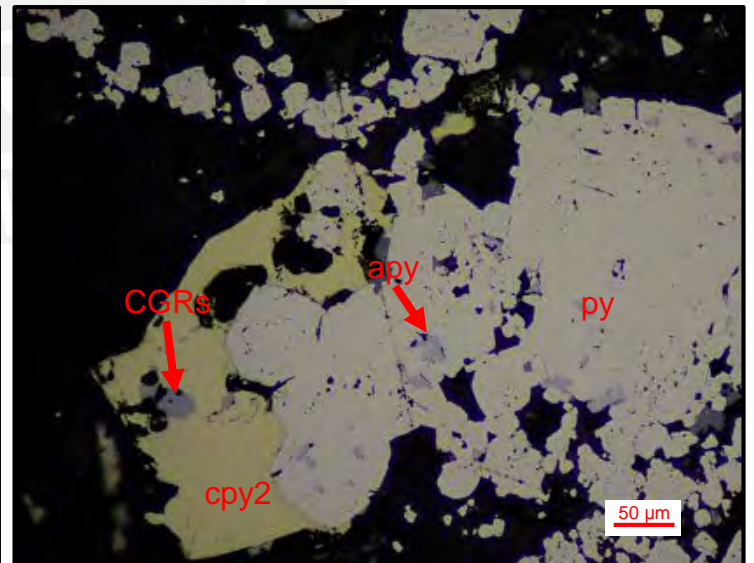
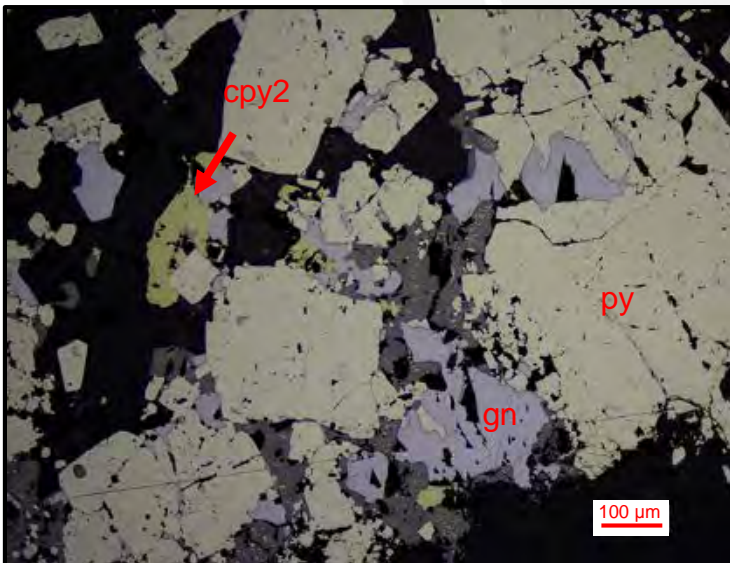
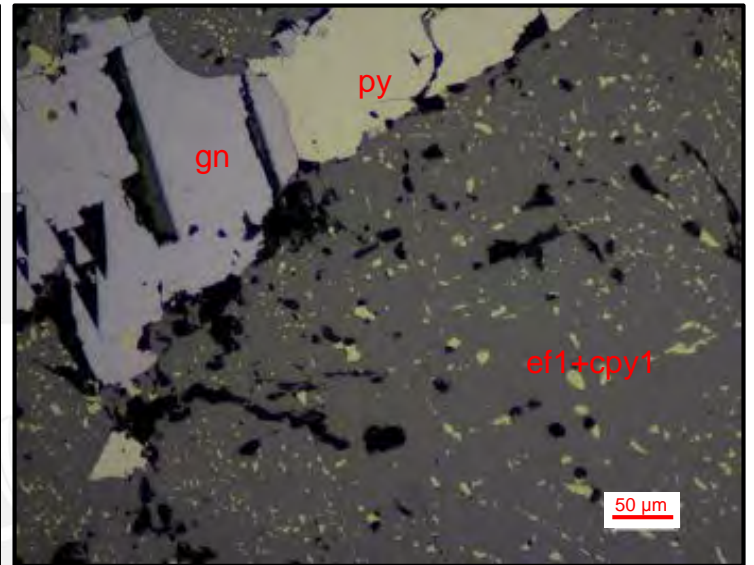
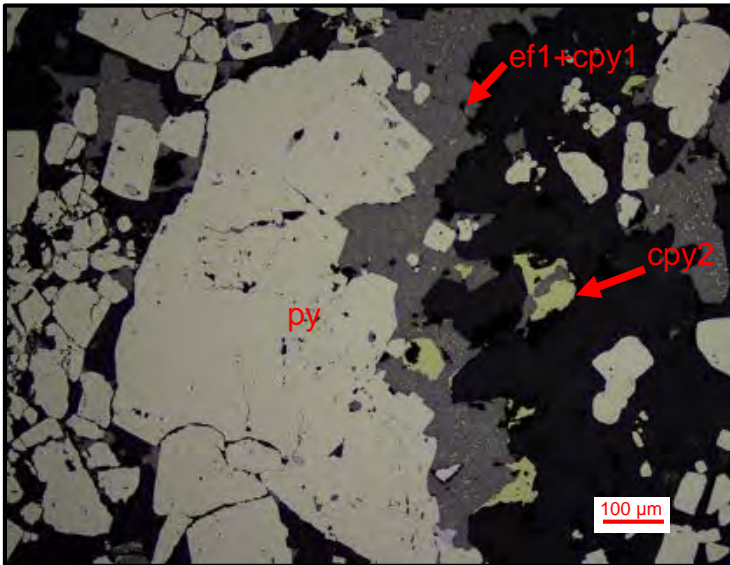
Cristales anhedrales a euhedrales de pirita en matriz de cuarzo y carbonatos, reemplazados por esfalerita (1) con finas diseminaciones de calcopirita (1), calcopirita (2) y galena a través de bordes y microfisuras. De manera puntual, se observa contenidos de cobres grises (tetraedrita-tennantita) y arsenopirita asociadas con pirita alcanzando dimensiones de hasta 500 µm y 75 µm, respectivamente.



2019-MOR-030-SPB

Minerales: pirita + esfalerita (1) + galena + calcopirita (1) + calcopirita (2) ± cobres grises (tetraedrita-tennantita) ± arsenopirita ± bornita

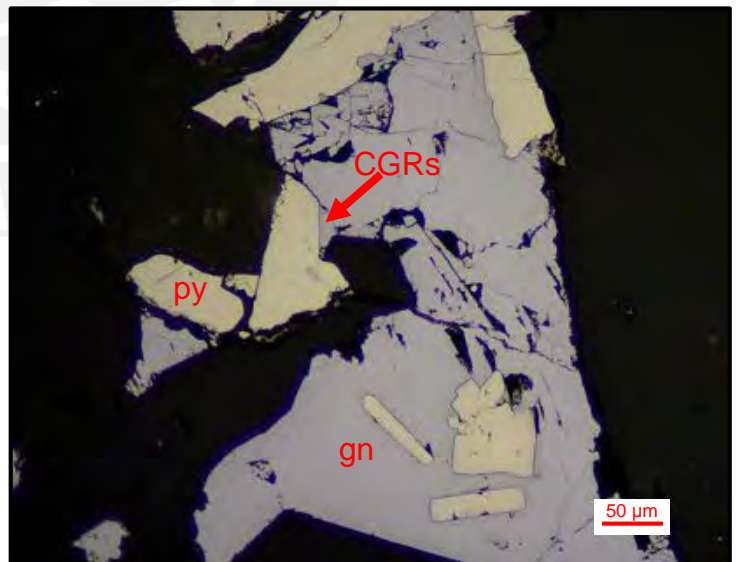
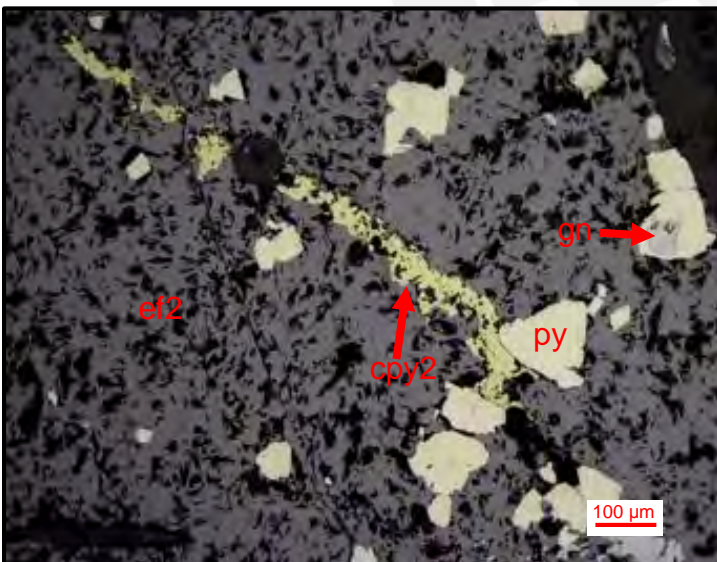
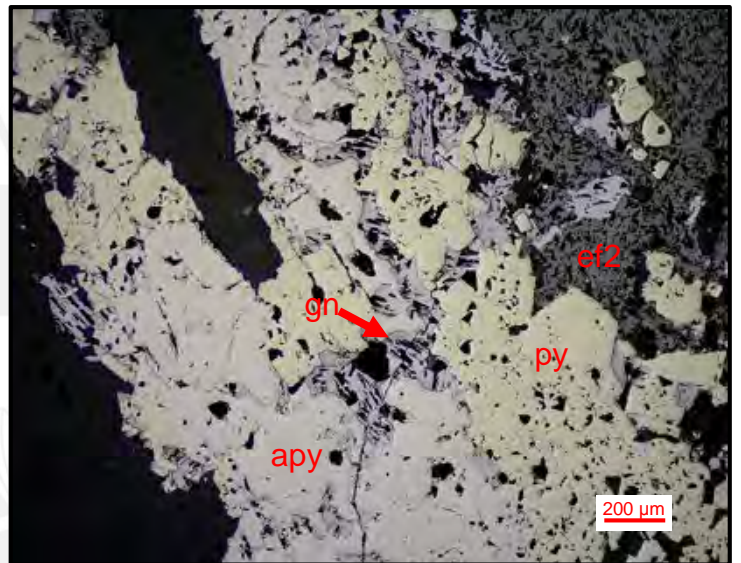
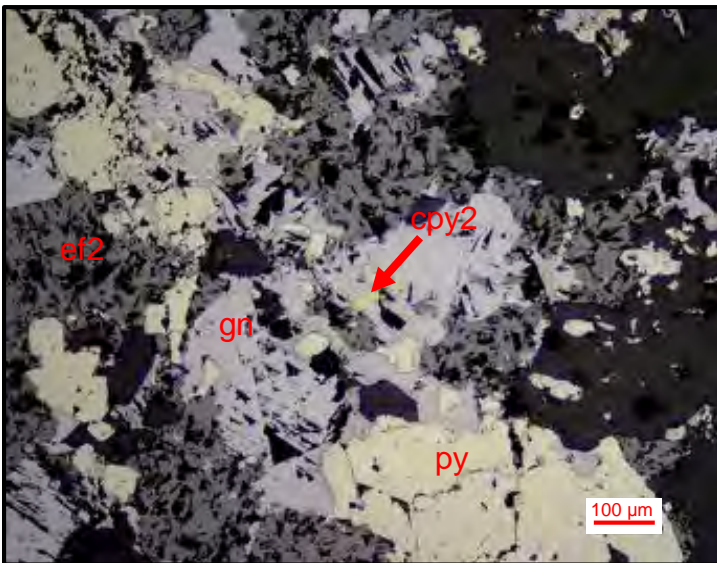
Agregados anhedrales a euhedrales de pirita reemplazadas por esfalerita (1) con abundantes diseminaciones de calcopirita (1), galena y calcopirita (2) desde sus bordes. Además, se observaron cristales de arsenopirita y bornita en porosidades de pirita con dimensiones de hasta 30 µm y 10 µm, respectivamente.



2019-MOR-033-SP

Minerales: esfalerita (2) + pirita + arsenopirita + galena + calcopirita (2) ± cobres grises (tetraedrita-tennantita) ± pirrotina

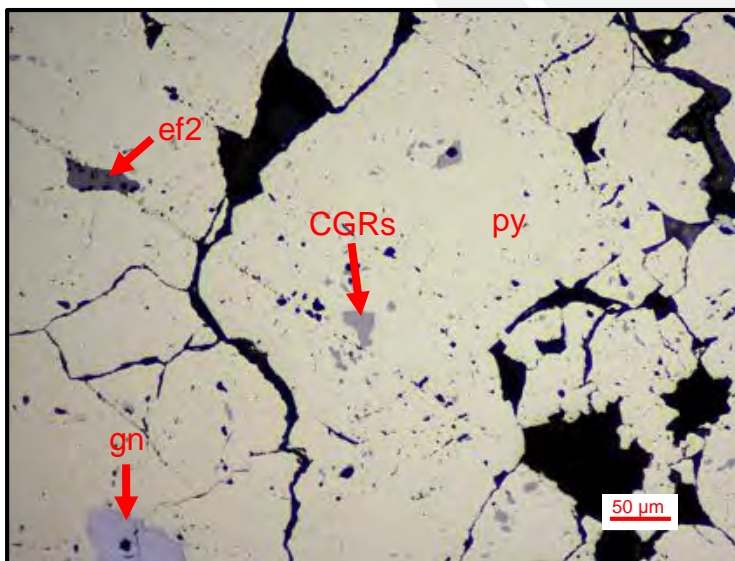
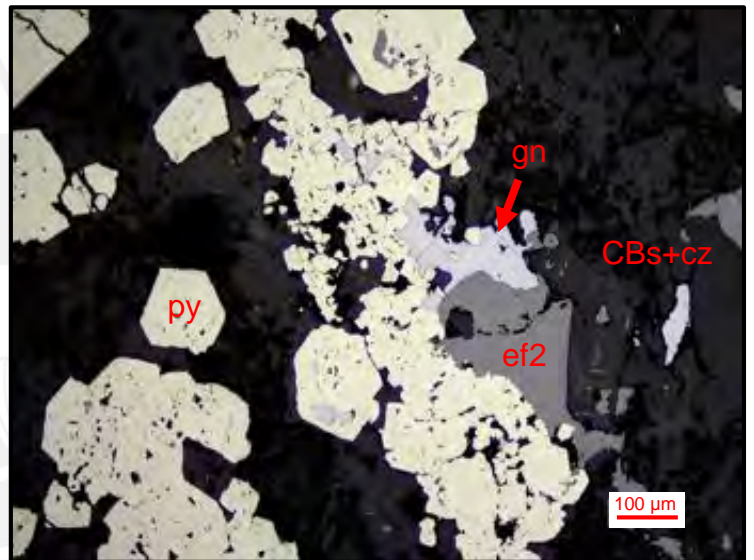
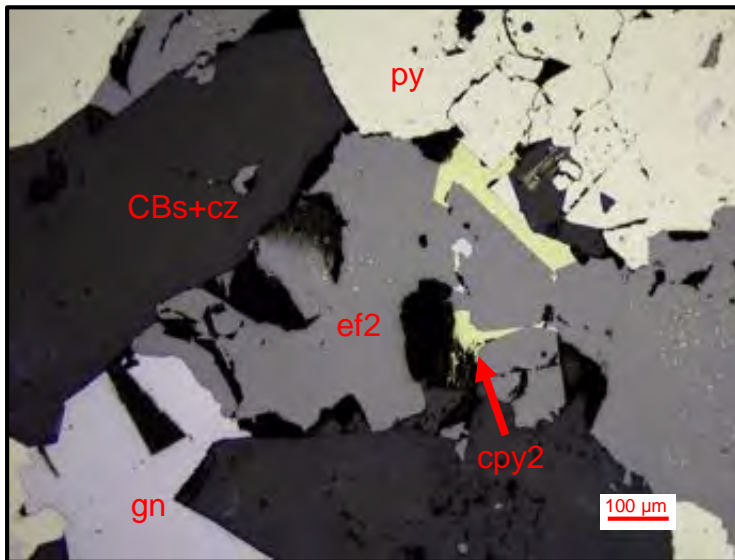
Agregados anhedrales a subhedrales de pirita y arsenopirita, reemplazados por esfalerita (2) y galena. La esfalerita (2) aparece por sectores, con diseminaciones de calcopirita (2). De manera puntual, se aprecian cristales de pirrotina y cobres grises (tetraedrita-tennantita) en intersticios de pirita y galena con tamaños de hasta 50 μm y 30 μm , respectivamente.



2019-MOR-034-SP

Minerales: pirita + esfalerita (1) + galena + calcopirita (1) + esfalerita (2) ± calcopirita (2) ± cobres grises (tetraedrita-tennantita)

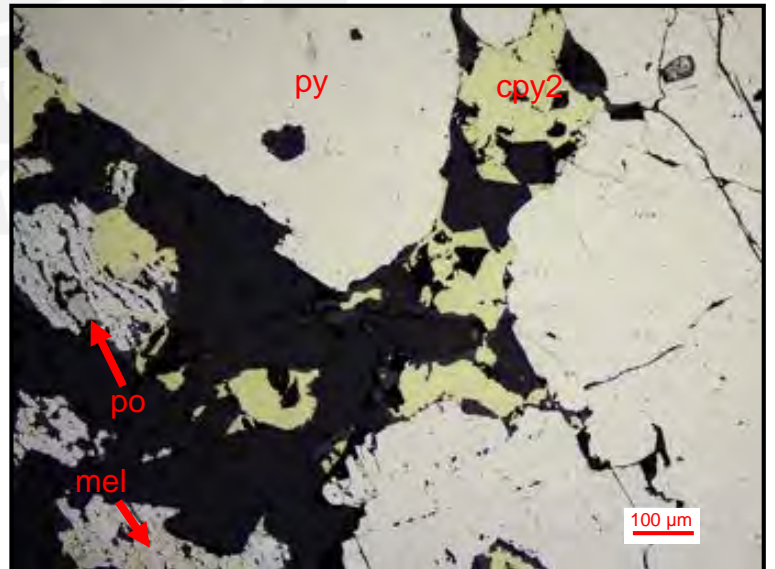
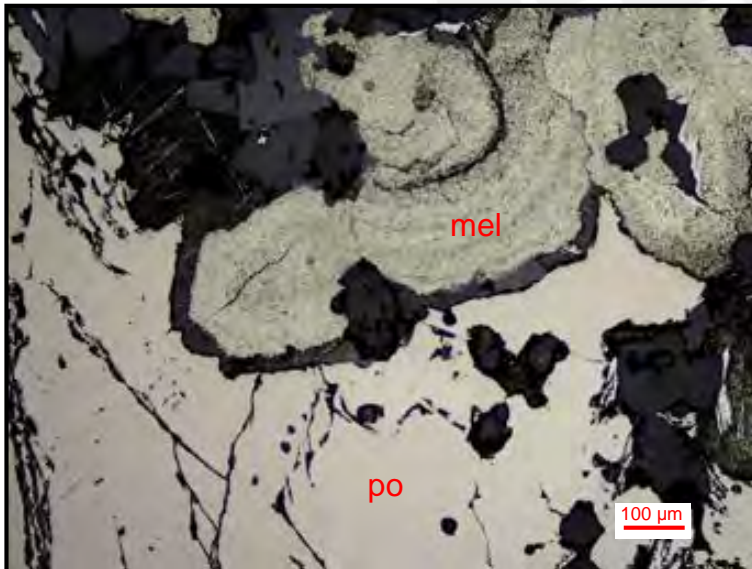
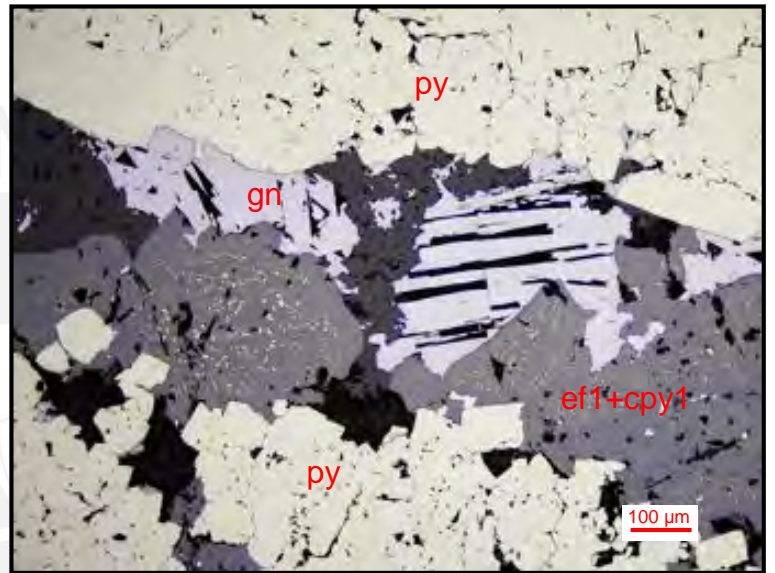
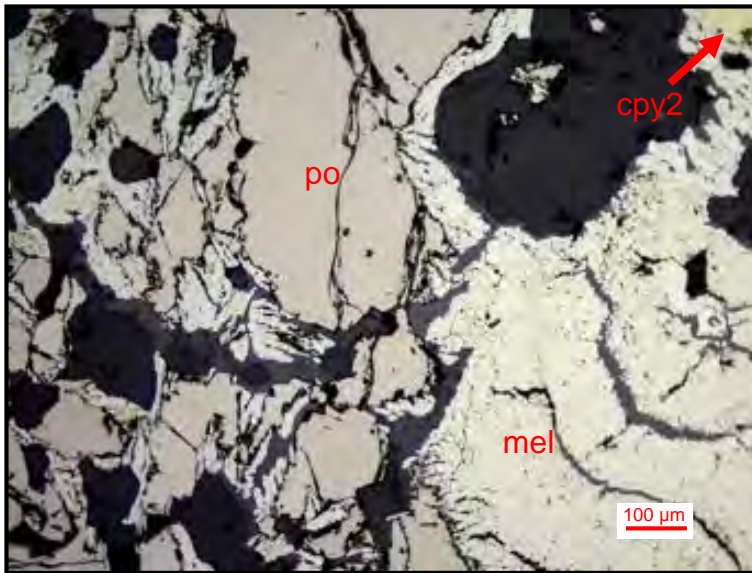
Cristales anhedrales a subhedrales de pirita en matriz de cuarzo y carbonatos, reemplazados principalmente por esfalerita (1) con diseminaciones de calcopirita (1) que han seguido por sectores sus direcciones cristalográficas, esfalerita (2), calcopirita (2) y galena a través de sus bordes e intersticios. Localmente, se observaron cobres grises (tetraedrita-tennantita) con tamaños de hasta 100 µm en porosidades de pirita.



2019-MOR-035-SP

Minerales: pirrotina + pirita + calcopirita (2) + esfalerita (1) + producto intermedio + galena + calcopirita (1)

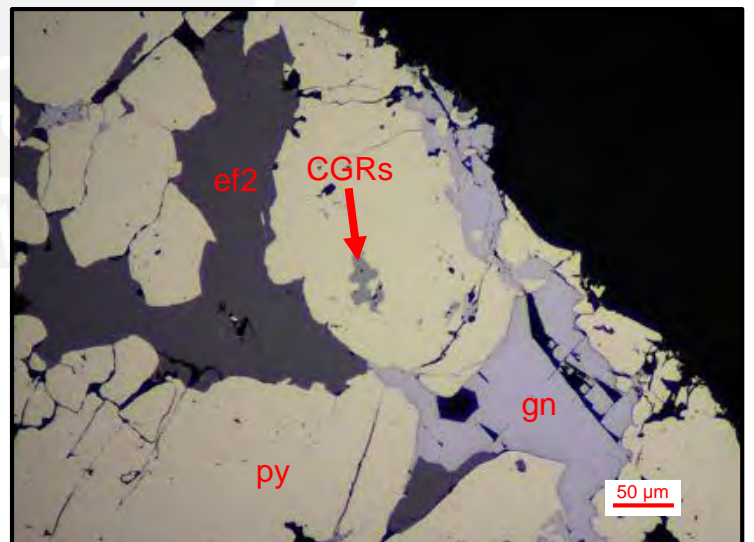
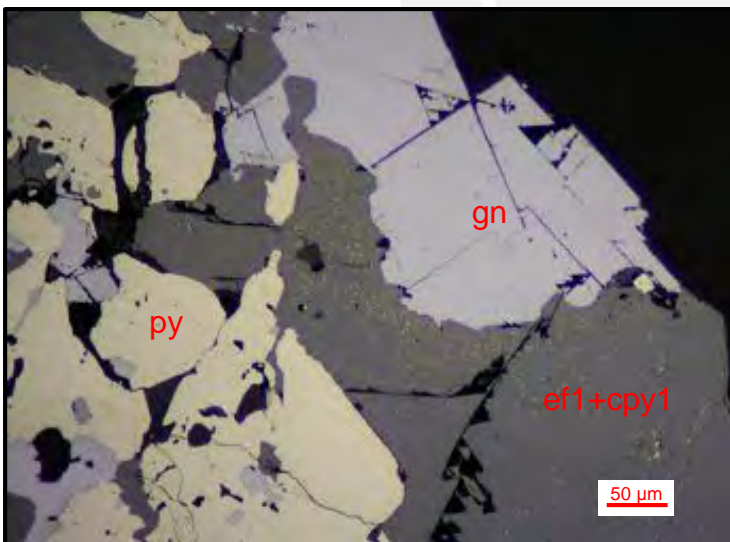
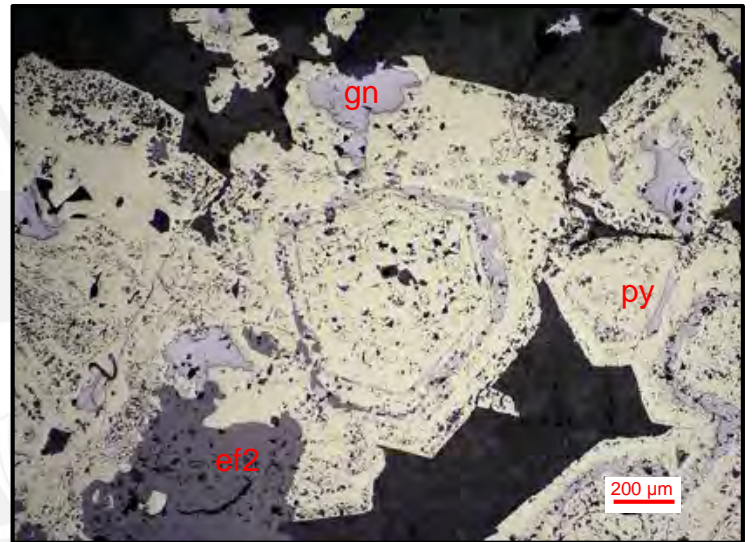
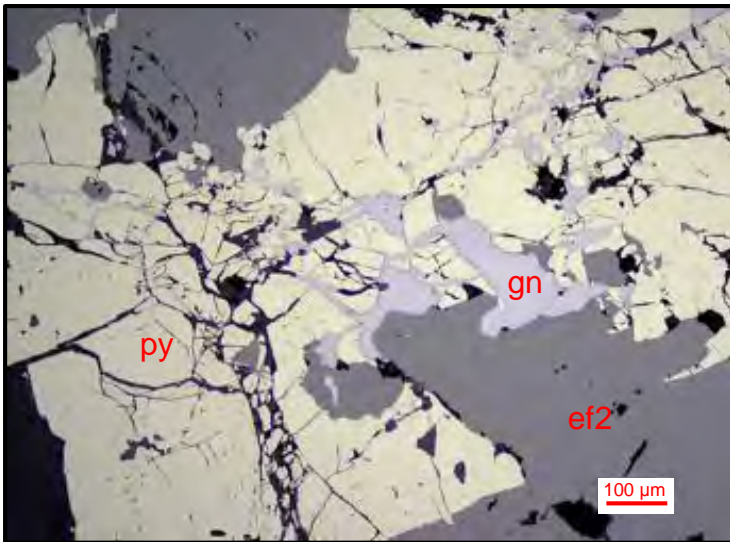
Agregados de pirrotita alterados a marcasita, producto intermedio y melnicovita desde sus bordes. Además, cristales de pirita reemplazados principalmente por esfalerita (1) con finas disseminaciones de calcopirita (1) y galena a través de sus bordes y, en menor medida, por calcopirita (2).



2019-MOR-036-SP

Minerales: esfalerita (1) + pirita + esfalerita (2) + galena ± calcopirita (1) ± calcopirita (2) ± cobres grises (tetraedrita-tennantita)

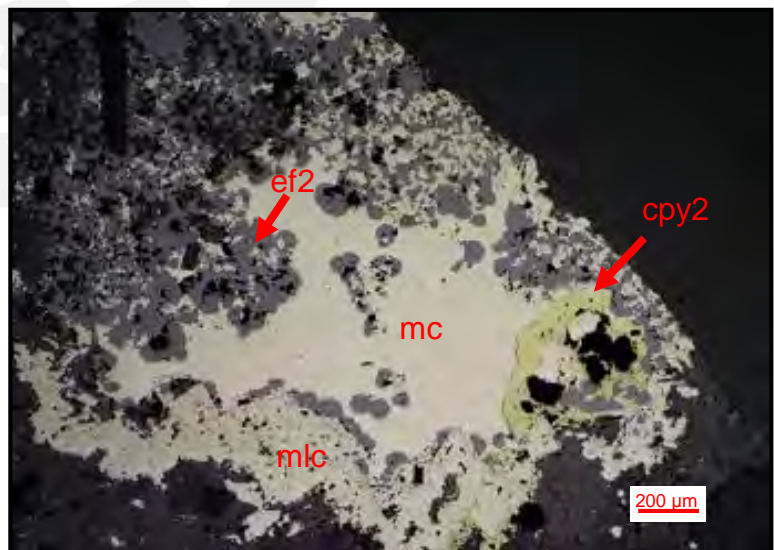
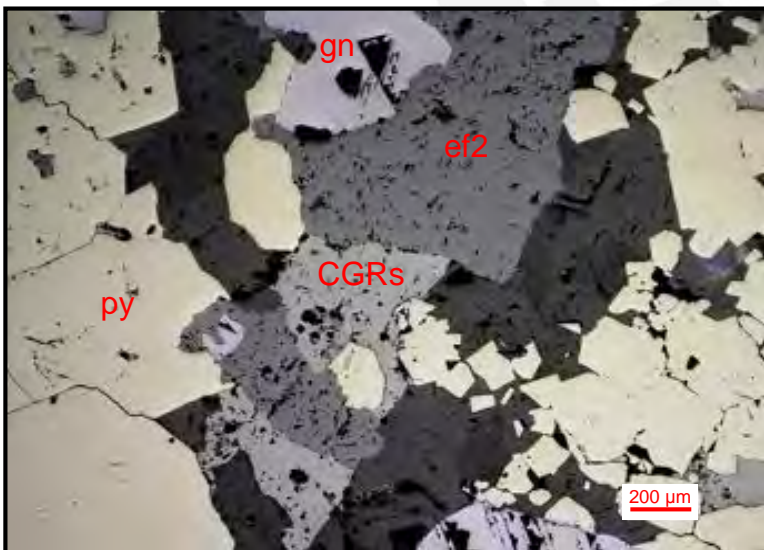
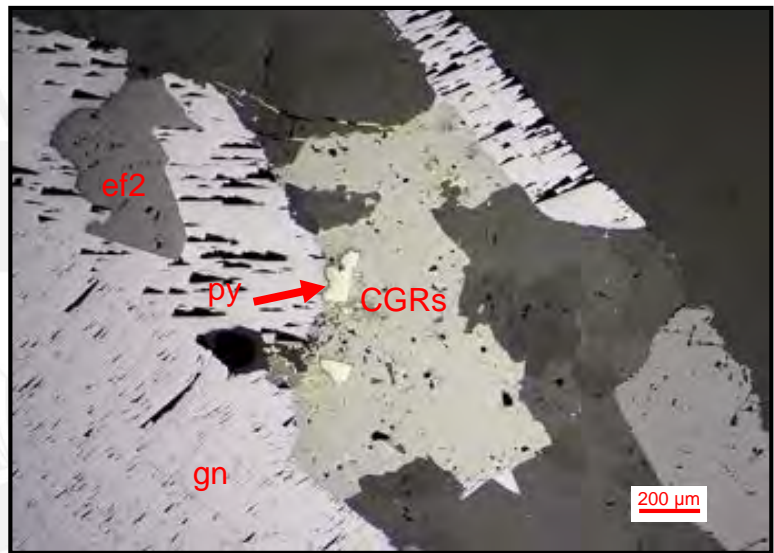
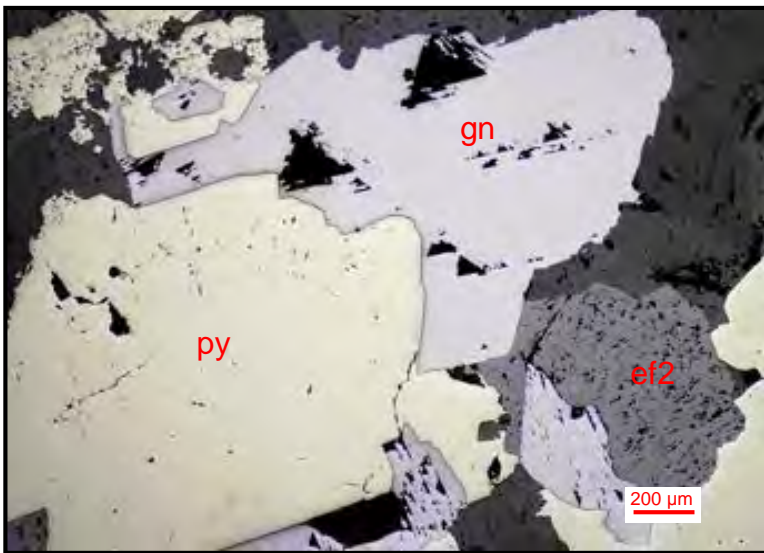
Agregados anhedrales a euhedrales de pirita, reemplazados por esfalerita (1) con finas disseminaciones de calcopirita (1), esfalerita (2) y galena a través de sus microfracturas, cavidades y porosidades. Asimismo, cobres grises (tetraedrita-tennantita) con tamaños de hasta 40 µm ocurren en porosidades de pirita.



2019-MOR-037-SP

Minerales: esfalerita (2) + pirita + galena + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + calcopirita (2) + esfalerita (1) + marcasita + melnicovita

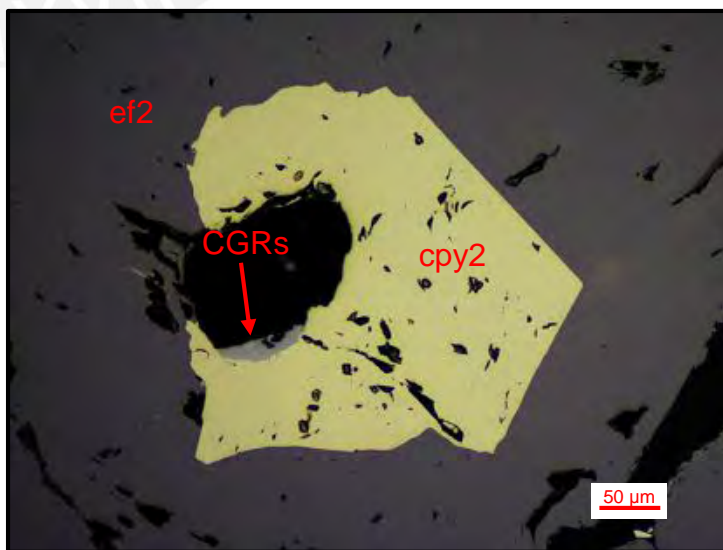
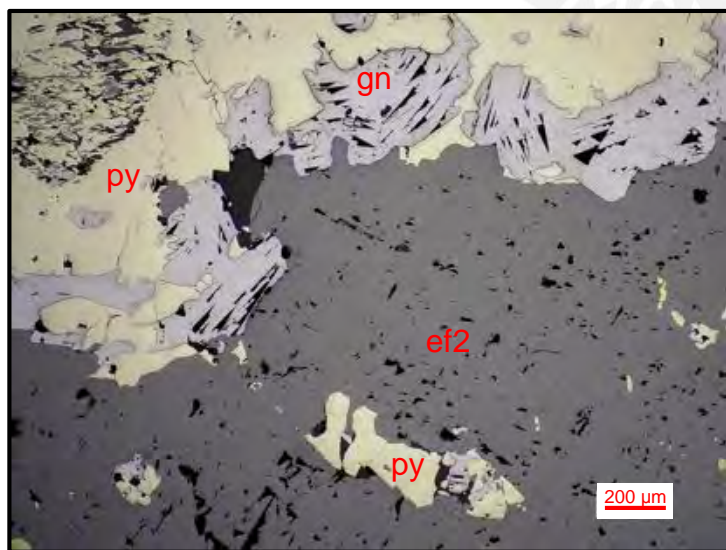
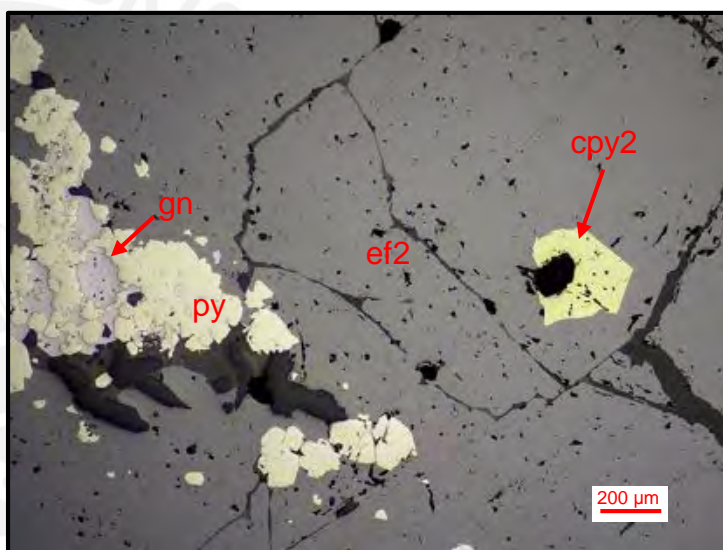
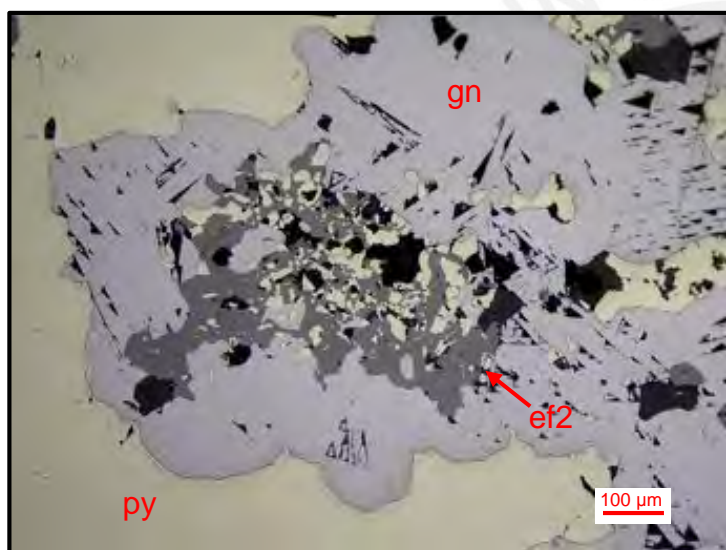
Agregados anhedrales a euhedrales de pirita, principalmente reemplazados por esfalerita (2) y galena, y en menor proporción por cobres grises (tetraedrita-tennantita) desde sus bordes e intersticios. Presencia de calcopirita (2) en porosidades de pirita y esfalerita (2), donde por sectores han sido reemplazados por cobres grises. Ocasionalmente, la pirita se ha alterado a marcasita y melnicovita.



2019-MOR-038-SP

Minerales: esfalerita (2) + pirita + galena + esfalerita (1) + calcopirita (2) ± calcopirita (1) ± cobres grises (tetraedrita-tennantita)

Agregados anhedrales de pirita reemplazados por esfalerita (2) y galena desde sus bordes y porosidades. Por sectores, esfalerita (1) con diseminaciones de calcopirita (1) con inclusiones de calcopirita (2) de hasta 350 μm . Contenido mínimo de cobres grises (tetraedrita-tennantita) localizados en bordes de calcopirita (2) con tamaños máximos de 150 μm y ocasionalmente, en contacto con galena.



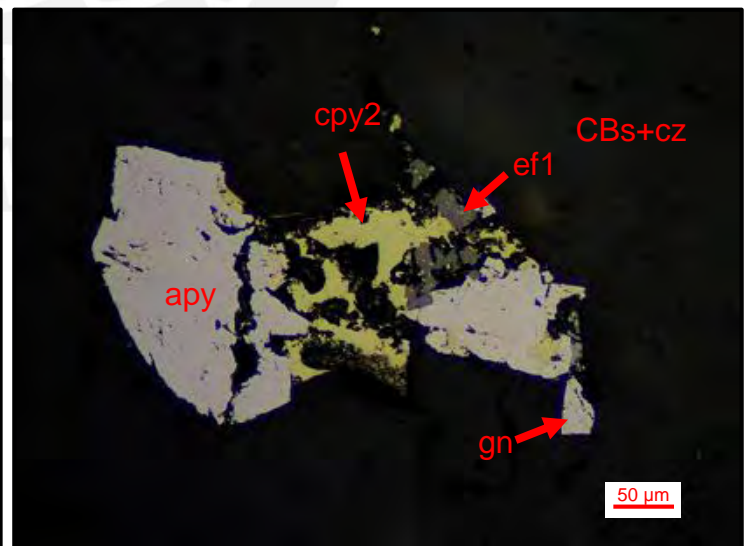
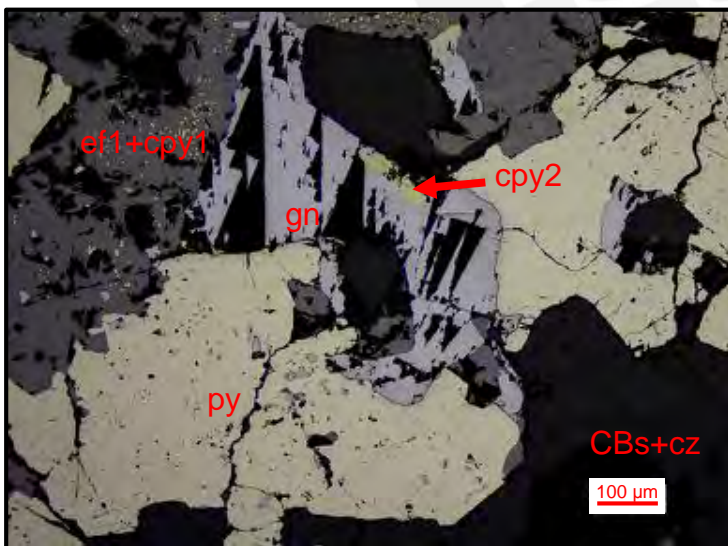
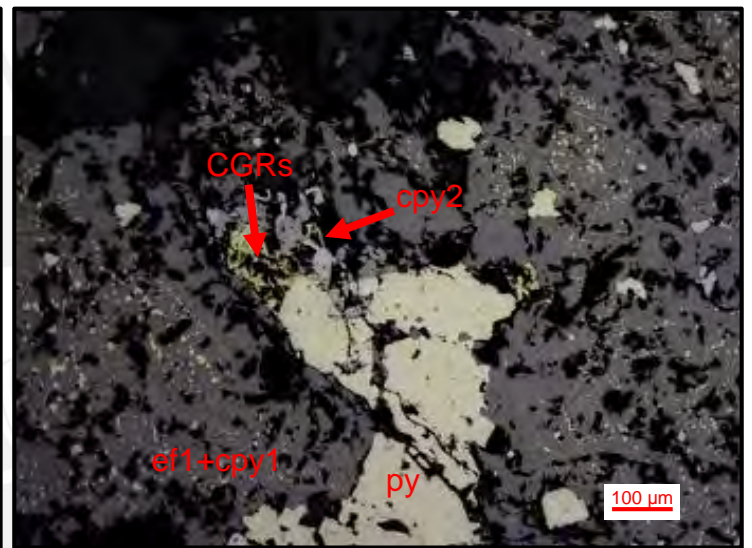
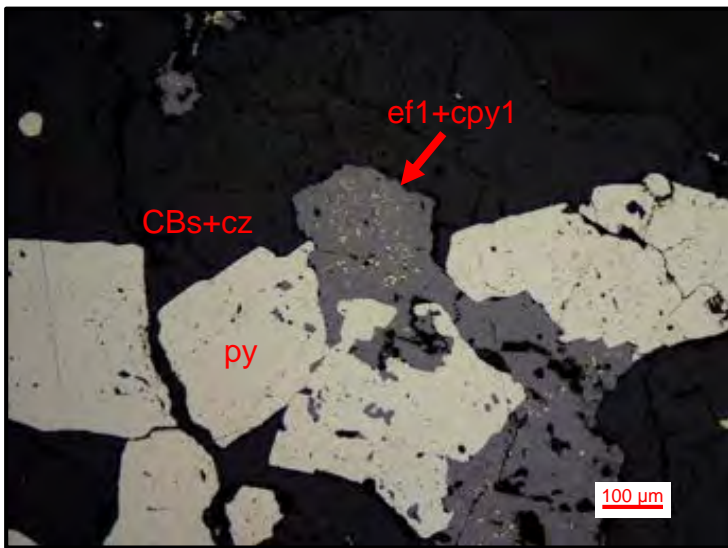


VETA ISABEL

2019-MOR-031-SPA

Minerales: esfalerita (1) + pirita + galena + cobres grises (tetraedrita-tennantita) ± calcopirita (1) ± arsenopirita ± calcopirita (2)

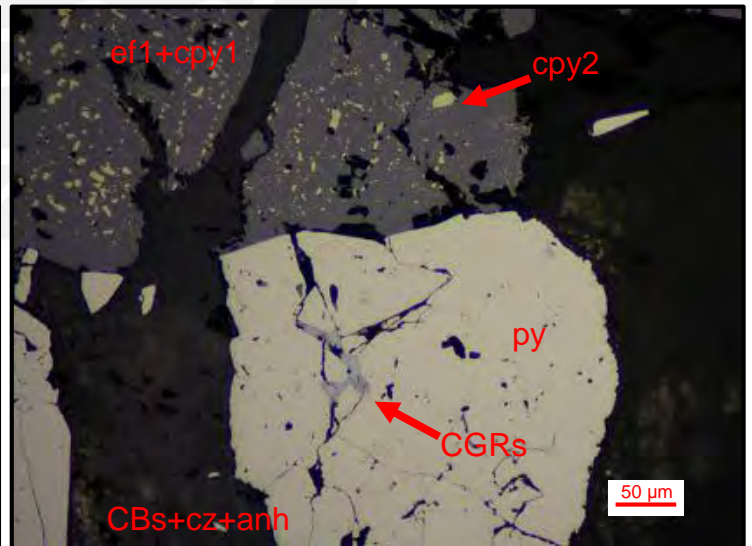
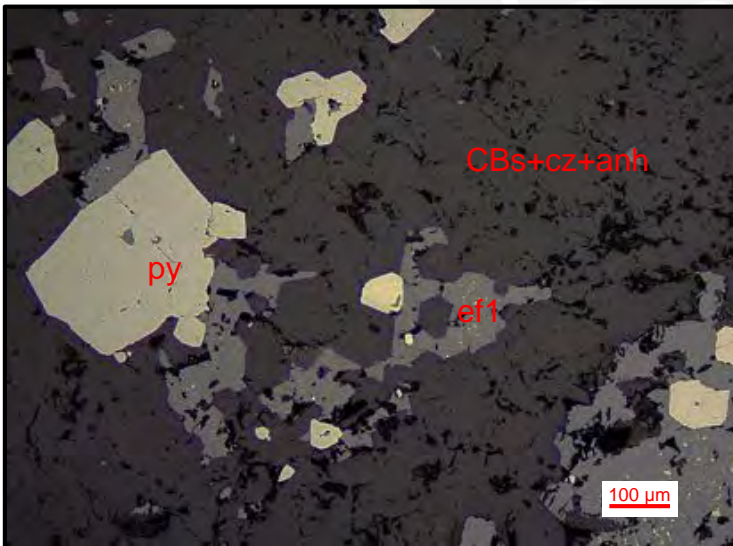
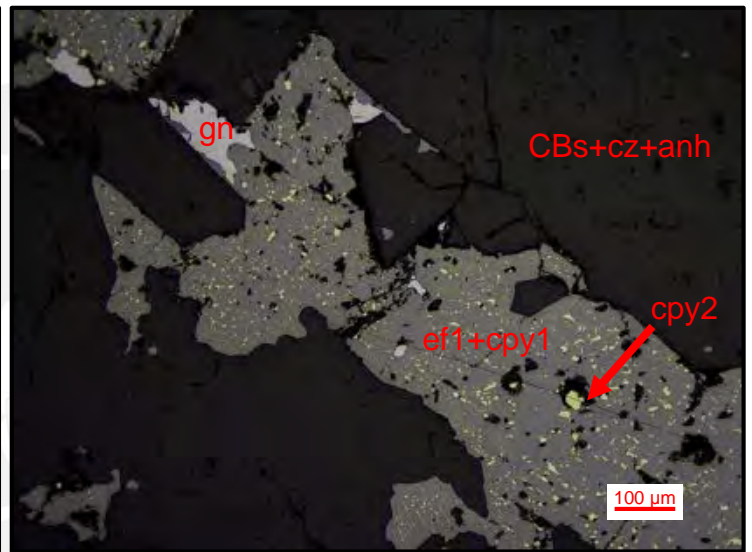
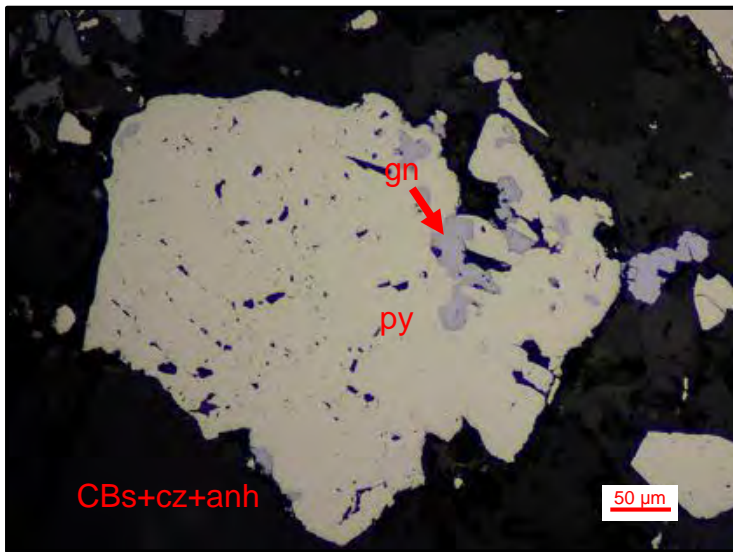
Cristales anhedrales a subhedrales de pirita en matriz de cuarzo y carbonatos, reemplazados por esfalerita (1) con finas diseminaciones de calcopirita (1), galena y, en menor contenido por calcopirita (2) y cobres grises (tetraedrita-tennantita) a partir de sus bordes. Ocasionalmente, oclusiones de pequeños cristales de arsenopirita en pirita de hasta 100 μm .



2019-MOR-031-SPB

Minerales: pirita + esfalerita (1) + galena + calcopirita (2) ± calcopirita (1) ± cobres grises (tetraedrita-tennantita)

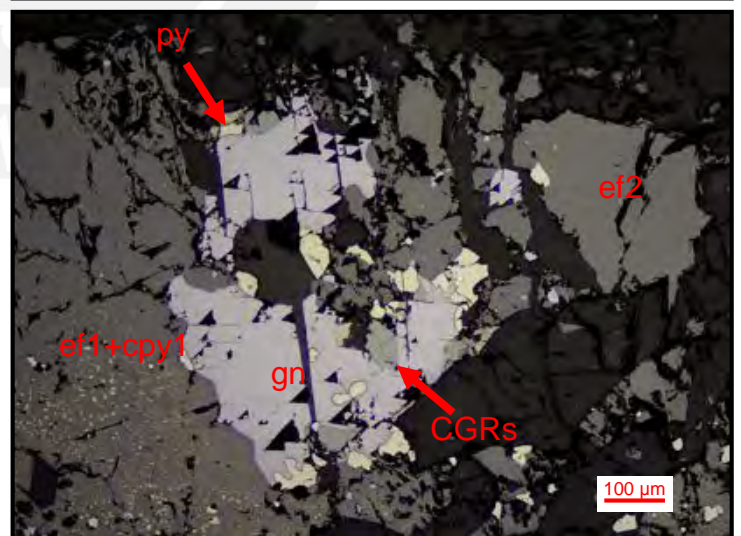
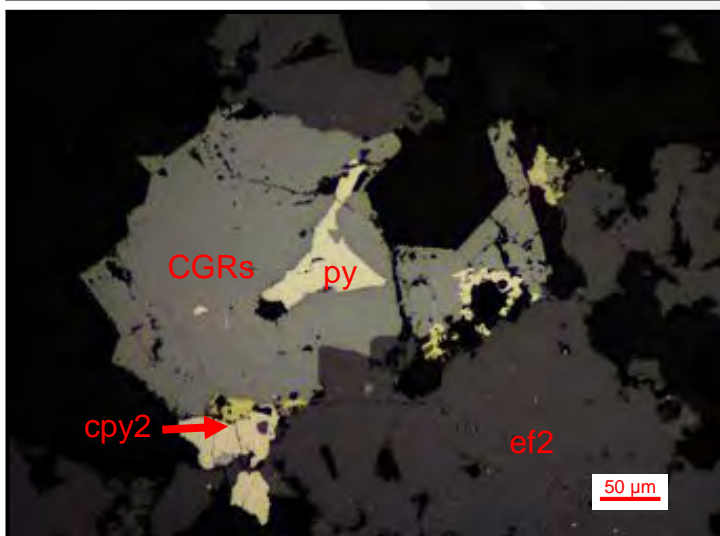
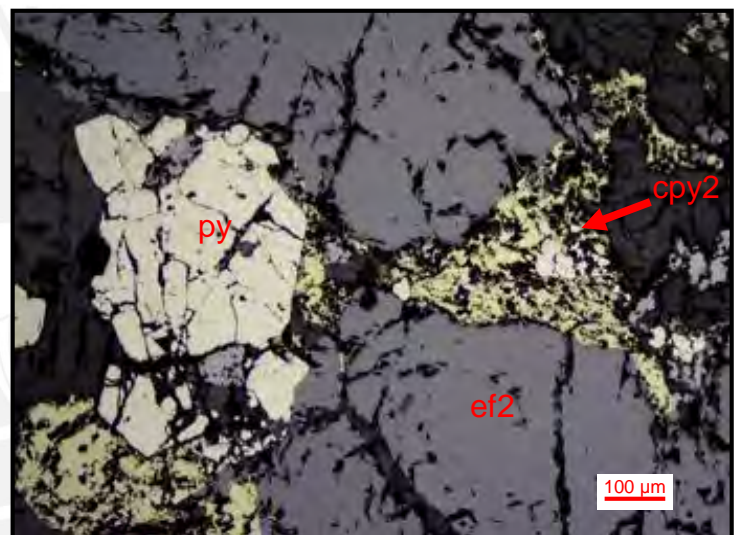
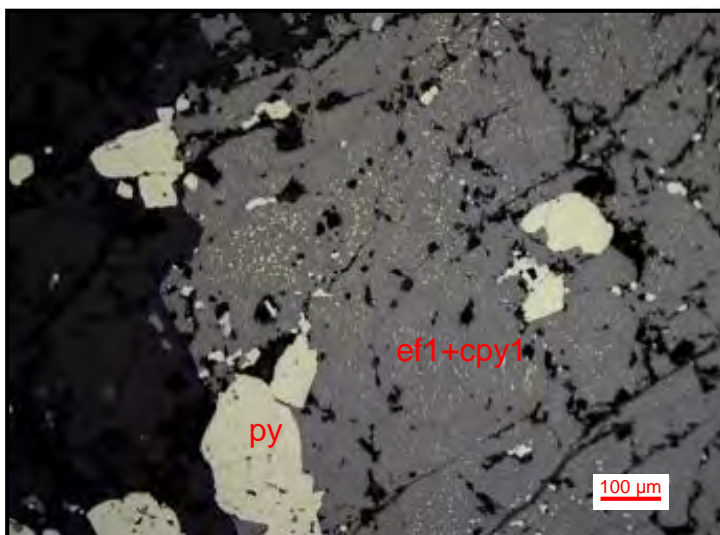
Cristales anhedrales a subhedrales de pirita en matriz de cuarzo, anhidrita y carbonatos, reemplazados por esfalerita (1) con finas disseminaciones de calcopirita (1), calcopirita (2) y galena a través de intersticios y bordes. De manera puntual, presencia de cobres grises (tetraedrita-tennantita) en microfracturas de pirita con dimensiones de hasta 50 µm.



2019-MOR-032-SP

Minerales: esfalerita (2) + pirita + esfalerita (1) + galena + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + calcopirita (2) ± calcopirita (1) ± melnicovita ± bornita

Agregados anhedrales a euhedrales de pirita en matriz de carbonatos, reemplazados por esfalerita (2), esfalerita (1) con diseminaciones de calcopirita (1), galena y cobres grises (tetraedrita-tennantita) a través de sus bordes, microfracturas y porosidades. También se observan agregados de calcopirita (2) en bordes de esfalerita (2) y cobres grises con dimensiones de hasta 350 µm. Por sectores, la pirita ha sido alterada a melnicovita.



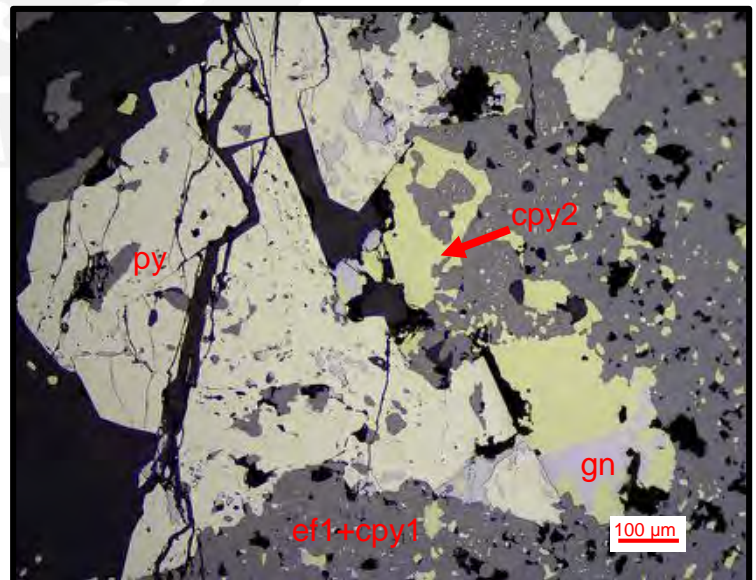
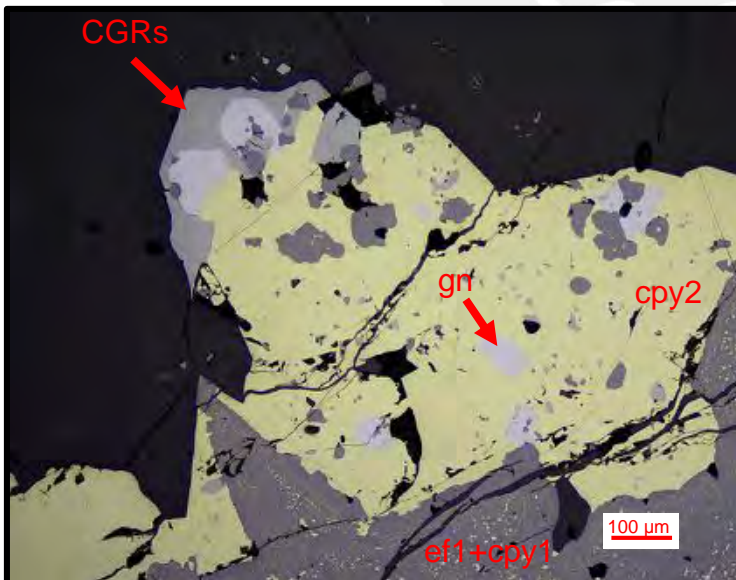
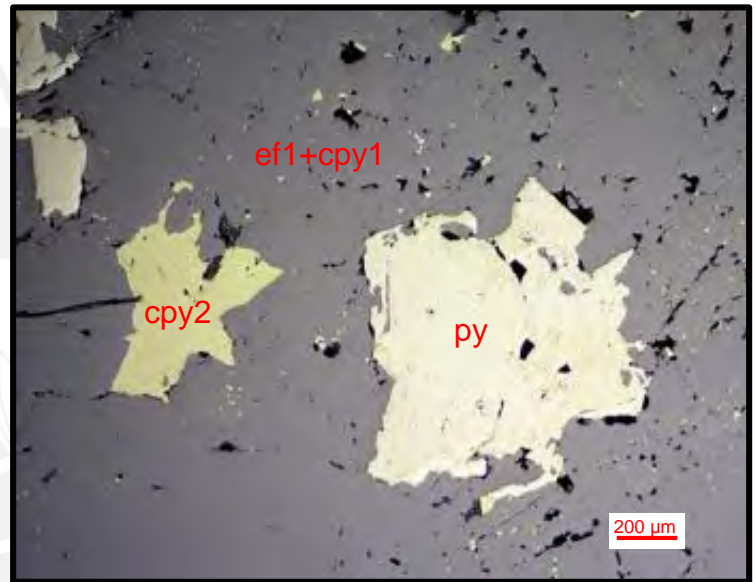
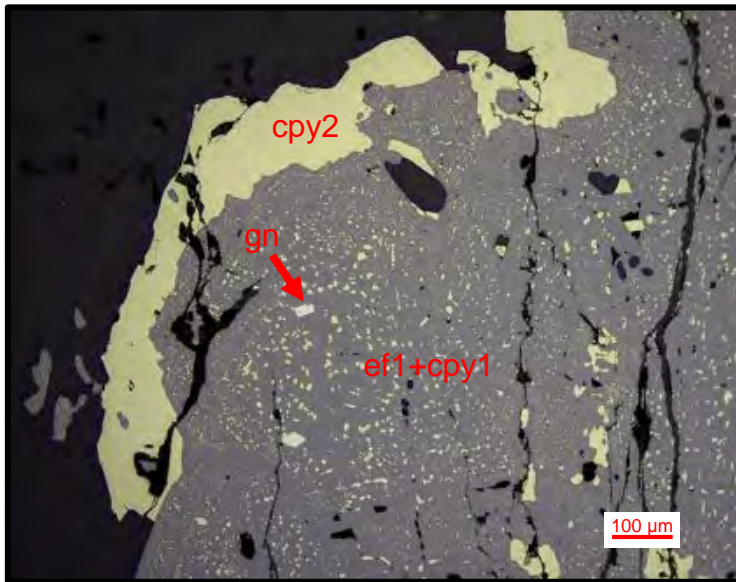
RAMAL ALIANZA



2019-MOR-039-SPA

Minerales: esfalerita (1) + pirita + calcopirita (2) + calcopirita (1) + galena ± cobres grises (tetraedrita-tennantita)

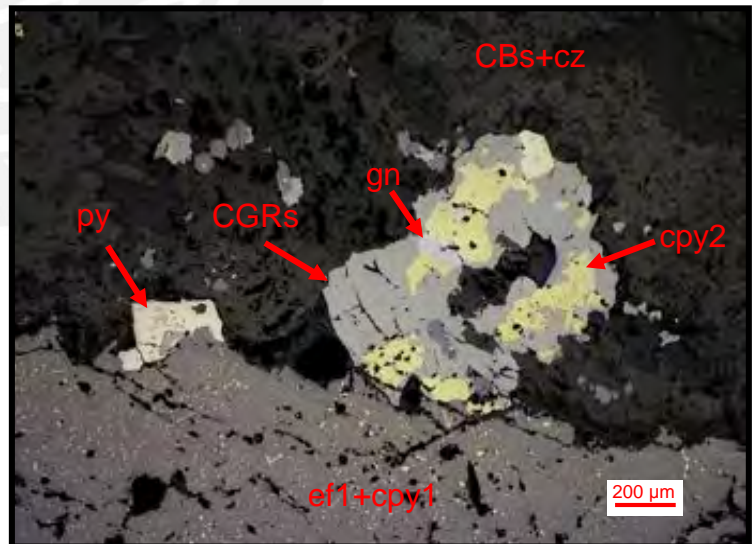
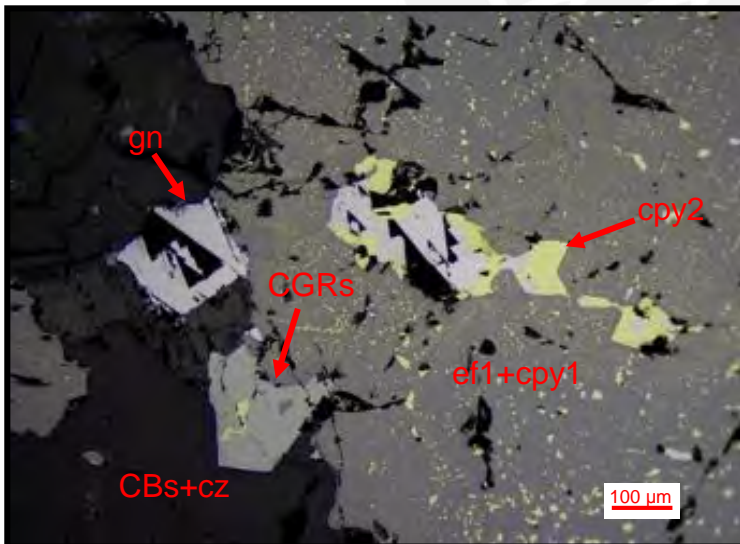
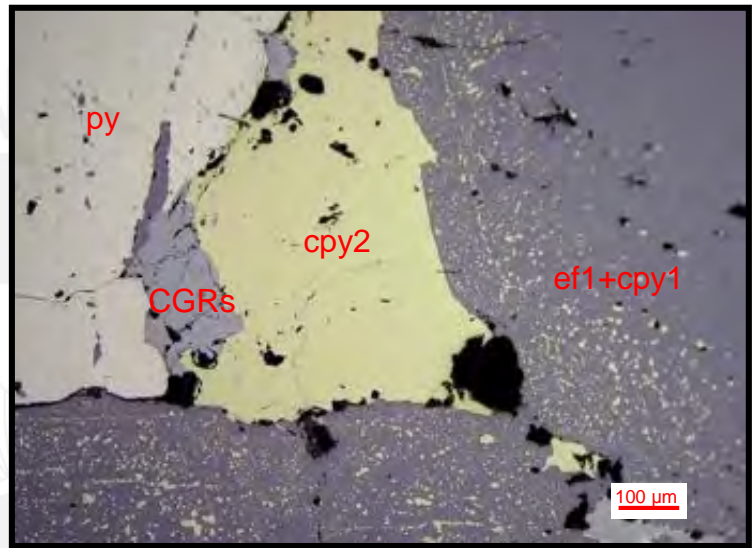
Cristales de pirita reemplazados principalmente por agregados de esfalerita (1) con finas diseminaciones de calcopirita (1) y por cristales de galena desde sus bordes. También, aparecen reemplazados en menor proporción por cobres grises (tetraedrita-tennantita) con tamaños de hasta 200 μm , los cuales han reemplazado a su vez a la esfalerita (1) y cristales de calcopirita (2).



2019-MOR-039-SPB

Minerales: esfalerita (1) + pirita + calcopirita (2) + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + galena + calcopirita (1)

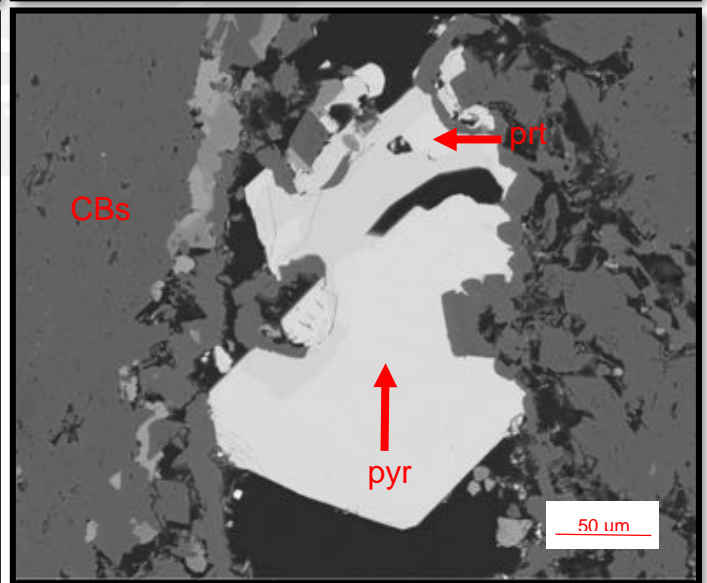
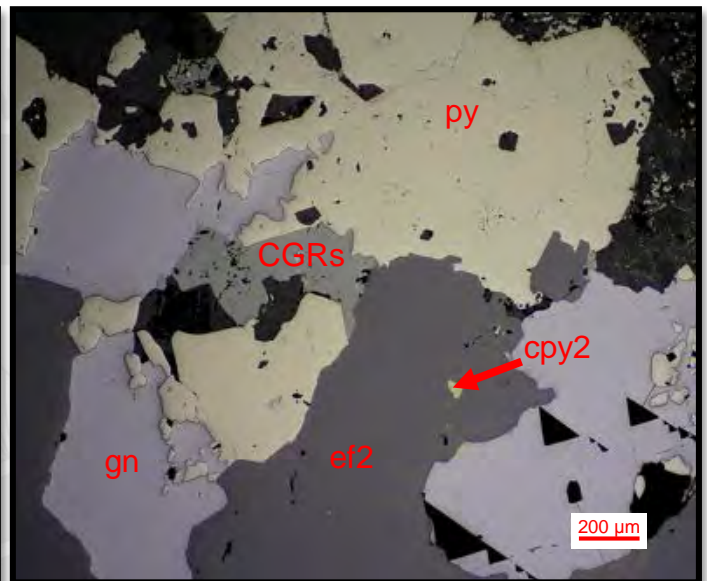
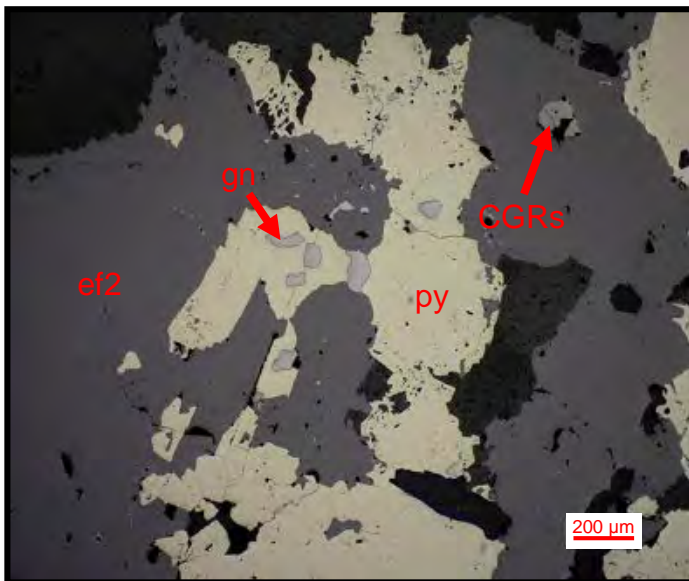
Agregados anhedrales a subhedrales de pirita en matriz de cuarzo y carbonatos, reemplazados por esfalerita (1) con finas diseminaciones de calcopirita (1), calcopirita (2), galena y cobres grises (tetraedrita-tennantita) a través de sus bordes, intersticios y porosidades. Las finas diseminaciones de calcopirita (1) en esfalerita (1) muestran por sectores, una textura zonada.



2019-MOR-040-SP

Minerales: esfalerita (2) + pirita + galena + cobres grises (tetraedrita-tennantita) + calcopirita (2) ± sulfosales de plata (pyrargirita-proustita)

Pirita en agregados anhedrales a euhedrales, que ha sufrido un proceso de recristalización reemplazados por esfalerita (2), calcopirita (2), galena y cobres grises (tetraedrita-tennantita) a través de intersticios y porosidades. De manera local, sulfosales de plata de hasta 220 μm en cuarzo y carbonatos (principalmente rodocrosita).



Anexo C – Resultados de EPMA

(Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona)



ESFALERITA

	Cuerpo/Veta	Ramal Alianza	Ramal Alianza
	Análisis wt.%	2019-MOR-039-SPB-circulo D-ef1-001	2019-MOR-039-SPB-circulo F-ef1-001
D.L.	Generación	SI-1	SI-1
0.12	Sb	0.00	0.00
0.15	In	0.00	0.00
0.07	S	34.23	33.91
0.18	Pb	0.00	0.11
0.44	As	0.13	0.00
0.23	Ga	0.00	0.00
0.10	Ge	0.00	0.04
0.07	Zn	63.30	63.66
0.06	Cu	0.06	0.05
0.05	Fe	3.51	3.24
0.06	Cd	0.11	0.26
0.05	Ag	0.00	0.02
0.05	Sn	0.00	0.04
	Total	101.34	101.33

apfu	Sb	0.00	0.00
	In	0.00	0.00
	S	1.00	1.00
	Pb	0.00	0.00
	As	0.00	0.00
	Ga	0.00	0.00
	Ge	0.00	0.00
	Zn	0.91	0.92
	Cu	0.00	0.00
	Fe	0.06	0.05
	Cd	0.00	0.00
	Ag	0.00	0.00
	Sn	0.00	0.00



COBRES GRISES

	Cuerpo/Veta	Cuerpo Rosita/Veta Rubí
D.L.	Análisis wt.%	2019-MOR-037-SP-circulo E-CGR
0.12	Sb	23.82
0.15	In	0.00
0.07	S	25.08
0.18	Pb	0.13
0.44	As	3.68
0.23	Ga	0.00
0.10	Ge	0.00
0.07	Zn	6.95
0.06	Cu	33.17
0.05	Fe	0.55
0.06	Cd	0.00
0.05	Ag	7.84
0.05	Sn	0.00
	Total	101.23

apfu	Sb	3.20
	In	0.00
	S	12.79
	Pb	0.00
	As	0.80
	Ga	0.00
	Ge	0.00
	Zn	1.74
	Cu	8.53
	Fe	0.16
	Cd	0.00
	Ag	1.19
	Sn	0.00

