



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Mineralización en sectores
selectos del distrito minero
de Fresnillo, Zacatecas**

T E S I S

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Rodolfo Rafael Avalos Alejandre

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Carlos Eduardo Garza González Vélez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Este trabajo está dedicado a:

Mis padres Ana Laura y Rafael;

por su educación y ejemplo, por su constante e interminable trabajo y sacrificio, por sus cuidados. Este trabajo es también resultado de su esfuerzo, sin ustedes no hubiera sido posible.

Gracias.

Mi hermano Luis Alberto;

tu presencia y acompañamiento llena de sentido y enriquece mi vida de más formas de las que te imaginas. Por nuestros proyectos y también por tu carrera como médico. También eres tú un ejemplo para mí.

La Facultad de Ingeniería;

por brindarme mucho más que una carrera. Por la formación, experiencia, trabajo y responsabilidades. Para mis profesores.

Para mi Lupita;

por convertirte en el bello centro de mi vida y el principal motivo para superarme y ser mejor, de manera cotidiana. Muchas gracias.

Para mis amigos

Nalle, Alex, Edgar, Hugo, Yina, Hansel, Diego, Héctor, Gus, Isra, Angie, Rubén, Pedro y todos aquellos muchos que no he mencionado. Para Astro Camp. Por la suerte de tener al mejor círculo alrededor de mí, acompañándome siempre, haciendo que mi vida sea mejor, y de mí, una mejor persona. Gracias.

Agradecimientos

Agradezco al **Dr. Carlos Garza** por su acompañamiento a lo largo de estos años. Porque, como mentor y amigo, ha representado mucho más que el papel de un profesor en mi formación. Me siento muy orgulloso del tiempo que he tenido la oportunidad de trabajar con él.

Agradezco a la **Mtra. Isabel Domínguez Trejo**, por ser el primer contacto que tuve con la DICT, viniendo de otra carrera. Por abrirme las puertas de esta división y permitir mi ingreso a los estudios que culminan con el presente trabajo. Sin aquél visto bueno, ni este trabajo ni mi carrera misma serían posibles.

Agradezco al **Mtro. Miguel Vera Ocampo**, por ser quien me dotó tanto del conocimiento teórico y práctico básico geológico, como del gusto inicial por la geología.

Agradezco al **Dr. Dante Morán, Ing. José Luis Arcos, Mtro. Noé Santillán, Mtro. Armando Alatorre, Dr. Armando Ortiz Prado, Mtra. Mayverena Jurado, Ing. Rolando Peralta, Ing. Juan Ocáriz Castelazo**; por las valiosas lecciones y enseñanzas que me dejaron, tanto dentro como fuera de las aulas.

Agradezco al **Dr. Giovanni Sosa Ceballos, Fis. Noemí Salazar** y al **Fis. Omar Escamilla**, por las facilidades brindadas para obtener material que enriqueciera a este trabajo.

Agradezco al **Laboratorio de Microanálisis del Instituto de Geofísica de la UNAM, campus Morelia** por las facilidades brindadas para enriquecer este trabajo con los análisis químicos realizados a las muestras.

Mineralización en sectores selectos del distrito minero de Fresnillo, Zacatecas

RESUMEN	1
1. GENERALIDADES.	3
1.1. Objetivos del estudio	4
1.2. Método de trabajo.	4
1.3. Localización y fisiografía.	6
1.4. Comunicación y población.	7
1.5. Clima y vegetación.	8
2. BOSQUEJO HISTÓRICO DE LA ACTIVIDAD MINERA EN FRESNILLO EN LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XIX.	9
2.1. Antecedentes históricos y explotación en la zona de minas de Proaño.	10
2.2. Datos de producción.	14
3. GEOLOGÍA.	17
3.1. Estratigrafía regional.	19
3.2. Evolución tectónica.	26
3.3. Geología estructural.	31
4. YACIMIENTOS MINERALES.	34
4.1. Sistema de Proaño.	35
4.2. Sistema San Ricardo, veta Andrea.	35
4.3. Veta San Carlos.	36

Commented [CGGV1]: Faltó resumen

Commented [CGGV2]: El espaciado, en cualquier renglón, párrafo, título y subtítulo, el texto deberá estar justificado

4.4. Método de trabajo	37
4.4.1. Ejemplares mineralógicos colectados en la segunda mitad del siglo XIX de la colección mineralógica "Andrés Manuel del Río".	39
4.4.1.1. Descripción macroscópica.	39
4.4.1.2. Estudios minerográficos.	77
4.4.2. Muestras selectas de las explotaciones recientes de la veta Andrea y la veta San Carlos.	88
4.4.2.1. Descripción macroscópica.	88
4.4.2.2. Estudios minerográficos.	96
4.4.3. Análisis químicos cuantitativos.	101
4.5. Paragénesis y sucesión.	114
5. PERSPECTIVAS E IMPLICACIONES EN LA EXPLORACIÓN.	118
5.1. Contrastes a nivel de distrito minero.	119
5.2. Implicaciones y perspectivas en la exploración.	120
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	124
Fuentes de Información	129

Resumen

El distrito minero de Fresnillo, Zacatecas, es el mayor productor de plata a nivel mundial y se ha mantenido como uno de los principales motores económicos a nivel nacional desde hace casi quinientos años.

En el presente trabajo se realizó, primeramente, una investigación referente a la historia del distrito minero, a la geología y estratigrafía regional y evolución tectónica, como marco teórico.

Se realizó una búsqueda de muestras, que procedieran del distrito minero de Fresnillo, correspondientes con la segunda mitad del siglo XIX e inicios del siglo XX, de la Colección Mineralógica *Andrés Manuel del Río*, de la Facultad de Ingeniería. Asimismo, se dispuso de dos muestras selectas de estructuras de más reciente explotación: la veta Andrea y la veta San Carlos, ambas a mayor distancia del célebre Cerro Proaño.

Las muestras fueron descritas en muestras de mano, se realizaron secciones pulidas para su descripción y análisis en el microscopio minerográfico y, finalmente, se enviaron algunos campos con interrogantes de interés al Laboratorio de Microanálisis del Instituto de Geofísica de la UNAM, *campus* Morelia. En general, se determinó una sucesión que comienza con una etapa de silicificación junto con pirita, luego una etapa de cristalización de sulfuros metálicos (incluida la pirargirita) y, finalmente, una etapa de carbonatación y oxidación. La paragénesis propuesta mostró ser congruente con la descrita previamente en el distrito minero.

Se observaron algunos contrastes texturales de interés y variaciones químico-mineralógicas en función a la distancia al Cerro Proaño. Las esfaleritas muestran exsolución, algunas de calcopirita mientras que las otras, de pirrotita. Las pirargiritas muestran grados de cristalinidad distintos, en función a la misma distancia; siendo cristalizaciones gruesas aquellas cercanas a Proaño y cristalizaciones corroídas y oxidadas hacia la veta San Carlos, punto de mayor lejanía y profundidad respecto al Cerro Proaño. Los análisis químicos cuantitativos confirmaron la presencia de plata en sulfosales de cobre (¿argentotetraedrita o freibergita? análisis de microsonda en progreso), la presencia de miargirita, que es una sulfosal de plata de menor temperatura que la pirargirita, en las cercanías de Proaño, así como la presencia de yodo en solución sólida, en un cristal de miargirita

Commented [CGGV3]: Rafa: Ya en el examen señalas verbalmente, si amerita la ocasión, la dificultad que existe de tomar muestras por "políticas" de la empresa

Commented [CGGV4]: Por favor checa bien esta idea, porque a lo mejor estoy exagerando!

Commented [CGGV5]: En qué mineral está el yodo? Al parecer en pirargirita

incluido dentro de otro de pirargirita, en este mismo sector; asimismo, se identificó arsenopirita como una fase no determinada durante la mineragrafía.

Con base en los análisis y datos generados se infiere un periodo de mineralización de mayor temperatura en la zona de la veta San Carlos, hacia el sur del Cerro Proaño. En este sector es manifiesto un basculamiento de las unidades litológicas (De Cserna, 1976), por lo que también es indispensable precisar las unidades que encajonan la mineralización (Grupo Proaño). Se sugiere enriquecer la información químico-mineralógica basada en estudios en microsonda, el esclarecimiento del estricto orden estratigráfico de la columna correspondiente al distrito minero, así como la preservación de muestras mineralizadas de estructuras de reciente descubrimiento y producción (conformación de "litotecas"). Finalmente, se propone como hipótesis, la existencia de un cuerpo ígneo plutónico sepultado hacia el sur del distrito minero de Fresnillo, que determinó la distribución de los diversos tipos de mineralizaciones y, como consecuencia, un gran potencial metálico a profundidad del que falta mucho por explorar.

Commented [CGGV6]: Qué evidencias se tienen en la literatura de dicho basculamiento?? ¿Por qué basculamiento?

GENERALIDADES

Capítulo 1



Fig. 1. Panorámica de la unidad minera Fresnillo, Fresnillo PLC, Fresnillo, Zacatecas. Se observa el tiro general iluminado. Al fondo, el perfil del Cerro Proaño, lugar en donde inició la historia del distrito minero de Fresnillo, desde su descubrimiento en [1551].

Commented [CGGV7]: Muy buena foto!

1.1. Objetivos del trabajo

Commented [CGGV8]: Es indispensable NO perder las ideas fundamentales presentadas en el Fx0. Como podrás notar se ligan el objetivo general con la justificación en los grandes propósitos del trabajo

La presente investigación se fundamentó en la generación de datos mineralógicos en sectores selectos de los niveles de explotación de la segunda mitad del siglo XIX en la mina Proaño, así como de puntos de interés en los niveles actuales de explotación de las vetas Andrea y San Carlos en el distrito minero de Fresnillo. El objetivo fue conformar un primer esquema de correlación espacio temporal sobre la variabilidad mineralógica entre los niveles antiguos de explotación y los niveles actuales, con el objetivo de proponer ideas sobre las evoluciones mineralógicas, que pudieran tener un impacto o significados en la exploración de yacimientos asociados ocultos

Commented [CGGV9]: Es necesario que incluyas los objetivos ya corregidos!

1.2. Método general de trabajo

Para lograr los objetivos planteados, primero se realizó una investigación y recopilación de la Geología y yacimientos minerales del distrito minero de Fresnillo, así como información del desarrollo histórico y datos disponibles de explotación del yacimiento, con especial énfasis en el siglo XIX (zona de Proaño).

A partir de la información geológica se elaboró un meticuloso análisis y una síntesis de la geología regional y la evolución tectónica. Posteriormente, se integró y analizó información general y específica, acerca de la Geología de los cuerpos mineralizados, de tres sectores distantes entre sí: la antigua zona de explotación del Cerro Proaño, la recientemente descubierta veta Andrea (2019, comunicación personal), que pertenece a la familia de vetas del filón San Ricardo y, por último, la veta San Carlos, que representa el punto de interés más distante y de mayor profundidad respecto del Cerro Proaño y que tiene gran importancia en la explotación actual.

Asimismo, como parte del proyecto interno de la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería “*Estudio de la Colección Mineralógica Andrés Manuel del Río*” se realizó una selección de ejemplares del distrito minero de Fresnillo pertenecientes a dicha Colección. Se eligieron aquellos especímenes que fuesen representativos de la mineralización y que contaran, además, con evidencias sobre el año y lugar de colección.

Igualmente, se colectaron muestras selectas de estructuras mineralizadas en niveles de explotación actual, exclusivamente de la veta Andrea y veta San Carlos. Se procedió a realizar una detallada descripción macroscópica de todos los ejemplares mineralógicos, con el objeto de definir las zonas de corte para los estudios mineragráficos en las respectivas secciones pulidas.

Las descripciones macroscópicas, juntamente con los estudios mineragráficos permitieron hacer una primera propuesta de la paragénesis y sucesión, con el propósito de realizar un análisis general de correlación espaciotemporal entre la zona antigua y la actual, a fin de conformar ideas originales sobre las evoluciones mineralógicas, a nivel del distrito minero y, sugerir algunas implicaciones en la exploración. Cabe destacar que, en las secciones pulidas, también se definieron puntos y zonas de especial interés para futuros estudios en microscopía electrónica y microsonda, con el objeto de definir con detalle grandes soluciones sólidas en sulfuros y sulfosales, así como la presencia y distribución de elementos menores y traza, entre otros aspectos químico-mineralógicos. Tales estudios están en progreso en el Laboratorio de Microanálisis del Instituto de Geofísica de la UNAM, *campus* Morelia en el estado de Michoacán. Esta información selecta será evaluada en su momento, en el contexto geológico del distrito, con miras a proponer con más detalle, un modelo químico-mineralógico que permita orientar la exploración hacia sectores con alto potencial.

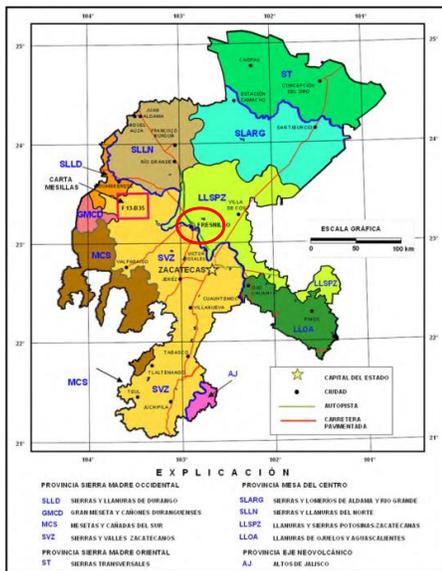
Commented [CGGV10]: Ahorita podemos hablar abiertamente, por la simple y sencilla razón de que tenemos las muestras históricas. ¡Claro!

1.3. Localización y fisiografía

La unidad minera Fresnillo se localiza en el extremo sur de la ciudad de Fresnillo, en el estado de Zacatecas. A unos 60 kilómetros al sureste está la ciudad de Zacatecas, capital del Estado.

La ciudad de Fresnillo se ubica a una altitud media de 2,190 m.s.n.m. (INEGI, 2009), con una altitud máxima local en el Cerro Proaño, que se eleva unos 200m respecto del resto de la ciudad.

Dentro de la diversa fisiografía de la República Mexicana, el distrito minero de Fresnillo está en el límite entre la Sierra Madre Occidental, en su sección sur, y la Mesa del Altiplano Central (INEGI, 2009). De las subprovincias fisiográficas de México, le corresponden tanto las Sierras y Llanuras Potosino-Zacatecanas, como las Sierras y valles Zacatecanos, pues también se ubica en el límite entre ambas, Fig. 2 (SGM, 2012).



El distrito minero se ubica en una zona relativamente plana, siendo el Cerro Proaño la elevación topográfica más prominente de la zona. La ciudad de Fresnillo se localiza en una depresión, al noreste de las incipientes elevaciones que marcan el inicio de la provincia de la Sierra Madre Occidental, más específicamente, en la Sierra de Valdecañas unos 10 km al suroeste.

Figura 2. Subprovincias fisiográficas correspondientes con Fresnillo. Tomado del Inventario de Recursos Minerales de la carta Mesillas (SGM, 2012).

Sería apropiado definir, entonces, que la región de Fresnillo se localiza *sensu stricto* en la subprovincia de las Sierras y Llanuras Potosino-Zacatecanas, Mesa del Altiplano Central Mexicano y en su límite con la Sierra Madre Occidental, la que comienza a hacerse presente unos pocos

Commented [CGGV11]: Allí, donde la vida no vale nada!

Commented [CGGV12]: Año?

Commented [CGGV13]: Recuerda que TODA referencia que se indica en el texto deberá aparecer al final

kilómetros al suroeste. El INEGI clasifica a más del 50% del área que pertenece a Fresnillo como algún tipo de llanura, meseta o lomerío con cañadas típicas.

1.4. Comunicación y población

La ciudad de Fresnillo es la segunda más grande en todo el estado de Zacatecas y ha tenido mucha importancia desde que se fundó, a raíz del descubrimiento de los yacimientos en el Cerro Proaño (1554), al sur de esta ciudad.

Por estos motivos, Fresnillo se ha mantenido bien comunicada a lo largo de la historia mediante múltiples vías de acceso terrestre (Fig. 3), de entre las cuales destacan las siguientes:

- Carretera federal 45. También llamada carretera Panamericana, es la vía terrestre más importante, ya que se utiliza para conectar a la ciudad de Panales, Hidalgo; con la fronteriza Ciudad Juárez, en el estado de Chihuahua.
- Carretera federal 44. Conecta a Fresnillo con la localidad de Ruiz, Nayarit.
- Carretera federal 54. Comunica hacia el suroeste con la importante ciudad de Guadalajara.
- Carretera federal 59. Conecta hacia el Este con el estado de San Luis Potosí.

A unos 5 kilómetros al Este de Fresnillo, tomando la carretera zacatecana federal 60, se puede llegar a la Estación Fresnillo, también conocida como estación San José. Esto tiene especial importancia ya que por aquí pasa el ferrocarril que conecta a la Ciudad de México con Ciudad Juárez, Chihuahua.

Al sureste de la ciudad de Fresnillo, a unos kilómetros antes de llegar a la capital estatal, Zacatecas, por la carretera federal Mex. 45, se encuentra el Aeropuerto Internacional de Zacatecas, principal vía de comunicación aérea en la zona.

Hoy en día, la ciudad de Fresnillo se encuentra a la vanguardia en cuanto a servicios. Así lo requiere la creciente población que rondaba los 196,538 habitantes en 2010 (INEGI).

Algunas de las principales actividades económicas en las que se desempeña gran parte de dicha población se centran en la producción de alimentos enlatados y embotellados, industrias del caucho y ensamble de partes eléctricas de vehículos automotores, entre otras actividades comunes, como el comercio local de bienes, tanto al por mayor como al por menor (INEGI, 2009).

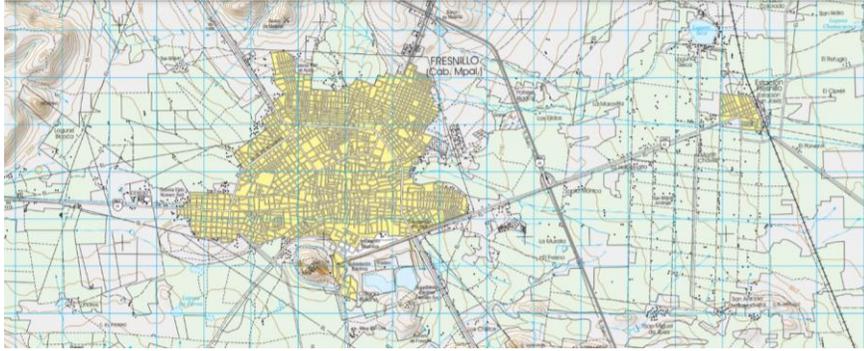


Figura 3. Fragmento de la carta topográfica 1:50,000 F13B47 (INEGI, 1999).

Commented [CGGV14]: Recuerda que toda figura debe estar referida al texto

1.5. Clima y vegetación

Según reportes del INEGI (2010), Fresnillo cuenta con una variación térmica que ronda los 12-18°C, concentrándose las temperaturas más altas en los meses de mayo a agosto y las más frías suelen llegar a los -3°C entre diciembre y febrero.

La precipitación media reportada por el INEGI, al año 2010, es de 300 a 700 milímetros. Fresnillo no es una localidad particularmente húmeda, por lo que el clima anual es predominantemente (91.6% del tiempo, según el INEGI, 2010) semiseco templado con lluvias en verano y llega a ser templado subhúmedo con lluvias durante el verano.

En otras palabras, la mayor parte del tiempo, Fresnillo es templado semiárido. No llegan las temperaturas ni las precipitaciones a suponer algún tipo de impedimento en el desarrollo de las actividades económicas de la población, salvo esporádicas nevadas que se llegan a presentar en invierno, pero no son la generalidad.

La vegetación que predomina en el área, en orden de abundancia, es el pastizal (cubriendo la mayor parte del área), bosque, matorrales y mezquiales (INEGI, 2010).

**BOSQUEJO HISTÓRICO DE LA
EXPLOTACIÓN EN LA
SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XIX**

Capítulo 2

2.1. Antecedentes históricos y explotación en la Zona de Minas de Proaño

El país iniciaba sus primeras décadas como colonia, tras la encarnizada guerra de conquista entre las poblaciones mesoamericanas y la Corona española. Varios conquistadores fueron enviados a explorar el territorio recién adquirido, la otrora Nueva España.

Es en una de estas exploraciones cuando, en el año de 1554, a unos 60 kilómetros de la ciudad de Zacatecas, el explorador y conquistador español Diego Fernández de Proaño se encontró con un cerro completamente atravesado por estructuras mineralizadas que afloraban hasta la superficie. Tal era la riqueza mineral albergada en el cerro que en ese mismo año comenzaron los primeros intentos de explotación. En septiembre del mismo año, los colonizadores Francisco de Ibarra y Juan de Tolosa bautizaban al lugar al ver un fresno junto a un cuerpo de agua.

Un ‘Ojo de Agua del Fresnillo’.

Poco a poco, la extracción de mineral demandó la presencia de más pobladores y, durante la segunda mitad del siglo XVI e inicios del siglo XVII, Fresnillo ya era una importante localidad minera de interés para la corona española y para las empresas privadas.

La explotación continuó de forma convencional en la zona de minas de Proaño durante la primera mitad del siglo XVIII hasta que, en 1749, la mina se comienza a enfrentar a problemas debidos a la necesidad de bombeo de agua y se detienen los trabajos en 1757. En 1835, se ordena traer desde Inglaterra dos bombas de vapor *Cornish* (Fig. 4), que solucionarían el problema del agua en la mina, aparte de ayudar a sustituir a los animales como motor mecánico de la molienda y procesamiento del mineral. Esto incrementó las actividades de explotación rápidamente y en pocos años regresó el, ya por décadas diluido, auge al distrito argentífero.



Fig. 4. Uno de los dos motores de vapor Harvey & Co. Sigue presente en Fresnillo y, el par, representan los únicos ejemplares en territorio mexicano. Tomada de *Escuelas de Minas Mexicanas*, Escamilla O. (2017, UNAM).

Commented [CGGV15]: Referir figura al texto, en donde lo prefieras

La administración de la mina estuvo bailando entre actores privados, gobiernos estatales y el gobierno federal durante la primera mitad del siglo XIX. En 1829, el gobierno zacatecano toma la administración, pero ésta pasa a manos del gobierno federal en 1835 quien se asoció por esas fechas con la recién fundada Compañía Zacatecano-Mexicana del Fresnillo, firmando un contrato por 12 años.

La administración federal de la compañía determinó que la mina no tenía la capacidad de beneficiar todo el mineral extraído, por lo que vio necesaria la construcción de una importante Hacienda de beneficio. Esto les evitaría el elevado coste de enviar el material no procesado a Zacatecas. Así es como inició la construcción de la *Hacienda Nueva del Fresnillo* en 1836 (Fig. 6, 7).

Debido a la creciente importancia de la minería en la economía de la recién nacida República Mexicana a lo largo de la primera mitad del siglo XIX, se volvió necesario impulsar el desarrollo de carreras especializadas en la prospección, extracción y beneficio de mineral. De hecho, en este periodo existieron múltiples intentos de instaurar cátedras afines, de las cuales la mayoría fracasaron. En 1812, la Corona española autoriza la apertura de una institución que impartiera las materias necesarias para la región. En 1831 se presenta una iniciativa similar al Congreso de la Unión. Pero no fue sino hasta 1845, cuando la compañía Mexicano-Zacatecana otorgó fondos para este mismo fin, que comenzó a trabajarse de forma más constante en la creación de una escuela de minas.

Es en 1853 que se funda la Escuela Práctica de Minas de Fresnillo (Fig. 5).



Fig. 5. Escudo de la Escuela Práctica de Minas del Fresnillo, obtenido de *Escuelas Mexicanas de Minas* (2017, UNAM).

Commented [CGGV16]: Referir figura al texto

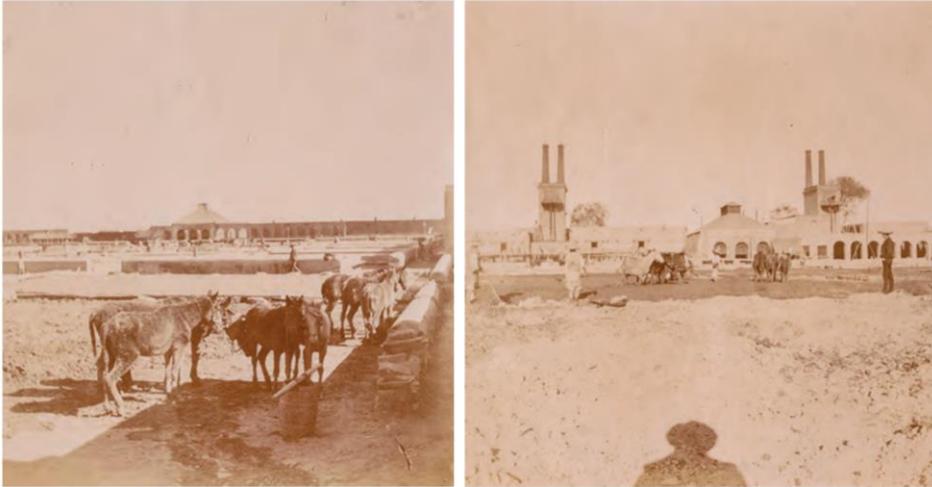


Fig. 6. Vistas del patio de la Hacienda Nueva del Fresnillo, fotografías tomadas en el último cuarto del siglo XIX, tomadas de *Escuelas de Minas Mexicanas* (2017, UNAM).



Fig. 7. Vista reciente de la ahora llamada Hacienda Proaño, administrada por la compañía Fresnillo PLC y dedicada a proveer servicios básicos al personal de la compañía. Fotografía tomada en enero del 2019.



Fig. 8. Vista reciente en la Hacienda Proaño. La hacienda aún conserva algunas instalaciones construidas en la primera mitad del siglo XIX. Fotografía tomada en enero del 2019.

En 1883, 'The Fresnillo Mining Company' obtiene el control de la mina, la cual se fusiona con una segunda (The Fresnillo Company) en 1910. En 1887, con distintos proyectos mineros en el país, nace Grupo Peñoles.

En 1912, se comienza a operar una planta de cianuración, que acelera el procesamiento del mineral hasta a 400 toneladas por día. Sin embargo, al año siguiente se detienen las operaciones nuevamente, por la Revolución Mexicana. Poco a poco se recuperan las operaciones de la mina, regresando a su ritmo hasta 1926.

Durante 1961, la Cía. Peñoles adquiere el 60% de las acciones de la mina de Fresnillo, haciéndose con el control total de la explotación.

A mediados de la década de los 70's, explorando las vetas hidrotermales mediante barrenación con diamante desde la superficie, se descubre la veta Santo Niño. Con un grosor medio de casi 3m y más de 2 kilómetros de longitud, y relativamente alta ley, se convierte en la principal estructura mineralizada explotada en el último cuarto del siglo XX. Se vuelve económicamente rentable su explotación entre los niveles 215 y 695. Su descubrimiento atrajo el interés internacional,

nuevamente, que se vio reflejado en un marcado incremento en la cantidad de publicaciones relativas al distrito minero de Fresnillo, durante los 80's.

Ya iniciado el actual siglo, en el 2008, surge la iniciativa de cotizar a la empresa en la Bolsa de Valores de Londres, pero se requería que la empresa trabajara exclusivamente con metales preciosos, es decir, oro y plata. Para lograrlo se vuelve necesario separar una segunda empresa desde el Grupo Peñoles y nace Fresnillo PLC, actual empresa que administra la explotación de la ahora unidad minera Fresnillo y la unidad minera Saucito, a tan solo 10km del Cerro Proaño.

2.2. Datos de producción

La información dura sobre la producción de la mina se desvanece conforme se remonta en el tiempo, volviéndose muy vaga previa al siglo XIX. Dicho esto, en *Escuelas de Minas Mexicanas* (2017, UNAM) se menciona que se estima que para el año de 1827 ya se habían producido más de 10,000 marcos *de plata.

No se especifica en *Escuelas de Minas Mexicanas* (2017, UNAM) a qué masa exactamente corresponde el marco, pero tomando en cuenta a los 10,000 marcos y unos razonables 230g por cada uno, la producción de plata acumulada previa a 1827 en Fresnillo estaría en el orden de las 2.3-2.5 toneladas.

A partir de la segunda mitad del siglo XIX, ya con la Escuela Práctica de Minas de Fresnillo fundada, Manuel Ojinaga (Fig. 9), quien fue alumno de dicha institución, copió un plano de las obras en desarrollo en la mina. Dicho plano fue resguardado en las oficinas de minería local, y fue rescatado por el Acervo Histórico del Palacio de Minería. Su importancia radica en que permite situar de forma razonablemente confiable a las muestras correspondientes al siglo XIX o previas, en las inmediaciones del Cerro Proaño. Observando el plano, de una forma muy somera, también se puede estimar que la profundidad máxima de la obra no superaba los 400 metros, ya que el Cerro Proaño se levanta aproximadamente 200m sobre el nivel medio local.

Commented [CGGV17]: Siempre hay que referirse en sentido impersonal

Commented [CGGV18]: Cómo calculaste dicha profundidad? Al parecer es bastante lo que consideraste. Te recomiendo lo verifiques

Gracias a este plano, es posible ubicar la procedencia de toda la plata producida desde mediados del siglo XVI hasta el siglo XIX dentro de esa obra, así como estimar la procedencia aproximada de las muestras históricas que serán analizadas en el siguiente capítulo.

* El marco fue una moneda ampliamente utilizada en Europa durante la edad media. La moneda estaba basada en el homónimo marco como medida de masa que, dependiendo del país, variaba considerablemente entre los 223 y hasta los 280g.

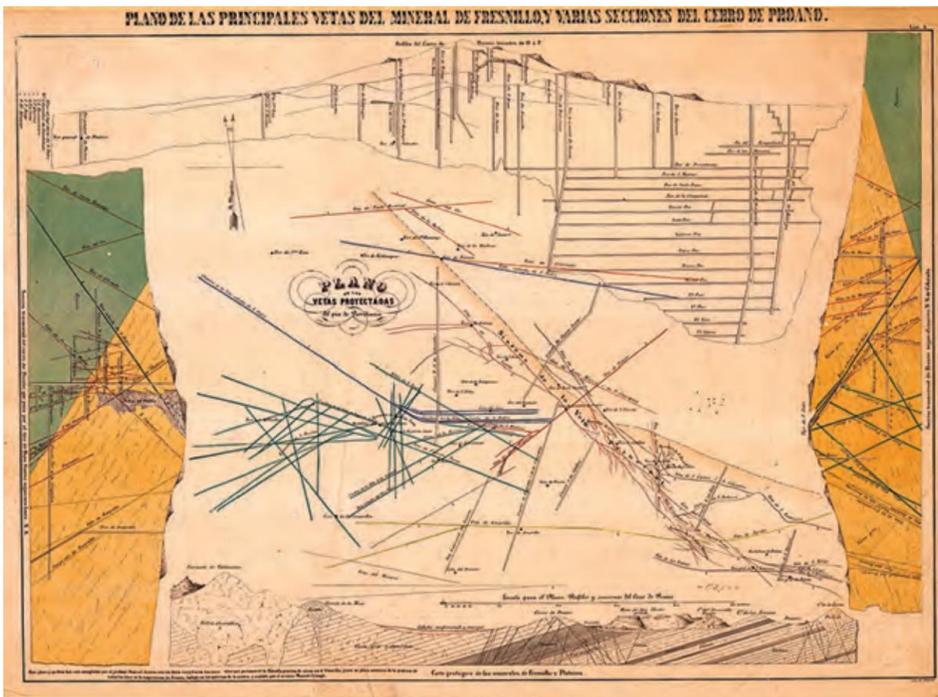


Fig. 9. Plano de la mina de Fresnillo, copiada por Manuel Ojinaga, alumno de la Escuela Práctica de Minas del Fresnillo. Se observa el avance de la obra en profundidad y la relativa cercanía al Cerro Proaño. Tomada de *Escuelas Mexicanas de Minas* (2017, UNAM).

Commented [CGGV19]: Sería muy interesante que se pudiera leer bien el plano.

Una vez reiniciadas las operaciones en la mina, posteriormente a la Revolución Mexicana, es a partir de 1921 que se cuenta con datos más precisos relativos a la producción de la mina (Fig. 10 y 11). Cabe mencionar que, gracias a los avances tecnológicos durante el siglo XX es que el avance de la

obra, tanto de forma horizontal como en profundidad se aceleró, alejándose cada vez más desde el Cerro Proaño en profundidad y hacia el SE.

De igual forma, la explotación de plata se disparó durante el siglo XX. La compañía reporta un número superior a los 700 millones de onzas de plata entre el reinicio de operaciones de 1921 y el reporte elaborado en 2004 y publicado en *Geología Económica de México*, en 2009.

PRODUCCIÓN DEL DISTRITO FRESNILLO DE 1921 A 2004						
MINERAL DE OXIDOS (1921-1943)						
TIPO DE MINERALIZACION	TON.	gr/ton.		%		
		Au	Ag	Pb	Zn	Cu
STOCK WORK	13,044,400	0.30	190			
TOTAL MINERAL OXIDADO	13,044,400	0.30	190			
MINERAL DE SULFUROS (1926-2004)						
TIPO DE MINERALIZACION	TON.	gr/ton.		%		
		Au	Ag	Pb	Zn	Cu
SULFUROS DISEMINADOS	1,071,300	0.01	87	1.90	3.10	0.02
SKARN	2,120,100	0.01	67	2.60	5.00	0.12
VETAS SISTEMA NW-SE	19,891,504	0.73	306	3.10	3.94	0.36
VETAS SISTEMA E-W	13,019,778	0.75	751	0.46	0.90	0.02
2003 VETAS SISTEMA E-W	1,525,141	0.72	687	0.59	0.99	0.02
2004 VETAS SISTEMA E-W	1,645,937	0.72	632	0.57	1.03	0.02
TOTAL SULFUROS	39,273,760	0.68	463	1.96	2.73	0.20
	13,044,400	0.30	190			
GRAN TOTAL	52,318,160	0.58	395	1.47	2.05	0.15

TABLA-1

Fig. 10. Datos duros de explotación de plata en el distrito de Fresnillo, desde 1921 hasta el 2004. Tabla publicada en *Geología Económica de México* (2009).

De igual forma, se incluye una tabla obtenida del mismo reporte, que menciona el total de reservas probadas, probables y mineral indicado correspondiente en la figura 11.

RECURSOS MINERALES						
MINA PROAÑO						
UNIDAD FRESNILLO						
PEÑALES	toneladas métricas	ENSAYES				
		gr/ton. Au	gr/ton. Ag	% Pb	% Zn	% Cu
RESERVAS PROBADAS	9,984,635	0.60	530	0.51		0.89
RESERVAS PROBABLES	4,287,174	0.64	547	0.49		0.84
TOTAL RESERVAS	14,271,809	0.61	535	0.50		0.88
MINERAL INDICADO	16,613,699	0.68	590	1.32		2.10
TOTAL RECURSOS MINERALES	30,885,508	0.65	565	0.94		1.54

TABLA-2

Fig. 11. Tabla de reservas probadas, probables y mineral indicado reportado hasta el 2004. Tomado de *Geología Económica de México* (2009).

GEOLOGÍA

Capítulo 3

En 1554, el conquistador español Diego Fernández de Proaño descubrió estructuras mineralizadas en el Cerro Proaño, después de partir de Zacatecas hacia el noroeste. No pasó mucho tiempo antes de que iniciaran las actividades de explotación minera, que continuó casi ininterrumpida hasta la actualidad, cerca de medio milenio después, en el hoy mayor distrito productor de plata a nivel mundial.

Tal riqueza no es coincidencia.

Es de gran importancia entender, primero, los aspectos geológicos generales que caracterizan a la región para llegar a comprender cómo es que pudieron desarrollarse tales depósitos de mineral y, posteriormente, dar una mejor interpretación al análisis de las muestras de las que se dispone.

Para el desarrollo de este trabajo, primero se recopilaron datos de las publicaciones geológicas más representativas del distrito minero, desde algunas que abarcan temas amplios como la geología regional hasta algunas muy puntuales, como análisis isotópicos y dataciones de estructuras mineralizadas específicas.

En esta sección, se expondrá la geología característica del distrito minero de Fresnillo en sus aspectos más generales. Se describirán las unidades litológicas más importantes, en aquellos aspectos ampliamente aceptados en las diversas publicaciones. Se abordarán las relaciones estratigráficas entre dichas unidades, los estilos estructurales propios de la región y se hará referencia de los cuerpos ígneos discordantes que cortan a varias de las unidades litológicas. Finalmente, se describirá de forma general la naturaleza de los principales depósitos minerales característicos del distrito.

Nota sobre la teoría del Geosinclinal Mexicano y este trabajo:

De Cserna (1976) interpreta al Grupo Proaño como probables depósitos acumulados en zonas referidas al *Geosinclinal Mexicano*. Propone que la Formación Valdecañas es, o un depósito acumulado al occidente del *geosinclinal* mexicano, o una facies de transición entre el *eugeosinclinal* al Oeste y el *miogeosinclinal* al Este.

Dichos términos fueron acuñados por primera vez por Dana, en 1873 (Knopf, 1960). Aunque Dana no proporcionó una definición para dichos términos, se limitó a definir su etimología, de origen griego, como '*dobleces de la corteza terrestre*'. Eran muy comúnmente utilizados en el ámbito de la teoría de Isostasia, en muchas publicaciones desde su fecha de acuñamiento hasta la segunda mitad del siglo XX. Los términos *eugeosinclinal*, *miogeosinclinal*, *ortogeosinclinal* y *sinclinorio* pertenecen

a esta corriente. En este trabajo, dichas zonas serán descritas en términos de cuencas de arcos continentales (ante, intra y trasarco).

Es muy importante aclarar que este cambio en los términos sí conlleva diferencias en la interpretación, ya que las cuencas en arcos continentales implican necesariamente zonas de convergencia entre placas tectónicas, mientras que el término geosinclinal tiene implicaciones sedimentológico-orogénicas, pues se consideraban los grosores de sedimentos acumulados como precursores de '*crisis orogénicas*', debidas a un rebote isostático.

En esta parte del trabajo y especialmente en la sección que detalla la evolución tectónica hablar en términos de cuencas de arco continental tendrá mucha utilidad, pues la evolución tectónica de la región corresponde, en gran medida, con dicho arco.

También el término *terciario* será sustituido por *cenozoico* o por *paleógeno* o *neógeno*, según se disponga de información, para tener congruencia con la última Tabla Cronoestratigráfica Internacional (International Commission on Stratigraphy, 2022).

3.1. Estratigrafía regional

A muy grandes rasgos, la estratigrafía regional está muy relacionada con la presencia de mineralización económica, ya que en el distrito minero de Fresnillo existen vetas, mantos y chimeneas mineralizadas, contenidas principalmente en rocas sedimentarias carbonatadas y clásticas marinas, correspondientes con el Cretácico y a las cuales se les conoce informalmente como Grupo Proaño.

A dichas rocas les sobreyacen de forma discordante, rocas cenozoicas empezando por conglomerados, unidades vulcanosedimentarias de composición predominantemente félsica relacionadas al magmatismo que generó a la Sierra Madre Occidental, principalmente riolitas, y algunos derrames basálticos. Encima de dichas unidades, yace un depósito aluvial que cubre la mayor parte del área del distrito. Debajo de las rocas que hospedan a la mineralización, yace un basamento formado de esquistos de micas, al cual le sobreyacen depósitos continentales, aparentemente correspondientes con el Triásico (Formación Chilitos).

En distintos trabajos se han publicado columnas estratigráficas diferentes que describen la misma secuencia de rocas *grosso modo*, pero que en algunos detalles llegan a ser contradictorias. Por

ejemplo, De Cserna (1976), Ruvalcaba-Ruiz (1988) y otros mencionan a la Formación Valdecañas como el primer miembro del Grupo Proaño, correspondiente con la informalmente llamada grauvaca inferior, mientras que Velador (2010) ubica a la unidad Valdecañas encima de todo el grupo Proaño, aparentemente repitiendo dicha unidad, como se muestra en la figura 12. Otra incógnita importante es la posición estratigráfica precisa de la Formación Chilitos.

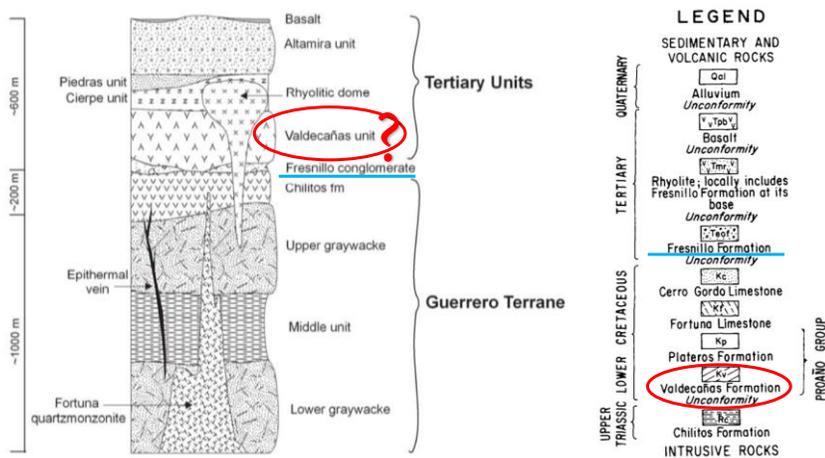


Figura 12. Columnas estratigráficas del distrito minero de Fresnillo, tomadas de Velador (2010) a la izquierda y De Cserna (1976) a la derecha. Nótese que la unidad Valdecañas se muestra en posiciones estratigráficas distintas en ambas columnas. El conglomerado Fresnillo está puesto entre las unidades Chilitos y Valdecañas según Velador (2010), pero está encima de la caliza Cerro Gordo según De Cserna (1976). Diferencias de esta naturaleza se pueden hallar en mucha de la literatura del distrito minero e implican interpretaciones distintas, pues muestran distintas relaciones estratigráfico-temporales entre las unidades. La Formación Chilitos también requiere corroborarse.

El esclarecimiento estricto de la secuencia y contactos estratigráficos del distrito minero de Fresnillo es un trabajo necesario, y requiere hacer observaciones y toma de datos en el campo. Al no ser el propósito de este trabajo, se procederá a describir la estratigrafía regional tomando como base a las descripciones hechas por de Cserna (1976) y Ruvalcaba-Ruiz et. al. (1988), posiblemente los trabajos más detallados respecto de la estratigrafía regional del distrito, y agregando aquella información nueva y relevante procedente de otros trabajos más recientes (Fig. 13).

Commented [CGGV20]: Notarás que eliminé el último renglón, porque solo con el trabajo de campo es posible eliminar cualquier ambigüedad

Basamento

En la localidad de Fresnillo no afloran las rocas del basamento al cual sobreyace el resto de la columna estratigráfica, pero dichas rocas pueden observarse kilómetros al sur, en la ciudad de Zacatecas.

Se reporta que el basamento está conformado por esquistos de mica y filita, debajo de algunas rocas sedimentarias fosilíferas del Triásico, con *greenstone* (de Cserna, 1976).

Grupo Proaño

En distintos trabajos se dividen las siguientes unidades del cretácico de formas distintas (p. ej. Stone y McCarthy, 1942; de Cserna, 1976). En esas publicaciones se entiende al Grupo Proaño como un término informal que simplemente ayuda a englobar al par de unidades litológicas Valdecañas y Plateros, que albergan una importante parte de la mineralización.

El Grupo Proaño conjunta a una grauvaca (informalmente conocida como grauvaca inferior) intercalada con lutitas en secuencias rítmicas, con una lutita carbonácea y calcárea, que grada de forma normal a grauvaca, nuevamente (grauvaca superior). Tales formaciones son las Valdecañas y Plateros, respectivamente.

Formación Valdecañas

Esta formación consta de una secuencia rítmica de areniscas con lutitas que sobreyace a los productos volcánicos de la Formación Chilitos.

Aflora en la villa de Valdecañas y en la Sierra de Valdecañas, varios kilómetros al suroeste de Fresnillo, rasgo que marca el inicio de la provincia de la Sierra Madre Occidental. También se reporta que es visible en el interior de la mina. La arenisca es vista como capas delgadas, de tono gris verdoso. La lutita, como capas delgadas color gris oscuro a negro (Ruvalcaba-Ruiz, 1988). Es reconocido un grosor aproximado de 700m (de Cserna, 1976). Informalmente, la Formación Valdecañas es conocida como *grauvaca inferior*.

Es importante mencionar que fueron identificados fósiles en dicha formación, los cuales ubican la edad de la Formación Valdecañas del Valanguiniano al Hauteriviano del Cretácico inferior (de Cserna, 1976).

Formación Plateros

La Formación Plateros corresponde con una secuencia de lutitas oscuras, casi negruzcas, carbonáceas y calcáreas que tienen lentes de grauvaca y caliza. Dicha unidad cambia gradualmente hacia arriba a capas delgadas, de centímetros de grosor, a una arenisca impura e inmadura conocida informalmente como *grauvaca superior* (Ruvalcaba-Ruiz, 1988). Su límite estratigráfico inferior es descrito como transicional, observado en el interior de la mina, mientras que el superior se puede ver en el Cerro Proaño. Se le infiere una probable edad del Barremiano-Aptiano, Cretácico inferior también. Se le estima un grosor de unos 350m (de Cserna, 1976).

Las formaciones Valdecañas y Plateros contienen a la mayoría de los cuerpos mineralizados que se observan en el interior de la mina (Ruvalcaba-Ruiz, 1988).

Formación Chilitos (la posición estratigráfica requiere corroborarse)

Esta unidad aflora unos pocos kilómetros al sur de Fresnillo, cerca del arroyo de Chilitos. Según de Cserna (1976), se observan rocas ígneas cristalinas a las que sobreyacen vulcanoclásticas, descritas de la siguiente manera:

- Pillow lavas: Se describen lavas almohadilladas de color gris oscuro, verdoso-rojizo de cristales finos. La matriz está conformada principalmente de labradorita y andesina. Se le observan algunas vetillas de calcita, descrita como pseudomorfa después de piroxenos, acompañada de chamosita (variedad ferrífera del clinocloro, silicato del grupo de la clorita) y titanomagnetita en cantidades trazas. En algunos huecos se identificó celadonita (otro filosilicato) (de Cserna, 1976).
- Depósito vulcanoclástico: Consta de andesita basáltica alterada a un color verdoso, interestratificada con estratos fosilíferos del Triásico (de Cserna, 1976).

De Cserna (1976) ubica a la Formación Chilitos sobre el basamento y subyaciendo al Grupo Proaño, con una edad correspondiente al Triásico; pero Ruvalcaba-Ruiz (1988) sugiere una posición

Commented [CGGV21]: Por fin? Qué pasó? Conforme a de Cserna la columna estratigráfica inicia con esta formación. En el orden que propones estás dejando entrever que está encima de las dos formaciones que has descrito arriba

estratigráfica superior asociada a una andesita similar a la descrita por de Cserna, observada por contener buena porción de la importante veta mineralizada Santo Niño y sustenta con estudios paleontológicos previos (Cantú Chapa, 1974) una edad correspondiente al Cretácico temprano para dicha formación.

Dicho esto, las edades y posiciones estratigráficas de la Formación Chilitos y Valdecañas siguen siendo las mayores incógnitas estratigráficas de Fresnillo (Ruvalcaba-Ruiz, 1988).

Caliza La Fortuna

Aflora en colinas bajas entre Fresnillo y Plateros, aunque también se reporta visible en las faldas del Cerro Proaño.

Se describe como estratos delgados a medios de caliza color gris oscuro. Algunos fósiles la ubican en el Albiano tardío, Cretácico (de Cserna, 1976). Se estima su grosor en 500 metros.

Caliza Cerro Gordo

Sobreyace a la caliza Fortuna como estratos medios a gruesos de caliza color gris. De Cserna (1976) propone una edad Albiano-Cenomaniano, en la transición del Cretácico inferior al superior. Ruvalcaba-Ruiz (1988) describe el contacto con la caliza Fortuna como transicional y correlaciona a ambas calizas, a escala regional, con las porciones inferior y superior de la Formación Cuesta del Cura. La caliza Cerro Gordo tiene un grosor estimado de 300 metros.

Formación Fresnillo

Sobreyace a las calizas del mesozoico por una marcada discordancia angular. Se describe la unidad como un conglomerado continental que gradúa de forma normal a arcosa y tobas.

El conglomerado consta de fragmentos sostenidos en una matriz clara, pobremente redondeados, producto del acarreo por distancias relativamente cortas (Ruvalcaba-Ruiz, 1988) y procedentes de la Formación Plateros y la caliza Fortuna (de Cserna, 1976).

La arcosa y tobas se observan de color gris, con alteración manifestada por tonos amarillentos.

Ruvalcaba-Ruiz (1988) correlaciona esta unidad con varios conglomerados continentales comunes en México, a los cuales corresponden edades tempranas en el Paleógeno.

El contacto con las rocas mesozoicas es análogo a las capas clásticas del Eoceno-Oligoceno observadas en otras localidades, sugiriendo dicha edad para la formación. Se le estiman 400 metros de espesor (de Cserna, 1976).

Albinson (1988) menciona que hay similitud entre el conglomerado Fresnillo y algunos sedimentos continentales post-orogénia Laramide visibles en varias localidades en la Mesa del Altiplano Central Mexicano.

Rocas ígneas cenozoicas

Sobreyacen a la secuencia descrita, emisiones piroclásticas riolíticas, de unos 400 metros de grosor estimados en la zona. En dichos flujos abundan los fenocristales de cuarzo, sanidino y gran porcentaje de la composición corresponde con pómez. Al ser eventos que tuvieron lugar por un periodo extendido, se les estima una edad entre el Oligoceno y Mioceno (de Cserna, 1976).

También se observan, aunque en menor proporción y de formas locales, basaltos de olivino.

Rocas Intrusivas

Stock de cuarzo-monzonita

Se observa en la parte norte de la mina, y en los niveles más profundos, un stock cuasi-cilíndrico de naturaleza cuarzo-monzonítica (Ruvalcaba-Ruiz, 1988). En el nivel 900 de la mina, se describe como una estructura ovalada de unos 80m de longitud en su eje mayor, por 45 en el eje menor (en planta), que se mantienen relativamente constantes verticalmente, pero disminuyen considerablemente al acercarse a la superficie.

Se le reporta una textura porfídica y un color verde claro. La matriz es descrita como fina, con cristales de cuarzo, plagioclasa y algo de feldespato potásico con clorita presente (De Cserna, 1976).

Alrededor del stock se observa una aureola de metamorfismo de contacto de unos 15m, que acusa a un proceso de silicificación, principalmente observada en la Formación Valdecañas.

Commented [CGGV22]: De acuerdo con qué autor? En qué año?

De Cserna (1976) menciona que el stock está cortado por una veta que también corta a la Formación Fresnillo, por lo que el stock debe haberse emplazado con, o antes de, la Formación Fresnillo. En otras palabras, la datación relativa le asigna una probable edad del Eoceno medio a tardío, o más antigua. Posteriormente, Lang et. al. (1988), mediante métodos de K-Ar asigna una edad al stock de entre 31.6 y 32.4 M.a.

Stock de granodiorita

Corta a la caliza Fortuna. En un corte de planta está descrito su tamaño como de 200m x 600m, y se reconoce un echado de unos 60° al NE. Se observa que también produce cierta silicificación en la caliza Fortuna (de Cserna, 1976).

La granodiorita presenta una textura porfídica con abundantes minerales ferromagnesianos, principalmente hornblenda.

Diques riolíticos

De Cserna (1976) reporta varios diques riolíticos que cortan a las rocas mesozoicas y que tienen relación con los depósitos piroclásticos en las zonas aledañas. Propone que pueden ser diques de alimentación que proporcionaron el material ígneo a la zona. Ruvalcaba-Ruiz (1988) sugiere una relación composicional con las tobas que sobreyacen a las rocas mesozoicas.

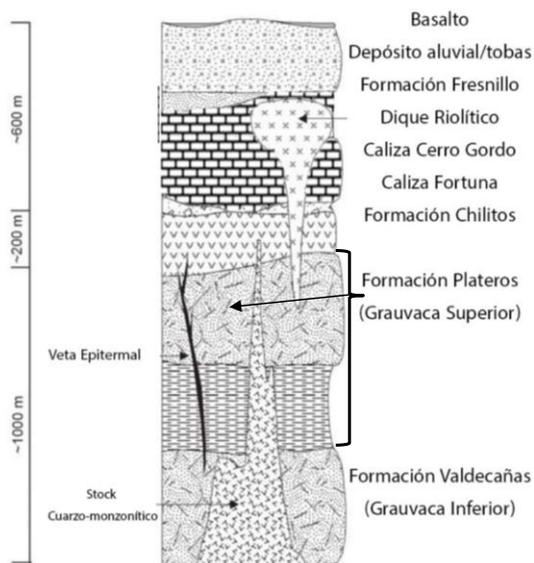


Figura 13. Columna estratigráfica regional. Se muestran los espesores aproximados de las unidades litológicas. Modificada de Velador et. al. (2010). Esta columna es congruente con la mayoría de las publicaciones del distrito de Fresnillo, pero la posición y edad de la formación Chilitos requiere corroborarse.

Commented [CGGV23]: Recuerda referir toda figura al texto

3.2. Evolución tectónica

El distrito minero de Fresnillo se ha mantenido por casi quinientos años como uno de los principales distritos productores de plata. Las condiciones y eventos tectónicos que le han dado lugar son únicos, al igual que su importancia en términos de producción, de clase mundial. Es posible asociar íntimamente la génesis de los yacimientos del distrito con otro rasgo geológico, igualmente, único en el mundo: la Sierra Madre Occidental, la Gran Provincia Ígnea (LIP, por sus siglas en inglés) cenozoica más grande en el mundo.

Aquí se expondrá el proceso de evolución tectónica que dio lugar a las condiciones necesarias para la existencia de los yacimientos minerales del distrito minero de Fresnillo, Zacatecas.

Dichas condiciones son, *grosso modo*, las siguientes:

1. La existencia de un arco continental capaz de generar en el trasarco rocas clásticas marinas, *hosts* principales de los yacimientos.
2. La generación de estructuras capaces de controlar el movimiento de los fluidos hidrotermales, mediante el fallamiento producido por tectónica extensional.

3. El magmatismo y ascenso de material que alimentará a los sistemas hidrotermales, tanto como fuente de calor, como fuente de fluidos mineralizantes.

Precondiciones en el mesozoico

Para entender la génesis de los yacimientos, es conveniente situarse en el margen occidental de la placa Norteamericana durante el Cretácico. Dicho margen corresponde con lo que hoy es el occidente de México.

Durante dicho periodo, una significativa parte del territorio que hoy corresponde con México se encontraba sumergida bajo un mar epicontinental. Existían islas levantadas, separadas por cuencas a las que se puede relacionar con la gran importancia en el potencial petrolero mesozoico del país (p. ej. las cuencas de Chicontepec o de Burgos).

El margen suroccidental de México experimentaba la subducción del fragmento tectónico en el Pacífico conocido como placa de Farallón bajo la placa Norteamericana. Asociado a esta subducción, se desarrolló entre el Jurásico y Cretácico un arco magmático continental (Fig. 14), de suma importancia para entender la distribución y naturaleza de los yacimientos.

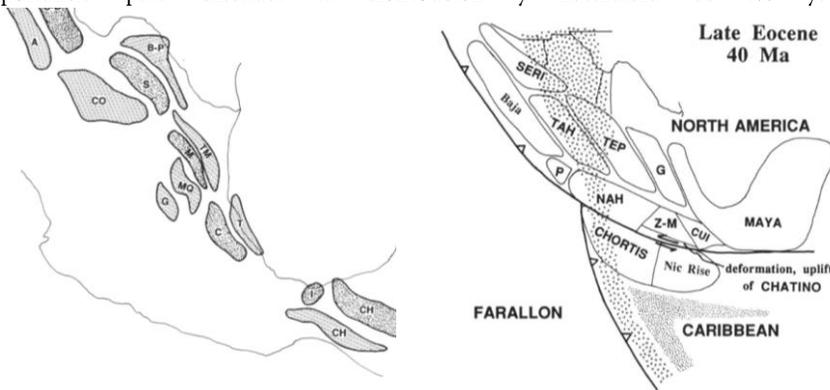


Figura 14. A la izquierda se observan los horsts y cuencas al inicio del Cretácico. El achurado en círculos implica horsts y los patrones irregulares, las cuencas sumergidas. A la derecha, el patrón en v (semi-parallel to the trench) indica la geometría del arco continental durante el Eoceno. Imágenes tomadas de Sedlock y Ortega-Gutiérrez et al. (1993).

Commented [CGGV24]: Siempre hay que referirse en sentido impersonal. No lo olvides

Commented [CGGV25]: Te aconsejo que también incluyas el significado de cada símbolo

Evolución de la subducción de la placa de Farallón

Los cambios que sufrió la subducción de la placa de Farallón durante el final del Mesozoico e inicios del Paleógeno fueron los principales controles tectónicos responsables de las condiciones bajo las cuales fue posible la existencia de los yacimientos.

Ferrari et. al. (2007) expone que el magmatismo asociado a la subducción inicia relativamente cerca de la trinchera, a menos de 200 kilómetros de distancia, durante el Jurásico, hace unos 180 Ma. El magmatismo posteriormente migra continente adentro, llegando a alejarse de la trinchera hasta 1000 kilómetros aproximadamente, hacia el Este. Esta migración ocurre hace unos 180 Ma y se detiene en su punto más lejano de la trinchera hace unos 30 Ma. Dicha temporalidad (30Ma) coincide con la edad de las rocas ígneas intrusivas presentes en Fresnillo, como el stock de cuarzo-monzonita datado en casi 32Ma, según De Cserna (1976). Es lógico pensar que la subducción de la placa de Farallón y la migración del magmatismo tienen relación genética con los cuerpos intrusivos presentes en Fresnillo ya que, al menos, hay correlación espacio-temporal.

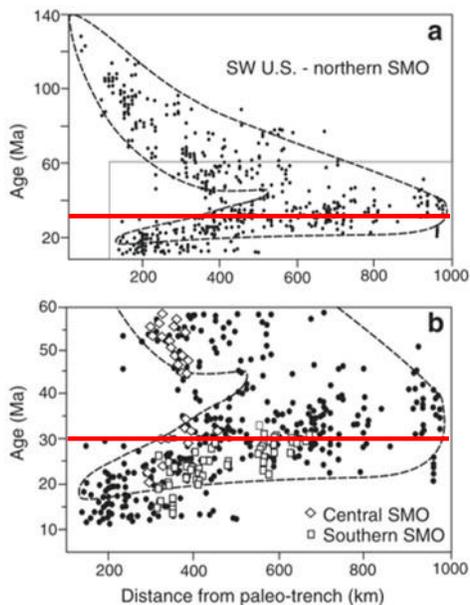


Figura 15. En el eje de las abscisas se representa a la distancia a la paleotrinchera. Las ordenadas representan la edad, en millones de años. El patrón exhibe la migración del magmatismo hacia el E entre los 140 y 30 Ma. y un regreso repentino entre los 30 y 15 Ma. La línea roja ubica la edad aproximada de los cuerpos magmáticos intrusivos presentes en Fresnillo, visibles en el interior de la mina. Es importante apreciar que dicha temporalidad coincide con el regreso del magmatismo hacia la trinchera. La gráfica 'b' corresponde con el recuadro presente en la 'a'. Tomada de Ferrari et al. 2007.

La migración hacia el Este y el posterior regreso hacia la trinchera (Fig. 15) del magmatismo se explican con un cambio en la inclinación del *slab* subducido bajo la placa Norteamericana. La placa de Farallón, bajo la Norteamericana, comienza a perder inclinación y a acercarse a una posición subhorizontal, produciendo un empuje hacia arriba que también ha sido asociado en la literatura (Sedlock et al. 1993 y Ferrari, 2007) a la Orogenia Laramide.

Ferrari et al. (2007), menciona que se puede atribuir como causa a una mayor flotabilidad de la placa subducida, ya que con el pasar del tiempo se subduce corteza cada vez más joven.

Implicaciones en el desarrollo del hidrotermalismo

El cambio tectónico más significativo relacionado tanto al magmatismo (Sierra Madre Occidental) como al fallamiento que generó los sistemas hidrotermales fue la fase final de la subducción de la placa de Farallón.

Al finalizar la subducción, la placa subducida que se encontraba semihorizontal sufre un nuevo (y bastante repentino, observable en la gráfica de Ferrari et al, 2007) cambio en la inclinación, pero en sentido opuesto. Ahora la placa comienza a inclinarse más, regresando el magmatismo hacia la trinchera durante un episodio de *roll back*. Esto provocó dos principales efectos de relevancia para los yacimientos de Fresnillo:

- Uno de los efectos de la súbita caída de la placa de Farallon es el ascenso de material del manto que permitió el movimiento de las isoterma hacia la corteza continental. Esto implica que hay material de más alta temperatura sujeto a menos presión, lo que produjo al magmatismo responsable de la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al, 2007). En Fresnillo, dicho magmatismo se observa en la gruesa capa de riolitas y los escasos y esporádicos basaltos que sobreyacen al conglomerado continental (De Cserna, 1976) es decir, a la Formación Fresnillo. En Fresnillo las mineralizaciones se relacionan a la actividad magmática somera, representada por el emplazamiento de rocas intrusivas de naturaleza cuarzomonzónica y granodiorítica.
- El segundo efecto del *roll back* de la placa de Farallon es la generación de una tectónica extensional en la corteza continental, responsable de la producción de fallas normales que bordean a la Sierra Madre Occidental. Dichas fallas corresponden con las que De Cserna

(1976) mapeó y que formaron a las familias de fallas y fracturas, precondition para que algunas se convirtieron en vetas mineralizadas.

Es muy interesante notar que la localización de las fallas normales, y por ende de los sistemas hidrotermales y de los yacimientos asociados a la Sierra Madre Occidental, incluyendo a Fresnillo, se puede explicar con fundamentos mineralógicos básicos. La expulsión de grandes volúmenes de material riolítico produjo una kilométrica capa de rocas con alto contenido de sílice. Es de conocimiento general que la abundancia de sílice se asocia a la viscosidad y explosividad de las efusiones volcánicas debido a las altas fuerzas de valencia electrostática en la coordinación tetraédrica entre el Si-O. También se asocia a la rigidez y dureza de los minerales y, por ende, de las rocas resultantes. En otras palabras, el magmatismo generó una capa riolítica, cuya rigidez debida al alto contenido de sílice puede observarse en los pronunciados escarpes de la Sierra Madre Occidental y en la casi completa ausencia de fallas en la porción central de la misma (Fig. 16).

Entonces, al producirse la tectónica extensional por la caída de la placa de Farallon, las porciones de la corteza que tienden a ceder y a fallarse estarán en la Sierra Madre Occidental hacia donde se hace menos gruesa, es decir hacia los bordes. Es ahí en donde se concentran los sistemas de fallas susceptibles de ser mineralizados, tal como ocurre en Fresnillo.

En síntesis, la subducción de la placa Farallon generó en el margen occidental de lo que hoy es México el arco continental y las cuencas asociadas en donde se originaron las rocas clásticas que hospedan, principalmente, a la mineralización de Fresnillo. La subducción y el subsecuente *roll back* provocaron tanto al magmatismo que originó los cuerpos ígneos intrusivos, como al fallamiento normal que bordea a la Sierra Madre Occidental, condiciones que determinaron el desarrollo de los sistemas hidrotermales de alta potencialidad metálica.

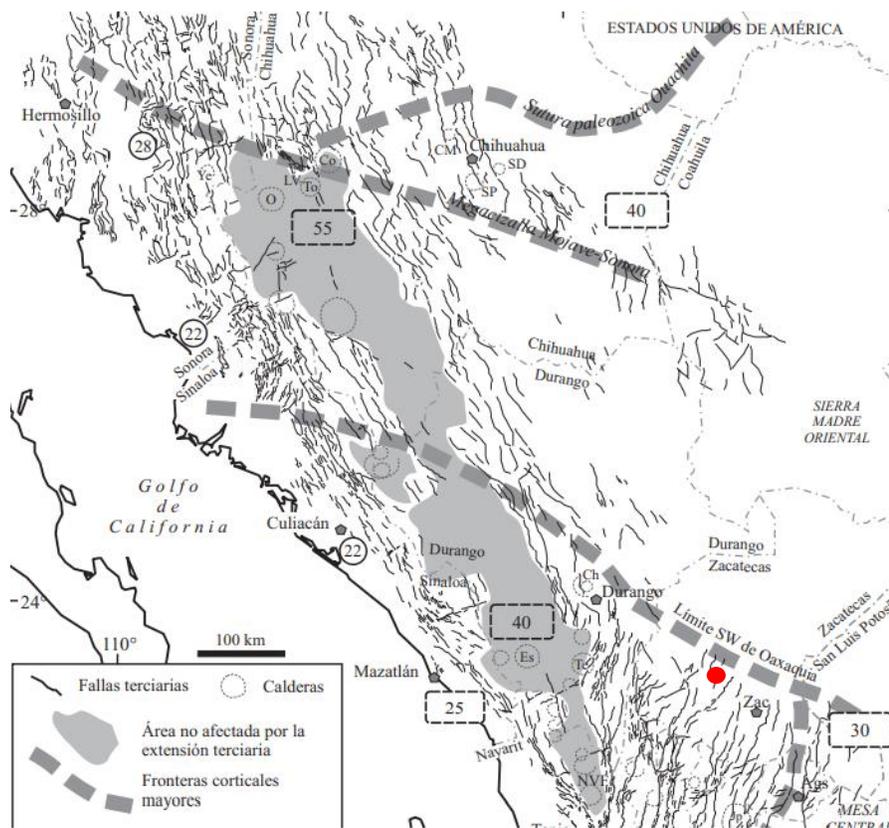


Figura 16. Se observa sombreada a la Sierra Madre Occidental, en la porción no afectada por extensión, y a la tendencia semi-paralela de las fallas normales. Es importante notar la ausencia de fallamiento al centro de la Sierra Madre Occidental. Los yacimientos hidrotermales en vetas de Fresnillo corresponden con fallas que bordean a esta Sierra, hacia su porción Sur. En el punto rojo, la ciudad de Fresnillo. Tomada de Ferrari et al. (2007).

3.3. Geología estructural

El distrito minero de Fresnillo está cortado prácticamente a la mitad por una falla cuyo rumbo tiende al NW-SE. Esta falla es importante porque la mayoría de los depósitos, incluidas las importantes vetas Santa Elena y Santo Niño, se encuentran cerca de la porción Sur de la falla (Ruvalcaba-Ruiz, 1988).

Commented [CGGV26]: Referir figura al texto

Commented [CGGV27]: Este inciso deberá colocarse después del inciso de Evolución Tectónica para, en este sentido hablar de lo general a lo particular

A grandes rasgos, se puede afirmar que la zona está caracterizada por un episodio de plegamiento y un subsecuente fallamiento.

Se observan, a nivel regional, pliegues anticlinales muy abiertos (Fig. 17), con muy poca inclinación en sus flancos y con una tendencia de la charnela a seguir un rumbo de N10°E. También está descrito un sinclinal, de charnela al N15°W, cuyo eje converge con los de los anticlinales muy cerca de Fresnillo (de Cserna, 1976).

El anticlinal contiene, en su núcleo, a la Formación Plateros y, en sus flancos, a la caliza Fortuna (de Cserna, 1976).

La charnela se observa inclinada unos 5° hacia el sur lo que genera, hacia el norte, al Cerro Proaño.

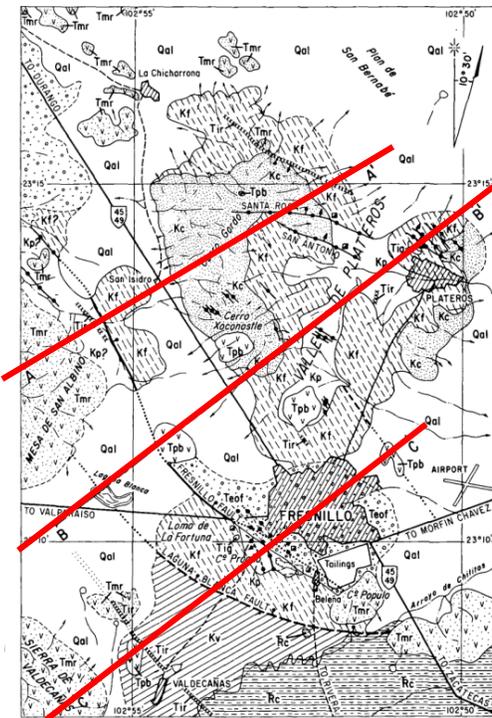


Figura 17. Mapa geológico del área de Fresnillo, se remarcan en color las líneas de sección que se observarán en canto en la siguiente figura (de Cserna, 1976).

Simbología: Qal=aluvión, Tpb=basalto, Tmr=riolita, Teof=conglomerado, Kc=Caliza Cerro Gordo, Kf=Caliza Fortuna, Kp=Form. Plateros, Kv=Form. Valdecañas.

Commented [CGGV28]: Te aconsejo que incluyeras en el pie de figura (al igual en las secciones) qué significa cada símbolo. Por ejemplo Qal= aluvión, etc.

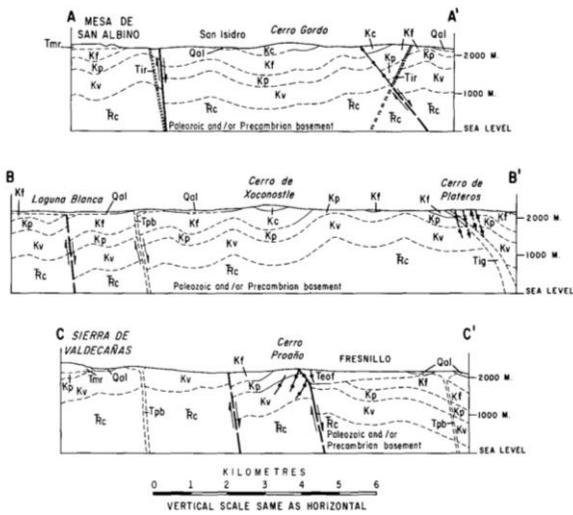


Figura 18. Secciones estructurales de Fresnillo. Las secciones corresponden con las líneas marcadas en la figura 14. Nótese el plegamiento y el posterior fallamiento. Las fallas son visibles en la figura 14, de rumbo NW-SE (de Cserna, 1976). Misma simbología que en la Fig. 17.

YACIMIENTOS MINERALES

Capítulo 4

*"Si te fuera la suerte menos ingrata
pavimento pudieras lucir de plata...
con gastar en él lo que en un año
en líquidas ganancias deja Proaño".*

Carta al Mineral del Fresno

-Roberto Cabral del Hoyo

La mineralización en Fresnillo está descrita como un complejo *stockwork* oxidado, en la zona del Cerro Proaño, vetas y cuerpos de reemplazamiento (mantos), así como algo de mineral diseminado en algunos puntos de la mina (De Cserna, 1976).

Para este trabajo, la descripción mineralógica y minerográfica de las menas se concentrará en tres zonas, puesto que de ahí provienen las muestras de las que se dispusieron.

Tales zonas son: la zona de minas del Cerro Proaño, la zona de la veta San Ricardo y la veta San Carlos.

4.1. Sistema de Proaño

El distrito minero de Fresnillo ha producido, durante la mayor parte de su historia, de la zona de las minas del Cerro Proaño. De él han surgido, por siglos, cantidades muy importantes de plata, así como cantidades subordinadas, pero igualmente rentables de plomo, zinc y cobre.

Cerca de la superficie, en el Cerro Proaño, la mineralización está descrita como un complejo *stockwork* oxidado, y un sistema igualmente complejo de vetas asociadas debajo de éste, que se extienden a través de todo el Cerro Proaño y hasta el nivel 100 (De Cserna, 1976). Dicho *stockwork*, se menciona, cubre un área de unos 700 metros por 200 metros en el Cerro Proaño (Benton, 1991).

4.2. Sistema San Ricardo, veta Andrea

En el 2010, mediante una campaña de barrenación fue descubierta la veta Andrea. Fue descrita como una estructura ligeramente superior al metro, en espesor, con importantes valores de plata, observados como manchas rojizas correspondientes con la presencia de pirargirita, principalmente (comunicación personal, Ing. Julián Castro, 2019).

La veta Andrea pertenece a una familia de estructuras mineralizadas semi-paralelas a la veta San Ricardo, estructura principal en esta zona de la mina. Inclusive, la rampa por la que se accede desde la superficie, a partir de las instalaciones del tiro San Luis, lleva el mismo nombre. Ambas vetas

Commented [CGGV29]: No te acuerdas qué ingeniero te lo comunicó? En qué año?

comparten muchas características, por lo que se procede a reportar aquellas descritas desde entonces, y con más detalle, de la veta San Ricardo. Se reconoció en la mina la veta Andrea y las descripciones del rebaje específico en el que se observó la mineralización se incluyen en la descripción de la muestra correspondiente.

Como la mayoría de las vetas, principales cuerpos mineralizados en Fresnillo, San Ricardo se encuentra alojada en una brecha de falla, correspondiente con el grupo Proaño. Son principalmente grauvacas (o areniscas de alto contenido de material arcilloso) quienes hospedan a esta familia de vetas.

Esta estructura define un rumbo N75°W, 75°NE. Tiene 1,200m de largo y casi 3 metros, en promedio, de ancho (Lang, 1995). Tanto la veta San Ricardo como Andrea contienen esfalerita y galena, acompañada de esporádicas manchas rojizas de pirargirita-proustita, cabe mencionar que en la veta Andrea se hace notar hacia los extremos un tono verdoso, que acusa moderada alteración hidrotermal.

4.3. Sistema San Carlos

En 1997 se reporta el arranque de la exploración de esta estructura, cuyo desarrollo inició entre los niveles 270 y 425 (*Vallejo, Cía. Fresnillo*).

Se trata de una veta que supera los 3 metros en promedio de ancho y se caracteriza por una notable textura bandeada, limitada por una apariencia brechosa tanto al bajo como al alto de la veta. Su mineralización está descrita como sulfuros y sulfosales de plata, probablemente acantita y con toda certeza pirargirita-proustita, acompañadas de galena, esfalerita y polibasita. Se reporta que la exploración supera los 5 kilómetros a rumbo de la estructura (*Vallejo, Cía. Fresnillo*).

Es de especial importancia para este trabajo porque se trata de la estructura principal en explotación más al SW de la mina, más lejana del Cerro Proaño; la muestra utilizada se colectó en el nivel 840. Esto permite buscar un contraste con las muestras correspondientes con Proaño, debido a la distancia y la profundidad.

4.4. Método de trabajo

Para el desarrollo de esta sección del presente trabajo, fueron recabadas todas las muestras de la colección mineralógica *Andrés Manuel del Río* procedentes del distrito minero de Fresnillo. Después, dichas muestras fueron separadas del resto para su análisis, en el *Real Seminario de Minería*, sita en la calle de Guatemala número 90 del Centro Histórico de la Ciudad de México. Los ejemplares se seleccionaron con base a su representatividad y a la información consignada en la ficha de identificación de la colección, como el año en que fueron colectadas y donadas a la Escuela Nacional de Ingenieros o Facultad de Ingeniería, según la época.

Este procedimiento de selección resultó en un conjunto de nueve ejemplares seleccionados.

Posteriormente, cada uno de los especímenes fue descrito macroscópicamente, en muestra de mano, trabajo para el cual fueron de ayuda las siguientes herramientas:

- Vernier, o Pie de Rey para la medición de las muestras y de algunos cristales, en las muestras que fuese conveniente.
- Lupa de joyero de 10 aumentos. Utilizada también en fotografías de mucha resolución, pero pocos aumentos.
- Navaja suiza Victorinox, de dureza reportada HRC56 -escala de dureza de Rockwell C, cuya conversión a la escala de Mohs cae en aproximadamente 5.5 unidades. Tiene 91mm de longitud.
- Microscopio digital de 40 aumentos, para tomar fotografías utilizando la computadora.
- Tabla didáctica de estimación visual de porcentajes, tomada de https://www.researchgate.net/figure/Comparison-chart-for-volume-percentage-estimation-after-Terry-and-Chilingarian-1955_fig4_305489546.

Después de la descripción macroscópica, se analizaron las asociaciones minerales presentes en las muestras y la forma en que se encuentran intercrecidas, con el propósito de seleccionar zonas de especial interés, a partir de las cuales se enviaron a preparar secciones pulidas para realizar el análisis minerográfico.

Al microscopio minerográfico, se hizo un análisis de cada muestra utilizando tres objetivos 10X, 20X y 32X. Es importante mencionar que el objetivo de 32X es de inmersión, mejorando la claridad de los tonos y contrastes visibles.

Las escalas mostradas en las fotomicrografías se calcularon de la siguiente forma:

Se utilizó una lámina graduada, cuya distancia entre cada división era conocida y el hilo E-W del propio microscopio mineralográfico. A cada aumento correspondió una distancia diferente por cada división en el hilo E-W: 0.02 milímetros para el objetivo de 10x, 0.01 milímetros para el objetivo de 20x y 0.00895 milímetros para el objetivo de inmersión de 32x. Esto permitió generar una escala que abarcara 50 divisiones, cuyo tamaño simplemente resultó de multiplicar la medida de cada división por 50 (Fig. 19).

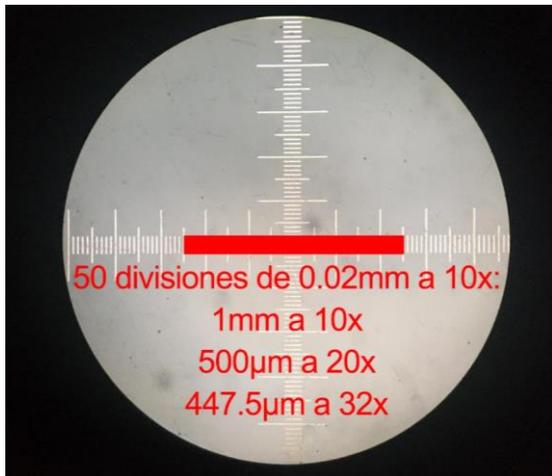


Fig. 19. Graduación utilizada para calcular tamaños en los análisis mineralográficos. La barra roja opaca abarca exactamente 50 divisiones del hilo Este-Oeste.

Posteriormente, algunos campos de interés en las muestras fueron enviados al Laboratorio de Microanálisis del Instituto de Geofísica de la UNAM, campus Morelia. Ahí, se sometieron a algunos análisis químicos cuantitativos a las muestras. Algunos resultados ya

fueron entregados pero los análisis siguen realizándose, al momento de finalización de este trabajo.

En el Laboratorio de Microanálisis, los campos de interés fueron inspeccionados mediante la técnica rápida de espectroscopía de dispersión de electrones (EDS) y de espectroscopía de dispersión de longitudes de onda (WDS), en una sonda electrónica *JEOL JXA-8230*, analizando elementos entre los 10 y 30 segundos, para aquellos más escasos.

Tomando en cuenta todas las observaciones, se determinaron los rasgos y variaciones texturales con el propósito de definir patrones o tendencias que pudiesen ser representativas de la variación mineralógica presente en el distrito de Fresnillo y de interés en la exploración.

4.4.1. Ejemplares colectados a partir de la segunda mitad del siglo XIX, de la colección mineralógica “Andrés Manuel del Río”

4.4.1.1. Descripciones macroscópicas

Muestra 1813.



Fig. 20. Muestra 1813.

Etiqueta histórica: Hierro *colao* del Fresnillo.

Etiqueta histórica 2: Hematita roja. Fresnillo, Zacatecas (Escuela Nacional de Ingenieros).

Etiqueta (de la colección): Hematita. Nota: Hematita roja; hierro *colao* del Fresnillo, Zacatecas.

Descripción macroscópica

Medidas: 125mm x 111mm x 70mm.

Se tiene una muestra monomineral, ligeramente más grande que un puño. Presenta bordes muy irregulares, que en algunos puntos se podrían semejar a una fractura subconcoidea, y en algunos otros lugares forma bordes angulosos a subangulosos.

La muestra presenta un color homogéneo casi en su totalidad, gris rojizo violáceo. En algunos puntos observan cristales color grafito cuyos bordes están bien definidos, pero no conforman geometrías reconocibles.

A lo largo de casi toda el área observable, hay pequeños destellos metálicos color gris, de tamaños inferiores al milímetro.

En un costado de la muestra, se presenta un área de color pardo rojizo que pierde el tono gris oscuro metálico, y que da un aspecto terroso cuyo lustre llega a ser mate. Es en un extremo de esta zona que se observan pequeños cristales anedrales a subedrales en los que se logran distinguir algunos ángulos y planos correspondientes con caras.

Dicha zona de aspecto terroso se limita del resto de la muestra por bordes alargados bien definidos.

Alrededor de la muestra se pueden observar pequeñas manchas color rojo ladrillo, sin formas bien definidas, que recubren pequeñas áreas submilimétricas.

Llama la atención que en algunos lugares de la muestra se ven pequeños patrones de líneas rectas de las cuales emergen otras, en ángulos casi constantes, que se parecen mucho a una ramificación (Fig. 24, 25 y 26).

Al observar con más aumentos la zona terrosa, se pueden distinguir pequeños cristales de cuarzo (Fig. 23 y 27). Los patrones ramificados observados lucen, de una forma más evidente, como posibles fósiles de vegetales.

Mineralogía

-Hematita.

-Cuarzo.

Interpretación

La muestra corresponde con hematita casi en su totalidad (Fig. 21). El cambio brusco de apariencia, limitado por un borde bien definido (Fig. 22) acusa una oxidación diferencial, mayor en la parte expuesta -de pátina gris- que en la zona fresca, de aspecto terroso. No obstante, hay oxidación presente a través de toda la muestra.

Asumiendo que los patrones vistos son pedacería fósil (Fig. 24, 25 y 26), éstos sugieren la formación de la roca en un ambiente somero, posiblemente cercano al borde costero, lo cual también tiene congruencia con la litología reportada asociada al grupo Proaño (formaciones Valdecañas y Plateros): grauvacas o areniscas arcillosas intercaladas con lutitas (De Cserna, 1976).

En el contexto del distrito minero de Fresnillo, la etiqueta histórica de donación sitúa a la colección de la muestra en la época de (o previa a) la Escuela Nacional de Ingenieros. Dicha escuela fue la sucesora al Real Seminario de Minería, y fue fundada en la segunda mitad del siglo XIX, durante el gobierno de Juárez. Esta información asegura que la muestra corresponde con la zona de oxidación observada en el Cerro Proaño, quien protagonizó la explotación minera durante la mayor parte de la historia del distrito minero antes del siglo XX. La muestra proviene del *stockwork* oxidado del Cerro Proaño.

Cuestiones de interés

¿A qué se debe la gran variedad de apariencias de la hematita en una misma muestra?

¿Es posible descartar la presencia de Ag en dicha zona de oxidación?



Fig. 21 (lupa, 10x). Se observa la composición monomineral y la textura de la muestra. Esta zona fotografiada es representativa de la zona 'expuesta' de la muestra.



Fig. 22 (lupa 10x). Zona de apariencia terrosa. El borde entre ambas 'zonas' es muy claro.



Fig. 23 (lupa, 10x). Cristales visibles en la zona de apariencia terrosa.



Fig. 24 (lupa, 10x). Estructura ramificada de naturaleza probablemente fósil. La superficie en la que se observa la estructura está formada de diversos microcristales, por lo que no es posible que este patrón tenga naturaleza cristalográfica.



Fig. 25 (lupa, 10x). Más pedacería fósil.

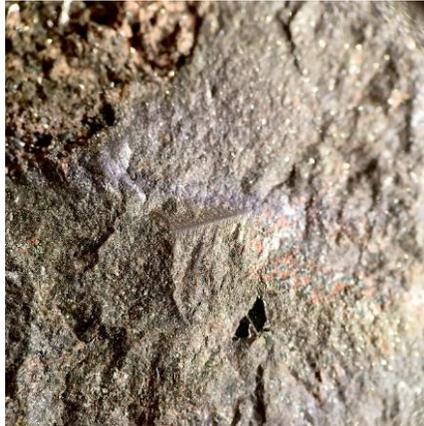


Fig. 26 (lupa, 10x). Se observa un fósil.



Fig. 27 (lupa, 10x). Zona 'terrosa' con cristales. Se señalan en círculos rojos aquellos cristales de cuarzo libres de hematita.

Muestra 3513.



Fig. 28. Muestra 3513.

Etiqueta: Esfalerita, pirargirita-proustita, cuarzo.

Descripción macroscópica

Medidas: 133mm x 89mm x 71mm.

La muestra consta de fragmentos de roca, de varios centímetros de dimensión (8 en el eje mayor del más grande, 4 como media) de apariencia grisácea, con tonos verdosos repartidos irregularmente y cubiertos, en algunos pocos lugares, de un mineral color crema de aspecto polvoriento.

Dichos fragmentos están separados entre ellos por una distancia media de 7mm, con bandas de minerales rellenoando sus espacios.

Esas bandas están conformadas de la siguiente forma (Fig. 29):

Primero, un halo de 2mm -promedio- envuelve a los fragmentos, formado de cuarzo, con un color gris lechoso y un tamaño criptocristalino.

Posterior al cuarzo, se encuentra una capa, de 4mm de media, de sulfuros color gris oscuro, casi negro, que corresponden con marmatita ya que exhiben una raya parda. En algunos puntos de esta banda, se les observa cubiertos de una película delgada color rojo violáceo, tal mineral es pirargirita-proustita. Es en esta segunda capa, que el principal componente es un agregado de marmatita, con cristales anedrales a subedrales. En aquellos cristales más desarrollados, solo se alcanzan a distinguir algunos ángulos y pequeños planos correspondientes con caras.

En algunas zonas, los fragmentos de roca dejaron más espacio, y se observa una tercera banda que corresponde con cuarzo macrocristalino (Fig. 30), variedad cristal de roca. Los cristales miden, en promedio, 2mm (en su plano horizontal a-b-x_i), y llegan hasta los 4mm. Se distinguen fácilmente prismas hexagonales y puntas correspondientes con romboedros positivos y negativos, que dan una apariencia pseudo hexagonal observándolos desde su eje 'c'.

En un lado de la muestra, perpendicular a donde se observa mejor el bandeamiento, la ruptura de ésta se dio siguiendo a la capa de sulfuros, por lo que este costado de la muestra da una vista más detallada de los mismos.

Sulfuros

En esta zona del ejemplar también exhibe de forma clara la sucesión de los minerales.

Se observa, principalmente, una cubierta de sulfuros de color gris oscuro a negro, localmente cubiertos de manchas color rojo violáceo de lustre submetálico a metálico.

En un punto, se observa de entre los sulfuros un fragmento de roca, rodeado por un halo de cuarzo. En este mismo punto se ve un pequeño agregado de cristales apenas distinguibles, aun con la lupa 10x, de pirita (Fig. 31).

En un extremo de esta cara de la muestra, los sulfuros están cubiertos de un agregado de cuarzo, cuyos cristales son submilimétricos y dan una apariencia similar al hábito botroidal, recordando que dicho hábito corresponde con agregados criptocristalinos, el término sólo se usa aquí para transmitir

la idea de la apariencia. Es en esta misma cavidad que, de entre el cuarzo, se dejan ver algunos cristales macroscópicos subedrales de sulfuros. Llama la atención uno de pirargirita por su tamaño (Fig. 32).

En otra sección de este mismo lado, hay una cubierta blanquecina-parduzca de cristales que forman un pequeño enrejado, que envuelve a cristales de esfalerita. Posiblemente se trata de calcita.

Una observación interesante es un punto color azul rey presente en dicho enrejado, dicho color es característico de la azurita (Fig. 33).

Mineralogía

-Cuarzo.

-Esfalerita, var. Marmatita.

-Pirargirita-proustita.

-Pirita.

-Calcita.

-Azurita.

Interpretación

La muestra es, en pocas palabras, una brecha mineralizada. De la roca original se observan fragmentos color gris oscuro que, a simple vista, no exhiben granos visibles.

Los dos lados analizados muestran la misma secuencia de cristalización, la misma paragénesis:

Una primera etapa de cuarzo criptocristalino sobre la cual siguió una asociación de sulfuros: marmatita con proustita-pirargirita y, en menor medida, pirita.

Sobre estos, siguió otra capa de cuarzo, que formó los cristales euedrales en aquellos lugares con mayor espacio disponible. En una de esas oquedades, se observan también los sulfuros con mayor grado de cristalinidad, especialmente la pirargirita.

Aquellos sitios que -se interpreta- aún no se sellaron, fueron conducto para una solución de diferente composición, que formó el enrejado de calcita y dejó algunos indicios de azurita, mineral que también es un carbonato.

La textura enrejada de cristales de apariencia tabular recuerda un poco al travertino que, a final de cuentas, es un carbonato de origen hidrotermal.

Cuestiones de interés

Sería excelente conocer la ubicación de la muestra. La paragénesis, alta ley y la descripción son congruentes con la literatura existente de la veta Santo Niño o las estructuras asociadas a esta.

¿Existen valores de Cu explotables asociables a las etapas de depósito de carbonatos (últimas etapas de depósito hidrotermal en la literatura)?



Fig. 29 (lupa, 10x). Bandeamiento. Se observa de manera muy clara la secuencia de cristalización. Cuarzo en los extremos y sulfosal en la zona central. Los tintes violáceos corresponden con raya de pirargirita sobre un agregado cristalino de marmatita.



Fig. 30 (lupa, 10x). Cuarzo macrocristalino en una cavidad entre los fragmentos de roca.



Fig. 31 (lupa, 10x) Pirita sobre el cuarzo.

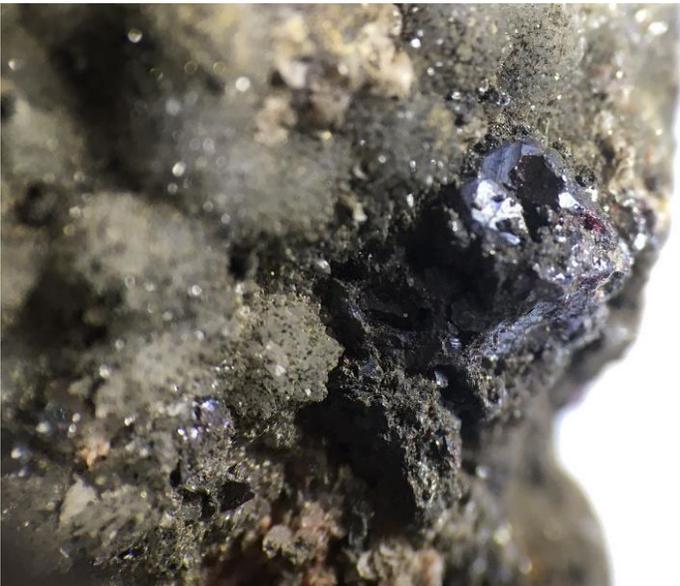


Fig. 32 (lupa, 10x). Cristal macroscópico de pirargirita. En su extremo derecho se aprecia la característica raya roja-violácea metálica de dicho mineral.



Fig. 33 (lupa, 10x). Carbonatos que dan un aspecto de enrejado alrededor de cristales de esfalerita. Se observa en un extremo de la muestra una mancha color azul rey (posible azurita).

Muestra 2940.



Fig. 34 (lupa, 10x). Muestra 2940.

Etiqueta histórica: N.13, 169; carbonato de plomo, veta de San Ricardo – Cerro de Proaño.

Etiqueta: Galena, Cerusita, Masicot, Pirita, Mineral Arcilloso (Caolinita), Cuarzo, Limonita.

Descripción macroscópica

Medidas: 110mm x 73mm x 49mm.

La muestra está conformada por una matriz rugosa color beige, oscurecido por tonos grises. Dicha matriz corresponde con cerusita. Se siente deleznable al tacto y deja residuos pulverulentos en las manos. Se observan abundantes vesículas repartidas a lo largo de toda la muestra, de tamaño medio inferior al milímetro.

En algunos -muy contados- lugares, emergen pequeños agregados de cuarzo anedrales a subedrales. El cuarzo muestra algunos cristales distinguibles de los cuales la gran mayoría no desarrollaron morfologías bien definidas, y solo exhiben algunos rasgos morfológicos claros en un hueco de la muestra.

A lo largo de toda la muestra se hallan cristales diseminados de pirita (Fig. 36). Dichos cristales son muy escasos ($\ll 1\%$), no suelen estar en contacto entre ellos. Miden fracciones de milímetro y, a la lupa 10x, no se les distinguen rasgos, salvo algunos pequeños planos que corresponden con caras de formas no muy desarrolladas.

La muestra está cubierta en algunas zonas por masicot (Fig. 37), un mineral pulverulento color amarillo mostaza. En otras zonas es un mineral pulverulento color gris claro, posiblemente caolinita.

Los minerales antes mencionados, en lugares específicos, dejan ver una roca o mineral subyacente color negro, rugoso y en el que no se distinguen formas. En un extremo de la muestra se distinguen óxidos de hierro pardos rojizos (Fig. 38), de aspecto terroso.

Mineralogía

-Cerusita.

-Masicot.

-Pirita.

-Cuarzo.

-Mineral arcilloso, de color gris (probable caolinita).

-Óxidos de hierro, probablemente hematita y limonita.

Interpretación

Esta muestra se compone de una variedad de minerales de plomo, en mayor medida la cerusita (Fig. 35) y el masicot. La muestra también exhibe una alta gravedad específica al manipularla, lo cual es típico de minerales de Pb, aún con su alta vesicularidad.

La muestra presenta, en todos lados, un aspecto pulverulento y deleznable. Esto es muy común de observar en rocas que han sido alteradas y la gran variedad de clases distintas de minerales -que tienen en su mayoría al plomo como común denominador- (sulfuros, carbonatos, silicatos y óxidos de plomo) denotan varios procesos hidrotermales superpuestos con oxidación.

La principal composición de la muestra corresponde con cerusita, lo cual evidencia un proceso de oxidación. Esta evolución de sulfuros a carbonatos, con cuarzo a lo largo de casi todo el proceso, es observable en muchas otras muestras de la mina y es congruente con la paragénesis comúnmente reportada en la literatura general del distrito.

Lo peculiar de esta muestra es que los carbonatos están cubiertos, a su vez, de óxidos: masicot, hematita y limonita.

Se puede pensar que la muestra representa una etapa más tardía en el flujo hidrotermal respecto de aquellas etapas que generaron la mineralización (sulfuros y sulfosales). Esta etapa se encargó de alterar sulfuros a carbonatos y, finalmente, a óxidos.

Esto está, probablemente, asociado a un nivel somero en el yacimiento, lo cual concuerda con las zonas oxidadas del mismo que se observan en la zona del Cerro Proaño; zona desde la cual provino la muestra, según la etiqueta histórica (nivel 169).

Cuestiones de interés

¿Es descartable tener valores de Ag en esta zona del yacimiento? De ser así, ¿pueden usarse estas asociaciones carbonato-óxido para delimitar la zona rica en Ag como límites tras los cuales ya no vale la pena explorar por Ag (barrenar)?



Fig. 35 (lupa, 10x). Cerusita, principal componente de la muestra. Fig. 36 (lupa, 10x). Cristales de cuarzo con pirita.



Fig. 37 (lupa, 10x). Masicot que recubre a la cerusita, se presentan algunos cristales de pirita. Fig. 38 (lupa, 10x). Óxidos de hierro en zonas locales de la muestra.

Muestra 1892.



Fig. 39. Muestra 1892.

Etiqueta histórica: *'Al bajo de la veta echada de Sn. Pedro' -1884.*

Etiqueta: Argentita, Esfalerita, Galena, Pirita, Calcita, Minerales Arcillosos y Cuarzo. Etiqueta antigua no. 44.

Descripción macroscópica

Medidas: 100mm x 81mm x 58mm.

La muestra tiene un tamaño aproximado al de un puño.

Consta de un intercrecimiento de sulfuros como esfalerita, pirita, acantita y galena; un mineral pulverulento color pardo claro, probablemente de naturaleza arcillosa y cuarzo sobre una roca de apariencia de grano fino de color gris oscuro.

Los minerales mencionados cubren un 60 a 80% de la superficie visible, y su variación depende del lado desde el que se observe a la muestra.

Intercrecimiento

En las zonas donde está el intercrecimiento de sulfuros, que llega a cubrir por completo a la roca.

Se observa una asociación de pirita con esfalerita, variedad marmatita. Ambos minerales se encuentran en casi la misma proporción, sólo ocasionalmente interrumpidos por la galena en ciertos lugares específicos.

El intercrecimiento de sulfuros se muestra como ‘manchas’ de ambos minerales, en los que la pirita es anedral. La esfalerita se observa anedral a subedral, esta última en pocos lugares específicos. En sus puntos de mayor cristalinidad se pueden distinguir algunas caras pseudorómbicas (Fig. 41).

La galena se observa entre el intercrecimiento de esfalerita-pirita y deja ver algunos vértices de cristales cúbicos fácilmente distinguibles (Fig. 42).

El mineral arcilloso es de color pardo claro y se observa recubriendo a los demás minerales, concentrándose más en zonas donde abunda la marmatita (Fig. 40).

El cuarzo, por su parte, se presenta en algunos espacios que dejan los sulfuros, como cristales submilimétricos de color blanco lechoso a gris intermedio, de apariencia ‘granular’, anedrales y sólo unos pocos cristales exhiben geometrías prismáticas.

La acantita se observa como manchas de color grafito, opacas y sin formas distinguibles. Se encuentra asociada a la esfalerita-pirita, pero en menor proporción.

El mineral arcilloso, en un punto, adquiere un color pardo-rojizo ‘ladrillo’ más vivo que en el resto de la muestra (Fig. 43 y 44).

En un extremo, y con ayuda de la observación con aumentos, se observa un mineral color azul rey, criptocristalino, probablemente azurita (Fig. 45).

Mineralogía

-Esfalerita, variedad marmatita.

-Pirita.

-Galena.

-Cuarzo.

-Mineral arcilloso, de color gris.

-Azurita.

Interpretación

La muestra presenta zonas donde se está rompiendo de una forma muy similar a rocas de grano fino. Es factible que la roca original, de la que se observa muy poco, haya sido una roca clástica marina de grano fino.

Se observa al cuarzo cubierto por la esfalerita y pirita, los que están, a su vez, parcialmente cubiertos por el mineral arcilloso. De esto, se puede afirmar que la pirita y la esfalerita cristalizaron en una misma etapa, afirmación que se refuerza con la presencia de hierro en ambos minerales (siendo la marmatita la variedad de la esfalerita rica en hierro).

La galena puede asociarse a esta misma etapa, junto con la acantita, pero en menor proporción. Se constata una etapa tardía de alteración hidrotermal, cuyos minerales cubren esta asociación.

La presencia -aunque minúscula- de azurita acusa el desarrollo de una etapa de fluido supergénico.

Cuestiones de interés

Si la acantita está asociada a la galena-esfalerita-pirita, ¿habrá valores de Ag de interés asociados a la galena y a la pirita (galena y pirita argentíferas)? De ser así, ¿a qué grados de cristalinidad de los sulfuros se les podrían asociar a dichos valores de Ag?

La muestra corresponde con una profundidad de transición entre los metales base y aquellos, más someros, con valores de plata. De haber valores de dicho metal asociados a estos minerales, ¿podrían requerir estos niveles sus propios métodos de beneficio para evitar la pérdida de valores de Ag?



Fig. 40 (lupa, 10x). Se observa la asociación entre la pirita-esfalerita y el cuarzo.



Fig. 41 (lupa, 10x). Se observa un acercamiento al agregado de marmatita. Se pueden distinguir en las caras que reflejan luz algunas caras con ángulos definidos.



Fig. 42 (lupa, 10x). Cristales de galena entre la esfalerita-pirita. La galena solo es distinguible en zonas muy locales.



Fig. 43 (lupa, 10x). Mineral pulverulento. (arcilloso).



Fig. 44 (lupa, 10x). Zona donde el mineral pulverulento se torna más rojizo.

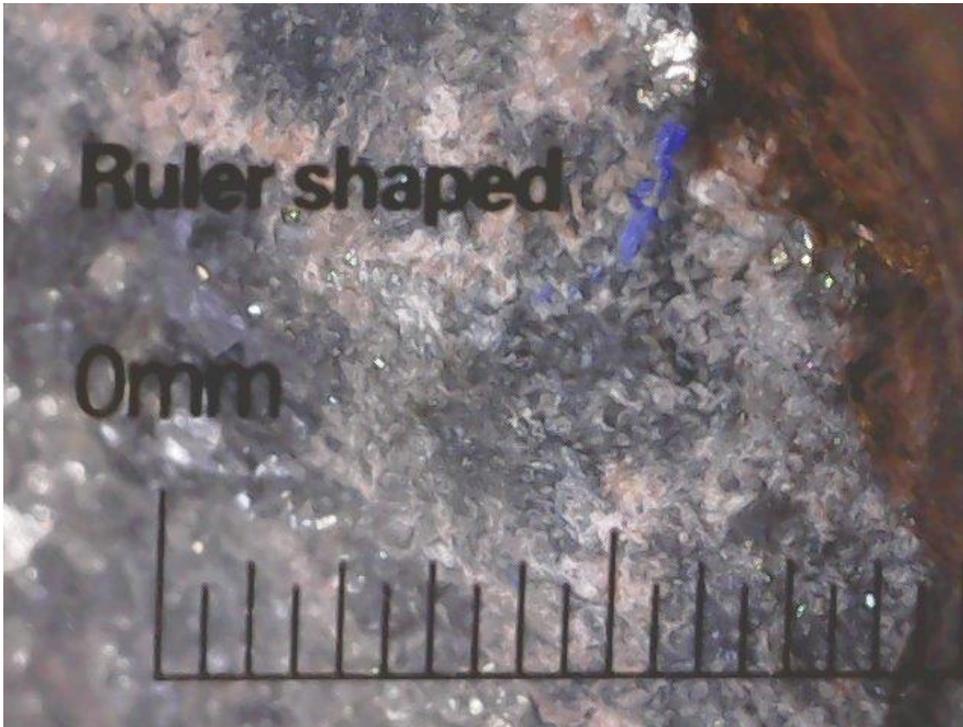


Fig. 45 (lupa, 10x). Mancha azul presente sólo en este punto en la muestra. Probable azurita. Aunque escasa, no es la primera vez que se observa en muestras del distrito minero de Fresnillo.

Muestra 1420.



Fig. 46. Muestra 1420.

Etiqueta: Mimetita, galena, limonita, hematita. Nota: De la veta de San Ricardo, Punta de Colorados, Fresnillo, Zacatecas.

Descripción macroscópica

Medidas: 119mm x 73mm x 47mm.

La muestra presenta una compleja asociación de minerales, por lo que se procederá a describir desde sus rasgos más generalizados hasta aquellos más puntuales.

Esta muestra exhibe una textura muy irregular, rugosa al tacto y sus bordes son angulosos a subangulosos. Un aspecto importante es su alta vesicularidad observada en toda la muestra. Tiene huecos de muy diversos tamaños (de fracciones de milímetro a poco más de un centímetro, siendo 1 milímetro el tamaño medio), de gran influencia en la cristalización de la variedad de minerales que se mencionarán más adelante.

Para dar una mejor idea de la apariencia y textura de la muestra, se puede asemejar mucho a un fragmento de basalto -sin determinar dicha litología- pero con un tono gris verdusco, de grano apenas distinguible.

La muestra está totalmente cubierta de diversos minerales, muchos de los cuales presentan fractura terrosa, mientras que algunos otros se presentan como manchas de agregados criptocristalinos de lustre metálico. Otros forman cristales euedrales a subedrales, con algunas formas distinguibles y otro forma una cubierta botroidal en un extremo de la muestra.

Se irán describiendo dichas asociaciones en orden de abundancia:

Agregados criptocristalinos terrosos

Comprendiendo un 80 a 90% de la superficie visible de la muestra, llaman la atención dos minerales. Estos cubren en su gran mayoría a la muestra.

1. El primero es un mineral color amarillo pálido a anaranjado, que generalmente recubre a la muestra como un agregado terroso y, en los huecos, forma agregados de hábito botroidal, dicha especie mineral probablemente corresponde con mimetita (Fig. 47).
2. El segundo se exhibe donde dejan huecos los demás. Se le nota una textura irregular, sin patrones definidos y sin cristales o hábitos distinguibles. Su color va del gris oscuro, con matices verdosos, a negro. Su dureza es cercana a 3, en la escala de Mohs, y exhibe una raya color gris medio. En un punto se observa color negro, pero el lustre revela pequeños planos de cristales anedrales (Fig. 48).

Minerales de lustre metálico a submetálico

En un lado de la muestra se observan masas criptocristalinas a cristalinas de pirita. Estos agregados alcanzan hasta el centímetro y están cerca de la zona de mayor cristalinidad de la galena (Fig. 49). En esta cara, la pirita comprende alrededor de un 5% de la superficie visible (Fig. 50).

Agregados macrocristalinos

Los huecos son lugares de gran interés en la muestra, ya que en ellos se observan varios agregados de cristales macroscópicos.

Lo primero que llama la atención es que, en muchas oquedades, la probable mimetita forma agregados botroidales, en los que el color del mineral se aclara, dejando ver mayor grado de cristalinidad.

En varios huecos se ven agregados de cristales blancos aciculares, que forman abanicos radiales de lustre sedoso. Se determina, por asociación mineral y por la apariencia de dichos agregados que se trata de hemimorfita (Fig. 51). No se realizaron pruebas físicas determinativas, con el propósito de preservar dichos cristales.

En un extremo de la muestra, a la lupa 10x es de notar la presencia de cristales color azul turquesa de calcoaurita -conocida comúnmente también como auricalcita (Fig. 52).

A lo largo de toda la muestra hay manchas terrosas de color pardo rojizo correspondientes con óxidos e hidróxidos de hierro (Fig. 53).

Mineralogía

- Probable mimetita.
- Galena.
- Pirita.
- Hemimorfita.
- Calcoaurita.
- Óxidos de hierro.
- Esfalerita, inferida.

Interpretación

La muestra exhibe varias etapas diferentes de cristalización, de entre las cuales el plomo se utiliza como común denominador para inferir dicha secuencia.

En primera instancia, los minerales más abundantes son los agregados terrosos, el grisáceo oscuro y el amarillo-anaranjado. Una vista a un costado de la muestra revela que el mineral claro, la probable mimetita, está cubriendo al oscuro; el mineral oscuro, galena (en muy pocos cristales) con probable esfalerita, que se observa asociado con la pirita. Esto quiere decir que los primeros minerales en la secuencia de depósito fueron la galena y la pirita, con posible presencia de esfalerita, inferida por algunos minúsculos puntos parduzcos por su asociación al hierro (presente en la pirita) y por la presencia de otros dos minerales de zinc.

La secuencia de minerales que formaron a esta muestra sería, entonces, sulfuros de plomo, hierro y algo de zinc en una etapa inicial. Posteriormente dichos minerales dieron lugar a la probable mimetita, óxidos de hierro y un par de minerales de zinc que se detallarán en seguida.

Las cavidades revelan agregados aciculares radiales que corresponden con hemimorfita, la que es un silicato hidratado de zinc.

En un punto, la calcoaurita confirma la presencia de zinc, con cobre, y un cambio en la naturaleza del fluido, evidente porque se trata de un carbonato. Las últimas dos etapas evidencian un proceso de oxidación.

La secuencia podría ser representada, entonces, de una forma más simplificada en la siguiente tabla:

Etapa inicial	Segunda etapa	Última etapa
Galena	Mimetita (¿)	Hemimorfita
Pirita	Hematita	Calcoaurita
Esfalerita		

Fig. 47. Secuencia de cristalización observable en la muestra 1420.

Commented [CGGV30]: La segunda y última etapas fueron originadas por un proceso de oxidación

Cuestiones de interés

¿Por qué no hay calcoaurita, mimetita ni hemimorfita reportadas en la literatura del distrito? ¿La muestra corresponde con el distrito minero de Fresnillo?

De pertenecer a Fresnillo, ¿están estas asociaciones presentes en otras estructuras? ¿A qué niveles de profundidad en el yacimiento (veta San Ricardo, según la etiqueta) corresponden?

Si perteneciera a otro distrito, hay que notar la semejanza en la paragénesis (que, *grosso modo*, inicia con sulfuros y evoluciona a carbonatos) con aquella del distrito minero de Fresnillo. Dicha semejanza determina una evolución mineralógica que culmina en un proceso de oxidación de la mena a escasa profundidad.



Fig. 47 (lupa, 10x). Probable mimetita en agregados botroidales.



Fig. 48 (lupa, 10x). Asociación galena-mimetita, se observa claramente que el probable arseniato cristalizó sobre la galena (color obscuro).



Fig. 49 (lupa, 10x). Cristal de galena (aquel que refleja la luz en un tono gris claro).



Fig. 50 (lupa, 10x). Asociación pirita-galena.

Commented [CGGV31]: Corregir ubicación de párrafo



Fig. 51 (lupa, 10x). Abanicos radiales de lustre sedoso. Al haber zinc presente en otros minerales se interpreta que es hemimorfita, un silicato hidratado de zinc.



Fig. 52 (lupa, 10x). Calcoaurita (tonos turquesa). Confirma sin lugar a duda la presencia de zinc por lo que da seguridad para determinar a la hemimorfita y para inferir a la esfalerita.

Fig. 53 (lupa, 10x). Óxidos de hierro.

Muestra 3685.



Fig. 54. Muestra 3685.

Etiqueta histórica: N. 19, 1854. *Perlaespato o bruno espato*. Veta de S. Ricardo, Cerro de Proaño.

Etiqueta: Psilomelano (?).

Descripción macroscópica

Medidas: 112mm x 86mm x 58mm.

La muestra está formada casi en su totalidad por un mismo mineral.

Es un agregado de apariencia masiva con formas muy irregulares que van desde zonas semi lisas de textura al tacto, casi resinosa, a zonas donde sobresalen bordes angulosos. Hay algunas cavidades entre tal irregularidad y no se distinguen cristales ni siquiera con ayuda de la lupa binocular.

El color es un negro parduzco en la gran mayoría de la muestra, que en lugares específicos muestra matices grisáceo-azulosos.

En algunos puntos pequeños de la muestra está cubierta de un mineral pulverulento color pardo-rojizo que, muy probablemente se trate de óxido e hidróxidos de hierro.

La dureza de la muestra es igual o superior a 5.5 en la escala de Mohs, siendo imposible rayarlo con la navaja. Se intenta rayar con una muestra de cuarzo, con el que la muestra desprende una raya color negro parduzco, y se determina una dureza de 6 a 6.5.

Por las propiedades observadas, se determina que el mineral es romanechita, antes llamada *psilomelano*, término en desuso, pero puede tratarse también de una mezcla de óxidos e hidróxidos de manganeso (Fig. 55).

Mineralogía

-Romanechita.

-Óxidos de hierro, probable hematita.

Interpretación

Constando la muestra de un solo mineral casi en su totalidad, no hay mucho qué decir de su paragénesis e historia de depósito. Lo que sí se pudo es confirmar con cierta seguridad es que se trata de una asociación entre óxidos e hidróxidos de manganeso. Determinar la mineralogía exacta requeriría pruebas de difracción de Rayos X.

El año de la etiqueta histórica de la muestra (1854) y su localización, así como su asociación observable con óxidos de hierro hablan de niveles someros de explotación, en el Cerro Proaño, el que es asociado con la zona de oxidación que recubre a algunas estructuras mineralizadas del yacimiento.

Cuestiones de interés

¿Por qué no se observan otros minerales de manganeso?

Commented [CGGV32]: Esa muestra podría tratarse de una mezcla entre óxidos e hidróxidos de manganeso. Solo con un estudio de difracción de rayos X se podrían determinar dichos minerales, o bien, confirmar a la romanechita



Fig. 55 (lupa, 10x). Romanechita, se aprecian óxidos de hierro en la esquina superior izquierda.

Muestra 141.



Fig. 56. Muestra 141. Se observa un agregado de cristales de pirita de calidad museo.

Etiqueta: Cristales de pirita cubiertos por calcita, galena, esfalerita.

Descripción macroscópica

Medidas: 74mm x 64mm x 40mm.

La muestra consta de un agregado de macrocristales euedrales a subedrales de pirita.

Sus tamaños varían entre los cristales de menos de 1mm, y sin formas distinguibles, y aquellos hasta los 13.7mm (medida uniforme en todas las direcciones del cristal, pues es del sistema isométrico), siendo la gran mayoría de los cristales euedrales y con dimensiones entre los 2 y 5mm.

El agregado se ve recubierto por una delgada capa blanquecina que atenúa el lustre metálico y que palidece un poco más el color.

Entre los cristales de pirita, en una zona se observan cristales euedrales a subedrales de esfalerita variedad marmatita. Estos cristales se encuentran debajo de la pirita, situación que se vuelve más evidente al girar la muestra.

El lado de la muestra posterior a los cristales grandes de pirita muestra una asociación de cristales de marmatita y pirita, en proporciones muy similares y cristalinidades subedrales a anedrales. Hay galena presente asociada a la marmatita-pirita en zonas específicas y en menor proporción. De ese lado, la pirita se muestra como manchas sin formas distinguibles o como cristales cúbicos y piritoédricos menores al milímetro de tamaño. La esfalerita se encuentra como cristales subedrales submilimétricos negros, que dejan ver solo algunas caras planas con destellos al reflejar la luz. Una pequeña zona de ese mismo lado está recubierta por un mineral pardo pulverulento, probablemente hematita o limonita.

En el lado de los cristales macroscópicos, en un extremo de la muestra se observa un mineral pardo, mate, que recubre a varios cristales de pirita en un agregado de apariencia botroidal. Dicha cubierta corresponde con la calcita, cuyo color se debe probablemente a la impregnación de óxidos de hierro.

Mineralogía

-Pirita.

-Esfalerita, variedad marmatita.

-Calcita.

-Óxidos de hierro, probable hematita.

-Galena.

Interpretación

La muestra está constituida exclusivamente de minerales de mena y ganga. No obstante, este ejemplar evidencia una típica secuencia paragenética.

En general, lo primero en formarse fue la asociación de esfalerita con pirita y galena, las que están asociadas a la misma etapa de cristalización, y en proporciones muy similares.

Commented [CGGV33]: Por favor verifica si se trata del mismo lado

Al observar hacia el lado anterior de la muestra (el lado de los cristales macroscópicos que se observa en la fotografía 48) ocurren dos cambios evidentes:

1. Dejan de estar presentes la esfalerita y la galena.
2. Cambia la cristalinidad de la pirita.

De estos dos cambios, se puede inferir lo siguiente:

La solución acuosa depositó sulfuros de metales base en una misma etapa inicial. Posteriormente, la solución hidrotermal perdió Zn y Pb, prevaleciendo el Fe. Al mismo tiempo, la solución fue perdiendo concentración y/o la temperatura disminuyó, promoviendo una menor nucleación y suministrando materia mineral suficiente y suficientemente lento para generar macrocristales euedrales.

La siguiente etapa también se caracteriza por otro cambio en la composición y, posiblemente, en las condiciones termodinámicas del fluido, depositando calcita sobre los cristales de pirita.

La temporalidad relativa de estas etapas es evidente, ya que los cristales crecen hacia donde hay espacio, es decir, desde la asociación pirita-esfalerita hacia los cristales macroscópicos de pirita y, finalmente, la cubierta de calcita con óxidos de hierro.

En resumen, esta muestra es testigo de la evolución de un fluido hidrotermal rico en metales base que depositó los sulfuros. Posteriormente se empobreció en Zn y Pb, prevaleciendo el Fe en forma de pirita macrocristalina. Finalmente, se hicieron presentes la calcita y los óxidos, probablemente debido a un nuevo cambio en las condiciones fisicoquímicas del fluido hidrotermal, concordante con la etapa de oxidación y enriquecimiento supergénico.

Cuestiones de interés

Valdría la pena buscar elementos traza en la pirita cristalina para descartar -o asociar- elementos *pathfinders* con cristalinidades distintas.

Un análisis isotópico a la calcita podría explicar la naturaleza del cambio composicional del fluido, aclarando si, por ejemplo, éste se debiera a asimilación de litologías calcáreas, mezcla con aguas meteóricas, magmáticas u otros procesos.

Commented [CGGV34]: Dada la escala de observación no se puede abusar de la inferencia!

Commented [CGGV35]: Estos son elementos guía que pueden revelar potencial

Hay mucha semejanza en la asociación pirita-esfalerita-galena y en la secuencia de sulfuros a carbonatos observada en más muestras en este trabajo. Es lógico afirmar que existe una relación genética.

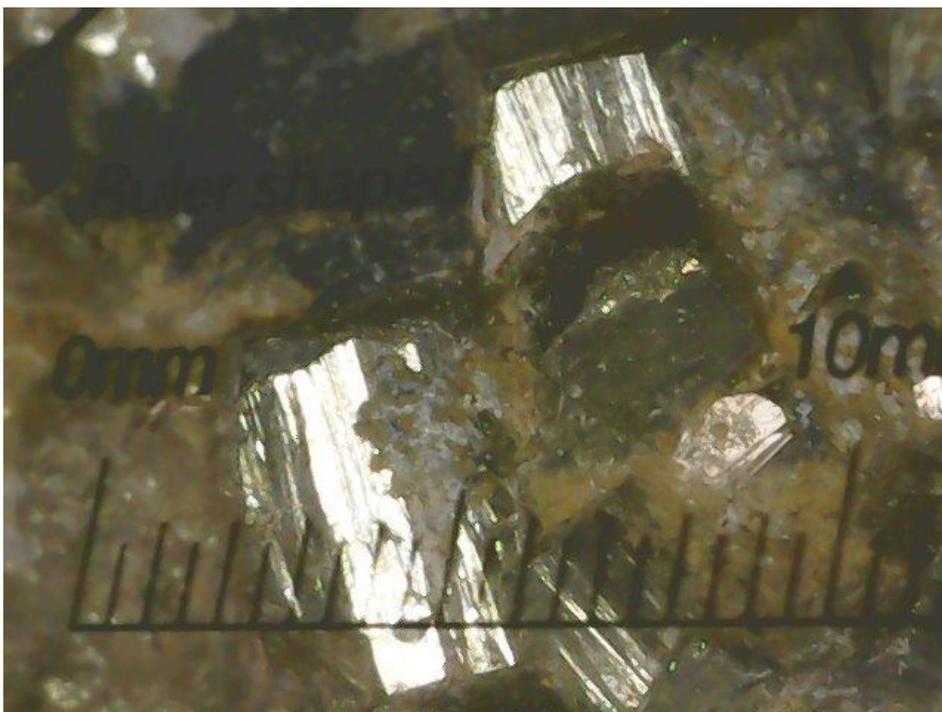


Fig. 57 (lupa, 10x). Cristales macroscópicos de pirita. Se distinguen comúnmente combinaciones cubo-piritoédricas.



Fig. 58 (lupa, 10x). Cristales de marmatita sobre cristales euedrales de pirita.

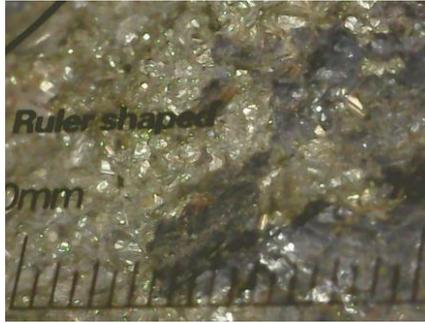


Fig. 59 (lupa, 10x). Asociación marmatita-pirita en el lado posterior a los cristales macroscópicos.



Fig. 60 (lupa, 10x). Galena, se observa asociada a la etapa de esfalerita-pirita, pero en menor proporción.



Fig. 61 (lupa, 10x). Cristales botroidales de calcita (imitando las formas de la pirita por cristalizar encima) impregnada de óxidos de hierro.

4.4.1.2. Descripciones Minerográficas

Commented [CGGV36]: Ten cuidado en referir siempre las fotomicrografías al texto

Posterior a las descripciones macroscópicas, se realizó una selección de campos de interés en las muestras, con base en las asociaciones mineralógicas visibles a simple vista o con lupa 10x. De esos campos selectos, se enviaron a hacer secciones pulidas para su observación y descripción en el microscopio minerográfico.

El objetivo de dichas descripciones es observar con mayor resolución las asociaciones mineralógicas, sus texturas y alcanzar a discernir detalles no visibles a simple vista, que pudiesen ser reveladores de información de interés en la exploración. Es a partir de estas observaciones minerográficas que se enviaron a analizar algunos campos selectos, con objetivos específicos, que se detallarán a continuación, conforme se vayan describiendo.

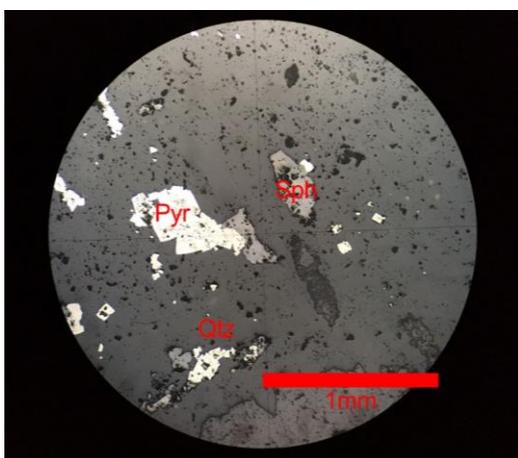
Muestra 3513 (Probable zona de la veta Santo Niño)

10x

Commented [CGGV37]: Por favor, indica la localidad de la muestra, si se trata, además, de la zona antigua o reciente

La pirita se presenta en agregados de cristales subedrales que, ocasionalmente, se encuentran alineados asemejando finas vetillas que se desprenden de agregados cristalinos más gruesos. Sin embargo, la pirita también se halla en cristales euedrales y subedrales diseminados. No obstante,

Commented [CGGV38]: Es conveniente que antes de comenzar las descripciones elabores una breve síntesis sobre el objetivo de estas determinaciones



también se observan intercrecimientos alineados de pirita sin que se desprendan de cristalizaciones más gruesas.

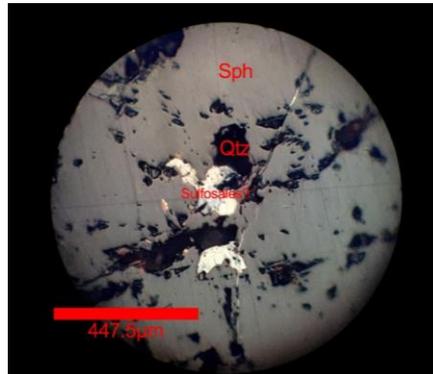
La esfalerita, por su parte, se observa reemplazando parcialmente a la pirita (Fig. 62) y en pequeñas cristalizaciones aisladas en cuarzo.

Fig. 62, 10x. Esfalerita reemplazando parcialmente a la pirita, aisladas ambas en un mar de cuarzo.

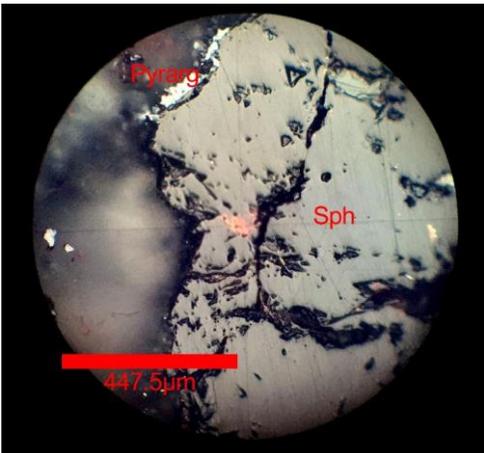
20x

La esfalerita, cuando se presenta en cristalizaciones gruesas suele incluir un mineral gris que se presenta en cristales anedrales, reemplazando a la misma esfalerita. Posiblemente se trate de sulfosales de plata (Fig. 63).

Fig. 63 (32x) Probable sulfosal de plata reemplazando a la esfalerita.



32x



Se observan cristales de pirargirita, aparentemente muy puros, incluidos en esfalerita, alrededor de éstos, hay impregnaciones del mismo mineral (Fig. 64). También se observa ocupando fracturas dentro de la misma esfalerita.

Fig. 64 (32x) Pirargirita bordeando al cristal de esfalerita. La mancha rojiza al centro del campo es impregnación de la misma sulfosal.

Cercano a los bordes de las cristalizaciones de esfalerita ocurre la pirargirita cristalina, inmersa en el cuarzo, pero también se observa pirargirita opaca. Con frecuencia se observan intercrecimientos de cristales anedrales de pirargirita que manifiestan oxidación parcial (rojiza) hacia sus bordes (Fig. 65). También hay dichas impregnaciones en el cuarzo (Fig. 66).

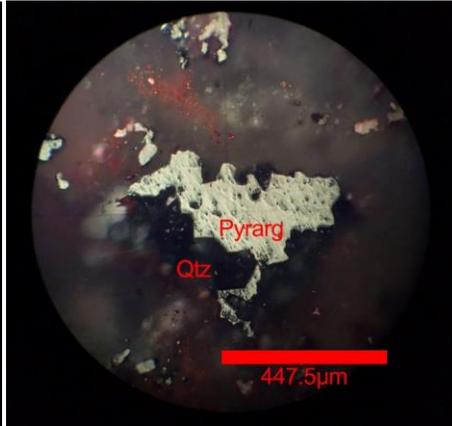
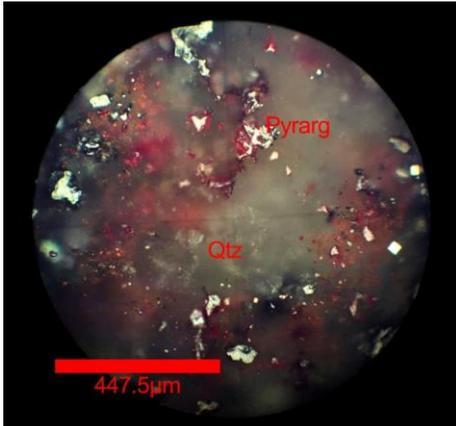


Fig. 65 (32x) Impregnaciones rojizas de pirargirita en el cuarzo.

Fig. 66 (32x). Posible cristal de pirargirita inmerso en cuarzo.

Asimismo, la pirargirita se observa en cristalizaciones opacas que bordean parcialmente a la esfalerita (Fig. 67). No obstante, la esfalerita también incluye cristales elongados de pirargirita. Esto es, posiblemente, a lo largo de las zonas de cruceo.

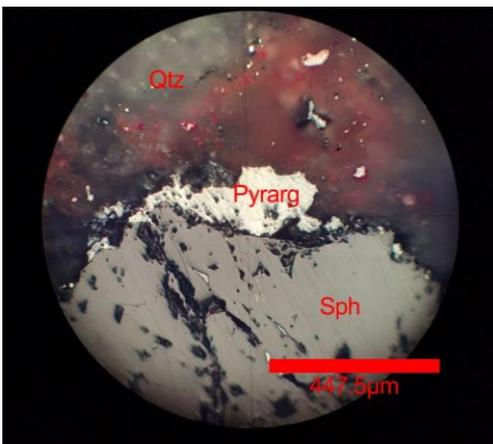


Fig. 67 (32x). Inclusiones elongadas de pirargirita en las cristalizaciones de esfalerita.

En algunas zonas, existen cristalizaciones gruesas de pirargirita, de apariencia muy pura, pero llegan a mostrar una segunda fase cristalina, visible como una zona ligeramente más clara en la propia pirargirita (Fig. 68 y 69).

Commented [CGGV39]: Arreglar el texto del pie de las figuras

Commented [CGGV40]: Arreglar la ubicación del texto

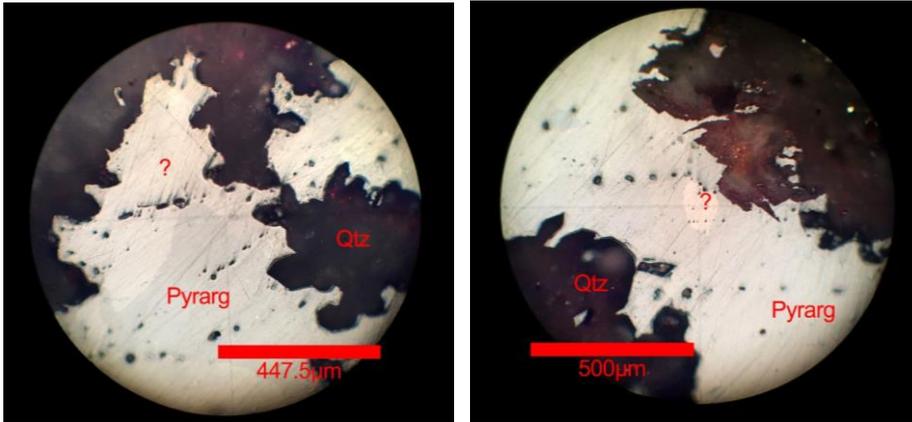


Fig. 68 y 69 (32x). En ambas fotomicrografías se reconoce una fase más clara incluida en las cristalizaciones gruesas de pirargirita. Es necesario determinar la naturaleza de dicha fase con microsonda.

También se llega a observar a la pirargirita asociada con la pirita, en forma de intercrecimientos y reemplazamientos, con inclusiones de pirita en la pirargirita.

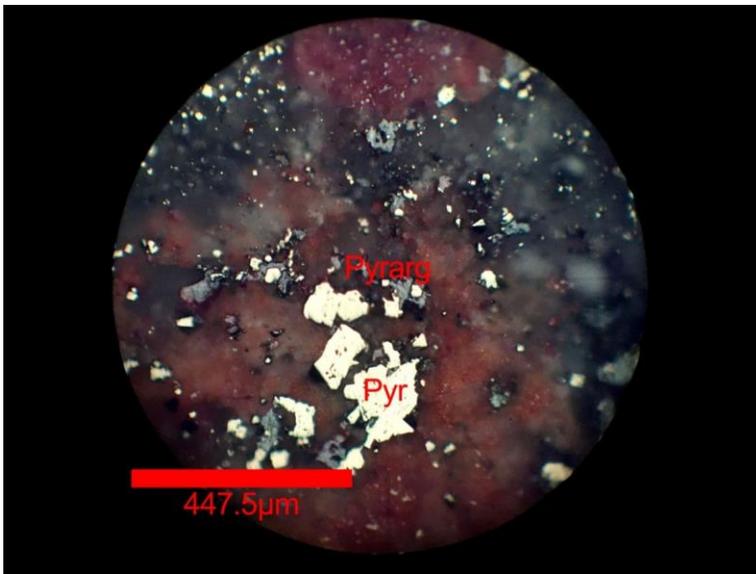


Fig. 70 (32x). Asociación entre la pirargirita y la pirita.

Muestra 2940 (Zona de minas del cerro Proaño)

10x

En la muestra, existen abundantes cristalizaciones de pirita que, muy esporádicamente están reemplazados en los bordes por un mineral de color pardo claro.

20x

Se observan cristales anedrales diseminados de galena incluidos en una ganga de cuarzo. Posiblemente, la esfalerita ocurre igualmente en cristales anedrales diseminados en el cuarzo y en algunas zonas se observa intercrecida con pirita. La esfalerita suele asociarse con galena (Fig. 72). Es destacable que, en algunas zonas, la esfalerita manifiesta vetillas muy sinuosas que forman ramificaciones que se extienden muy cerca de zonas más cristalizadas.

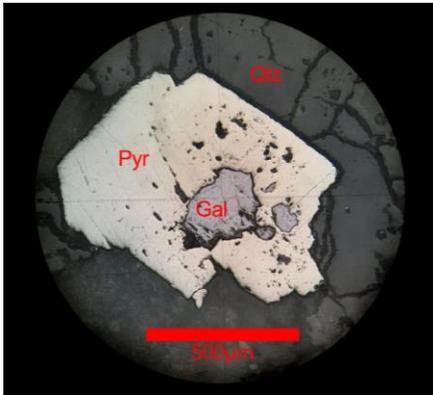


Fig. 71 (20x) Cristal de galena ocluido dentro de pirita.

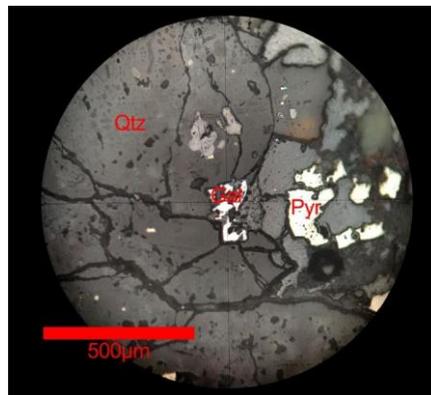


Fig. 72 (20x) Cristales aislados de galena y pirita.

Commented [CGGV41]: Considerar las mismas recomendaciones: de dónde es la muestra, etc., etc. Además todas la figuras deberán referirse al texto

Commented [CGGV42]: No indicas la fotomicrografía

Commented [CGGV43]: Ordenar textos de los pies de figuras

Muestra 1892 (Veta San Pedro, zona de minas del cerro Proaño)

10x

Se observan gruesas cristalizaciones de pirita anedral que se intercrecen con gruesos reemplazamientos de esfalerita, a la misma pirita, igualmente anedral. En zonas de la esfalerita se distinguen emulsiones diseminadas de calcopirita. Se observa dicha asociación como islas de esfalerita en mar de pirita.

En otras zonas, hay cristalizaciones anedrales de galena como huéspedes en la pirita, concentrándose en los bordes y, a veces, en contacto con la esfalerita, pero siempre en asociación (la galena) con la pirita (Fig. 76). En ocasiones se observan las trazas del crucero octaédrico de la galena.

20x

En la galena se observan inclusiones de cristales anedrales de un mineral color gris más claro (que será necesario identificarlo en la microsonda, Fig. 73 y 75), siempre en las cercanías de la galena y el cuarzo. Asimismo, la galena también está asociada a cristalizaciones gruesas de pirita.

En algunos sectores, la esfalerita contiene abundantes inclusiones de galena, en forma de cristales anedrales aislados. También se observan reemplazamientos de esfalerita por galena (Fig. 74).

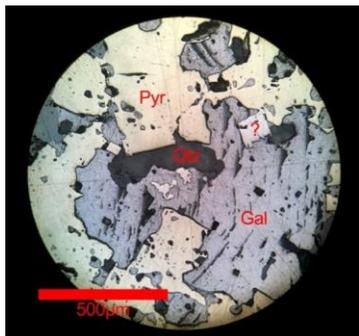


Fig. 73 (20x) Intercrecimiento de galena con un mineral más claro, siempre en las cercanías de cristalizaciones de cuarzo.

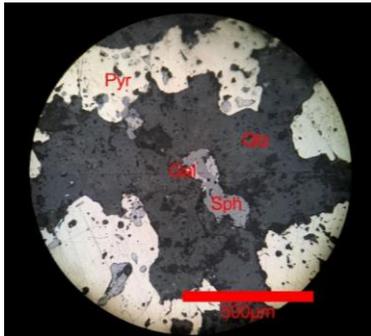


Fig. 74 (20x) Reemplazamiento de galena en los bordes de una cristalización de esfalerita.

Commented [CGGV44]: Idem recomendaciones....

Commented [CGGV45]: Favor de aclarar a qué reemplaza la esfalerita

Commented [CGGV46]: No olvides referir la fotomicrografías al texto

Frecuentemente aparece la galena intercrecida con una fase más clara, probablemente mineral de plata, y muchos intercrecimientos están incluidos en gruesas cristalizaciones de pirita, asociados siempre al cuarzo. El mismo mineral gris aparece como inclusiones aisladas en la pirita.

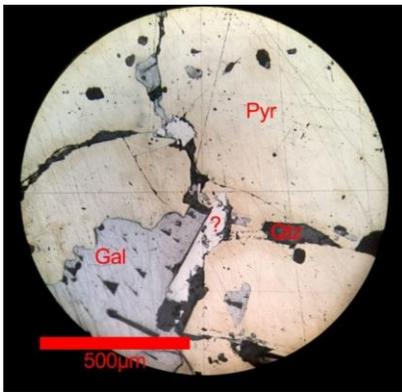


Fig. 75 (20x) Mineral más claro asociado a la galena y a la pirita, aparentemente como un reemplazamiento

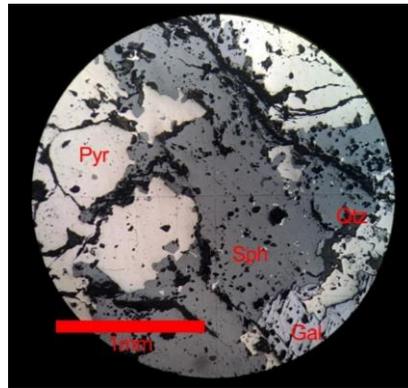
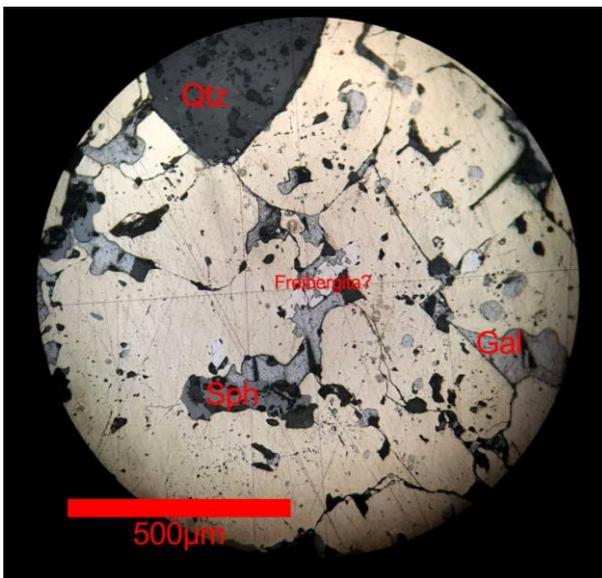


Fig. 76 (10x) Asociación pirita-esfalerita-galena.



Es probable que se trate de freibergita, o bien de tetraedrita con valores anómalos en plata.

Fig. 77 (20x) Fase posiblemente argentífera (es necesario investigar su naturaleza) asociada a la esfalerita, galena y pirita.

Muestra 1420 (Veta San Ricardo, zona de minas del cerro Proaño)

20x

La muestra pertenece a la zona de oxidación. Ocasionalmente manifiesta una textura simplectítica entre la pirita y la esfalerita (Fig. 78 y 79). La esfalerita reemplaza parcialmente a la pirita, pero manifiesta en dichos reemplazamientos alteración parcial supergénica, visible como distintos tonos de gris. Estas zonas están bordeadas por texturas coloformes, de origen supergénico, probablemente derivados de la alteración de la esfalerita (Fig. 80).

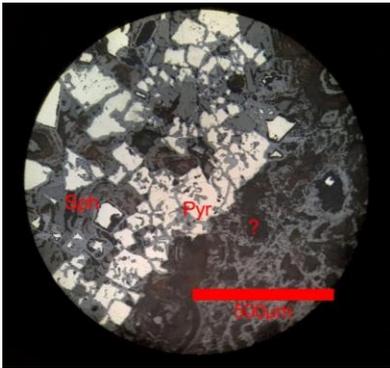


Fig. 78 (20x) Textura simplectítica entre la esfalerita y pirita, bordeados de posible smithsonita.

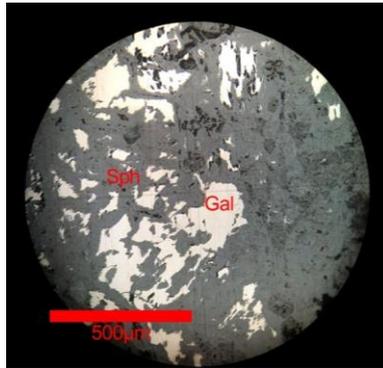


Fig. 79 (20x) Galena reemplazando a esfalerita, tendiendo a una textura simplectítica.

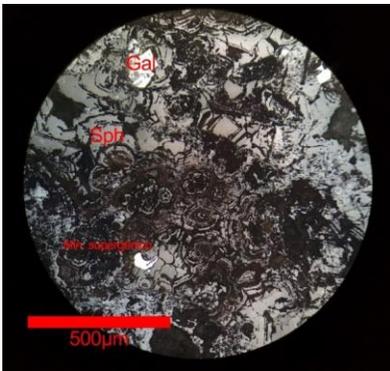


Fig. 80 (20x) Textura coloforme entre el mineral supergénico y la esfalerita, con ocasionales cristalizaciones de galena.

Muestra 141 (Probable procedencia de la zona de minas del cerro Proaño)

10x

Se observa galena reemplazando a esfalerita, así como islas de esfalerita en continente de galena. Hay intercrecimiento entre galena y cuarzo y en algunas zonas la galena en cristales subedrales está asociada con pirita. En la esfalerita es frecuente observar exsolución de calcopirita.

La esfalerita también se encuentra reemplazando a pirita, en forma de contactos engolfados. A su vez, la pirita se presenta como gruesas cristalizaciones, comúnmente asociada a la esfalerita y, ocasionalmente a la galena (Fig. 81).

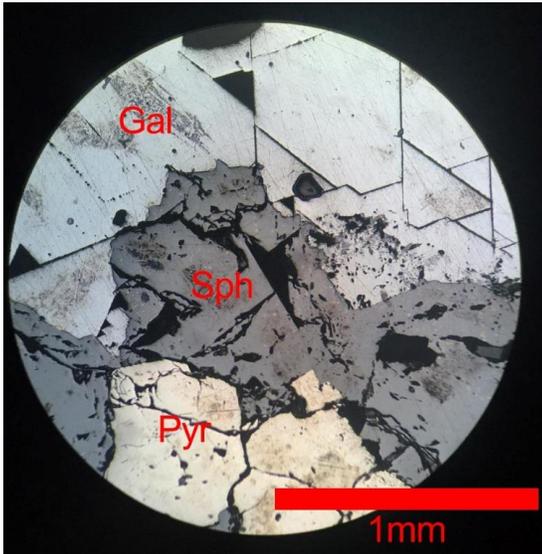


Fig. 81 (10x). Intercrecimiento entre la pirita, esfalerita y galena. Se alcanzan a distinguir pequeñas emulsiones de calcopirita en la esfalerita y la traza bien definida del crucero octaédrico en la galena.

Se observa un posible mineral de plata, de color gris (Fig. 82), intercrecido con cuarzo y bordeado por gruesas cristalizaciones de pirita. Dicho mineral también se encuentra asociado con esfalerita.

En algunas otras zonas, se observan exsoluciones de calcopirita, que derivan

de esfalerita (Fig. 83). En otros sectores aislados, la galena suele reemplazar a la calcopirita formando golfos. Esta calcopirita está asociada a esfalerita y, también, a cuarzo.

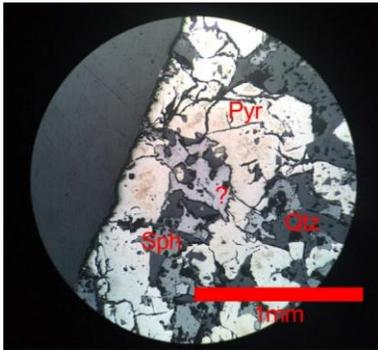


Fig. 82 (10x) Mineral gris (ζ) asociado a la pirita, esfalerita y cuarzo, posiblemente de plata.

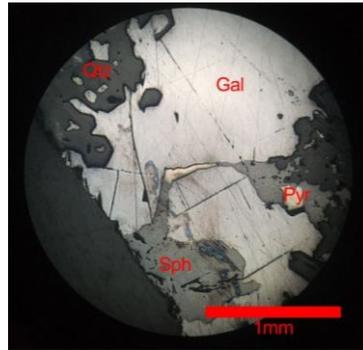
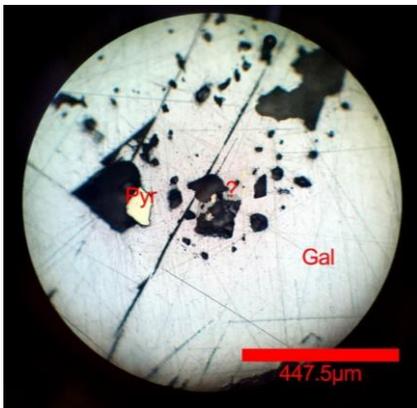


Fig. 83 (10x) Secreción de calcopirita entre dos cristalizaciones anedrales de esfalerita.

20x

Se observan islas de calcopirita dispersas en un mar de galena. También islas de esfalerita en mar de pirita. También aparece la galena incluida en esfalerita, en cristalizaciones aisladas que reemplazan a la esfalerita.



32x

Esporádicamente, se observan inclusiones en la galena de un mineral gris, que aparece intercrecido con cuarzo. En algunas porciones de ese mineral gris se encuentra ocluida la calcopirita. También es esporádico encontrar esfalerita (con emulsiones de calcopirita) que se intercrece con dicho mineral gris parduzco. Aparentemente, el mineral gris parduzco reemplazó parcialmente a la galena (Fig. 84 y 85). Dicho mineral también muestra inclusiones de calcopirita.

Fig. 84 (32x). Mineral gris parduzco (ζ) reemplazando parcialmente a la galena.

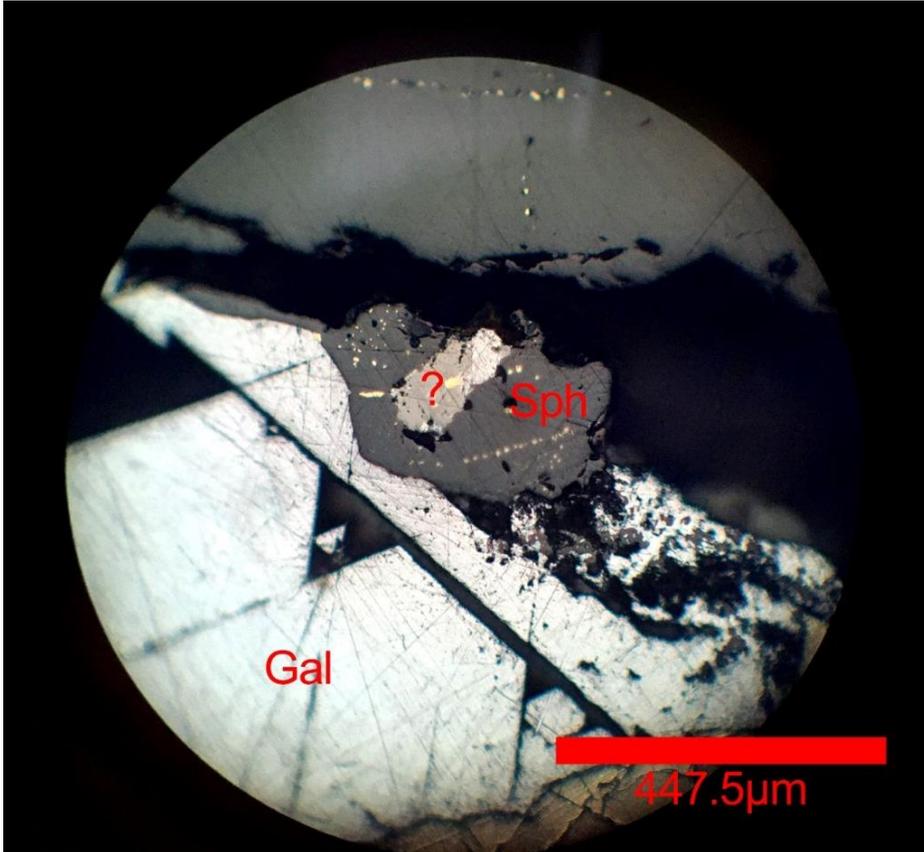


Fig. 85 (32x). Mineral gris parduzco parcialmente reemplazando a esfalerita, ambos minerales presentan exsolución de calcopirita.

4.4.2. Muestras selectas de exploraciones recientes en la veta Andrea y veta San Carlos

4.4.2.1. Descripciones macroscópicas

Muestra 1. Veta Andrea (zona del filón San Ricardo)



Fig. 86. Muestra de la Veta Andrea. Longitud de la navaja (constante para el resto de las fotografías de esta parte del trabajo), 91mm.

Datos de campo.

La estructura de la que fue colectada esta muestra es la veta Andrea, de reciente descubrimiento (2010, comunicación personal), motivo por el que aún no hay información publicada referente a esta estructura. Sin embargo, las siguientes observaciones constituyen una descripción *grosso modo* de la veta en el rebaje de donde proviene la muestra:

La muestra fue tomada en el nivel 290, en el rebaje 2959. En dicho rebaje, la mineralización muestra una textura crustiforme. La veta muestra un fuerte ramaleo que, metros adelante, se convierte en vetilleo que tiende a las tablas de la obra. El ancho de la veta en la zona de muestreo es de 0.87m, pero por comunicación personal se sabe que el ancho medio es ligeramente superior al metro. Se trata entonces de una veta angosta.

La veta tiene una apariencia brechoide con tonos blanquicos, asociados al cuarzo, y verdes, que acusan una notable alteración hidrotermal. Llamam la atención manchas rojas que corresponden con pirargirita, uno de los principales minerales de Ag del distrito. La muestra exhibe muchas de estas características.



Fig. 87. Rebaje 2959, nivel 290. Se reconoce la textura brechoide, con halos de cuarzo bandeados alrededor de cada fragmento de la brecha. Aunque no se aprecia mucho en la foto debido a la falta de buena iluminación, el frente muestra algunas manchas rojizas de pirargirita, tal y como se describirá en la muestra a continuación (la franja de color rojo es marca de pintura del muestreo).

Descripción macroscópica

Medidas: 90mm x 70mm x 48mm.

La muestra es un poco más pequeña que un puño. Su principal componente es roca clástica, de granos apenas visibles a la lupa 10x, que muestran un color verde olivo oscuro, probablemente debido a alteración hidrotermal.

La muestra presenta un vetilleo (<15%) sin una dirección bien definida (Fig. 89). La vetilla más gruesa mide 4mm de grosor y su relleno es principalmente cuarzo.

En varias zonas, el mineral verde tiende a oscurecerse y a exhibir un notable aumento de la dureza. La navaja ya no es capaz de rayarlo. En dichas áreas ocurre una silicificación pervasiva, pero no se descarta la posible presencia de epidota (Fig. 91). Es principalmente en dichas zonas donde se concentran las manchas rojizas de pirargirita, que en un punto forman cristales anedrales a subedrales (Fig. 88), de pocos milímetros, de color gris oscuro con un matiz azulado (Fig. 92).

Al mineral verde oscuro también se le asocia la presencia de pirita (Fig. 90), aunque menos abundante que la pirargirita, diseminada en cristales subedrales a anedrales de tamaño submilimétrico, que no hacen contacto entre ellos, apenas distinguibles a la lupa.

La muestra contiene un mineral gris claro verdoso pulverulento, que está más concentrado en un extremo opuesto al de mayor presencia de pirargirita. Es muy probable que dicho material corresponda con algún o algunos minerales arcillosos.

Mineralogía

-Clorita, con posible epidota y/o clorita en microinclusiones en la zona silicificada (mineral verde más oscuro, y más duro).

-Cuarzo, agregados criptocristalinos color blanco lechoso.

-Pirargirita-proustita.

-Pirita.

-Mineral arcilloso de color gris verdoso.

Interpretación

La muestra corresponde con la veta Andrea que corta a la **grauvaca**, correspondiente con la unidad Proaño.

El vetilleo es resultado del relleno de fracturas por el paso del fluido mineralizante que depositó, en sus primeras etapas de esta fase hidrotermal (observables en esta muestra) a la pirargirita-proustita, ya que esta se encuentra alojada en los límites externos de las vetillas.

La pirita se encuentra más diseminada, indicando una presencia durante más tiempo de la actividad hidrotermal.

Las manchas de pirargirita y la presencia de varios cristales macroscópicos indica una alta ley asociada a esa etapa específica de la actividad hidrotermal, cuya alteración afecta prácticamente a toda la muestra.

La veta Andrea es un yacimiento hidrotermal de Ag de alta ley, producida por la circulación del fluido mineralizante, a lo largo de una falla que pertenece a la familia de fallas de tendencia E-W de la veta San Ricardo. Inclusive se necesita ingresar a la mina por la rampa homónima para llegar a la veta Andrea.

Durante la principal fase de la mineralización, en su etapa temprana se depositaron altos contenidos de pirargirita-proustita, con pirita y cuarzo; no obstante, estos últimos se originaron en la mayor parte de las fases hidrotermales.

Commented [CGGV49]: Con qué unidad corresponde dicha grauavaca?



Fig. 88 (lupa, 10x). Cristal de pirargirita.



Fig. 89 (lupa, 10x). Vetilleo en la muestra.

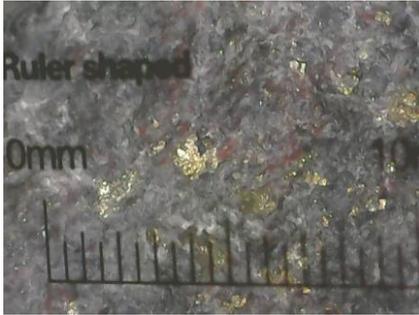


Fig. 90 (lupa, 10x). Cristales de pirita.

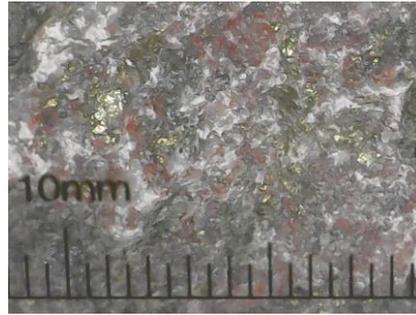


Fig. 91 (lupa, 10x). Asociación entre el mineral verde oscuro con la pirargirita (roja) y la pirita.

Commented [CGGV50]: Arreglar pies de figuras

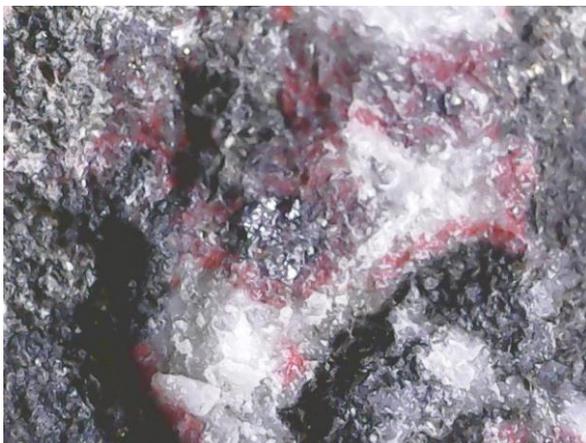


Fig. 92. Vetilla en la que se observan impregnaciones de la pirargirita en los extremos externos de las oquedades rellenas de cuarzo.

Muestra 2. Veta San Carlos



Fig. 93. Muestra 2, procedente de la veta San Carlos, en una zona más al sur del distrito, y de mayor profundidad en la mina.

Datos de campo.

La estructura de la que fue colectada esta muestra es la veta San Carlos, localizada al sur en la mina, zona a la que se puede acceder a través de la rampa San Carlos. La muestra fue tomada en el nivel 840. El ancho de la veta en la zona de muestreo es ligeramente superior a los 2m.

La veta muestra un bandeamiento muy recto, pero existe gran variabilidad en los grosores de cada banda de mineral. La muestra es bastante representativa de los minerales presentes en la veta y de sus proporciones, pero no de la variabilidad de los grosores.

La muestra fue colectada en una zona actualmente caliente y húmeda de la mina, seguramente debido a la mayor profundidad y a deficiencias en la ventilación y drenaje.

Descripción macroscópica

Medidas: 68mm x 63mm x 32mm.

El ejemplar consta de una sucesión de bandas, de 1 a 2mm de grosor medio (en la muestra), de cuarzo intercaladas con roca y sulfuros.

El cuarzo muestra un color gris claro a blanco (Fig. 94). Se presenta en bandas que exhiben simetría, concentrándose los colores claros en los extremos externos de la banda y los tonos grises hacia la parte central. En algunos puntos, el cuarzo alcanza a mostrar cristales macroscópicos subedrales, con formas prismáticas cuyo eje mayor (c, en términos cristalográficos) es perpendicular a la dirección del bandeamiento y apunta hacia el centro de este. A la lupa y al microscopio, en estas zonas se distinguen tonos morados/violetas-grisáceos, que corresponden con los cristales macroscópicos más desarrollados.

En algunas bandas oscuras se observan escasos cristales oscuros, casi negros, de lustre metálico posiblemente teñido por raya y/o alteración. A estos cristales no se les identifica forma alguna, pero el distinto lustre sugiere que se trata de galena (Fig. 95).

En escasos lugares, coincidentes con límites entre las bandas, se observan cristales diseminados de pirita. Son apenas distinguibles a la lupa de 10x, no se les observan formas definidas y constituyen un porcentaje mínimo (<1%) de toda la muestra.

Mineralogía

-Cuarzo, en agregados criptocristalinos color blanquizco y algunos cristales macroscópicos subedrales.

-Pirita.

-Posible galena.

Interpretación

Lo primero que llama la atención de la muestra es el paralelismo del bandeamiento, probablemente debido a la textura original de la roca *host*.

Commented [CGGV51]: El bandeamiento ¿No corresponde con una estructura heredada de la roca encajonante? Aclarar!

El cuarzo, presente en cristales macroscópicos se puede asociar al tipo *comb* (peine, Fig. 96) según la tabla de texturas del cuarzo de Moncada et. al. (2011). En ese trabajo, asocian dicha textura a una solución que no está en ebullición.

Gracias a la profundidad en la mina desde donde se colectó la muestra, a la textura del cuarzo y a la abundancia de metales base, se puede afirmar de esta muestra, que pertenece a un nivel inferior a la ebullición del fluido. La ausencia -aparente a la vista- de sulfosales de plata es congruente con un nivel más profundo del yacimiento, en el que abundan los metales base que, en este caso, están representados por la solución sólida zinc-hierro de la marmatita, y la presencia diseminada de pirita (Fig. 97).

Cuestiones de interés

¿Hay valores de Ag y Au en las zonas de cuarzo ametista?

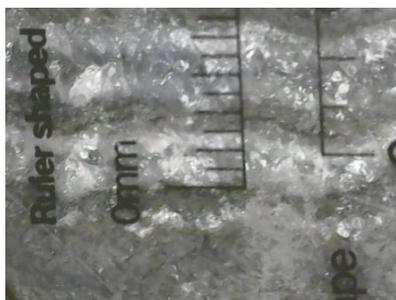


Fig. 94 (lupa, 10x). Banda de cuarzo de 1.5mm.

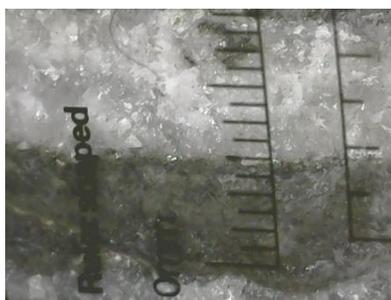


Fig. 95 (lupa, 10x). Banda de sulfuros, 3mm de grosor.

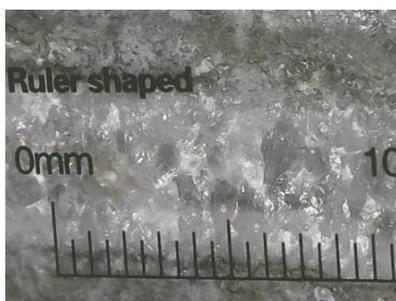


Fig. 96 (lupa, 10x). Cuarzo, cristales macroscópicos de textura *comb*. Se observa en los tonos más oscuros un ligero tinte violeta.

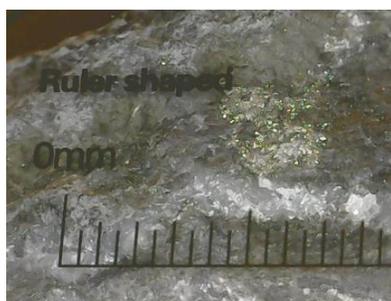


Fig. 97 (lupa, 10x). Cristales de pirita.

4.4.2.2. Estudios Mineragráficos

Muestra 1 (veta Andrea)

10x

Se observan gruesas cristalizaciones anedrales de pirargirita, que exhibe contactos notoriamente engolfados con cuarzo y, en algunas zonas, reemplaza parcialmente a cristales de pirita (Fig. 98). También manifiesta intercrecimientos esporádicos con esfalerita.

La pirita ocurre en cristales anedrales y subedrales diseminados en toda la muestra, a excepción de aquellos involucrados en el reemplazamiento por la pirargirita.

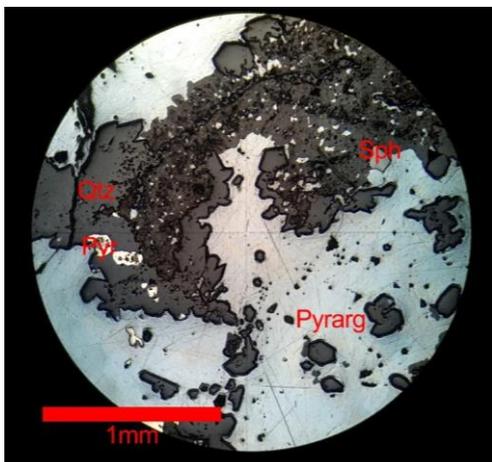


Fig. 98 (10x) Intercrecimiento entre pirargirita, esfalerita y cuarzo.

20x

En algunas cristalizaciones de pirargirita existen inclusiones elongadas de un mineral gris, parecido a la esfalerita (Fig. 99). Al parecer, dichas inclusiones siguen direcciones cristalográficas. En otros sectores, un mineral gris se observa en cristalizaciones aisladas incluidas en la pirargirita, donde coexiste con inclusiones de un mineral gris más claro (Fig. 100). Posiblemente se trate de una sulfosal.

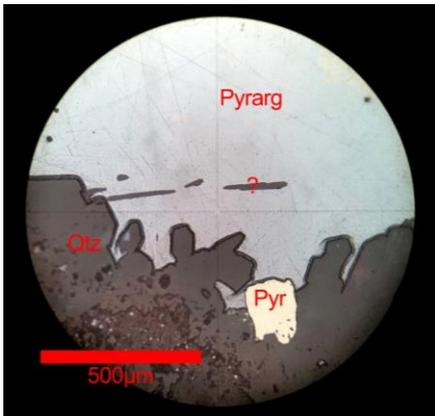


Fig. 99 (20x). Inclusiones elongadas siguiendo direcciones cristalográficas en la pirargirita.

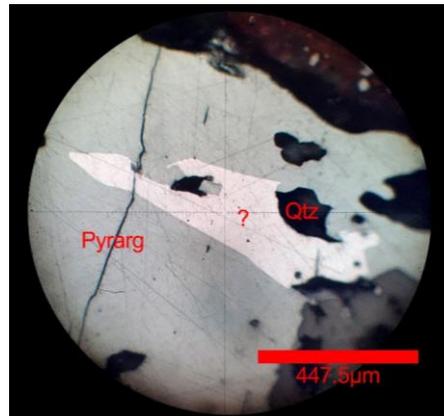


Fig. 100 (32x). Mineral gris (α_2) dentro de una gruesa cristalización de pirargirita.

Commented [CGGV52]: Arreglar pies de figuras

32x

La pirargirita también aparece como impregnaciones en cuarzo (Fig. 101), cercana a cristalizaciones opacas. De igual forma, la pirargirita ocurre en pequeños cristales anedrales aislados, de contornos muy irregulares y bordeadas por fuertes impregnaciones de pirargirita oxidada (Fig. 102).

La pirita ocurre también en cristales aislados, bordeados parcialmente por cristales de pirargirita, de un color más profundo, posiblemente tratándose de la expresión de la cristalización de la última fase del mineral.

Ocasionalmente, ciertas cristalizaciones de pirargirita incluidas en cuarzo adquieren un aspecto muy similar a la textura simplectítica, las que también están bordeadas por impregnaciones rojizas del mismo mineral (Fig. 103).

Algunas cristalizaciones aisladas de pirita presentan pequeñas inclusiones de cristales anedrales de pirargirita. La calcopirita suele aparecer ocasionalmente también en cristalizaciones anedrales aisladas, bordeadas parcialmente por pirargirita.



Fig. 101 (32x). Impregnaciones de pirargirita en cuarzo.

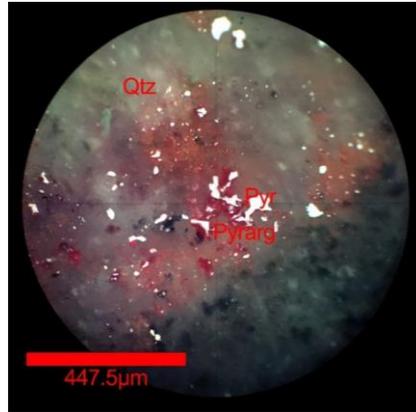


Fig. 102 (32x) Cristales aislados de pirargirita.

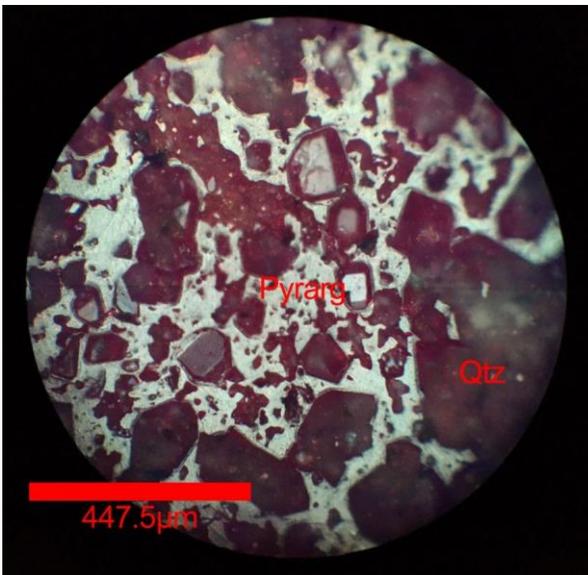


Fig. 103 (32x). Intercrecimiento entre pirargirita y cuarzo, tendiendo a una textura simplectítica.

Muestra SC-1 (veta San Carlos)

10x

Se observa un proceso de silicificación que reemplaza a la roca. En ciertas bandas de cuarzo ocurre la pirargirita, diseminada en cristales anedrales. También, la pirargirita se presenta en muy pequeños cristales dispersos, diseminados en otras bandas paralelas (Fig. 105). En la muestra macroscópica se observa pirita diseminada y muy localizada (Fig. 104). Hay carbonatación coexistente con la silicificación.

32x (oel)

Se observa bandeamiento en la roca, alternándose con bandas de calcita y cuarzo. La pirargirita está en esas bandas de cuarzo, distribuida de manera no uniforme. Donde no se observa la pirargirita como cristales opacos, aparece como impregnaciones y viceversa. Algunos cristales están bordeados por impregnaciones traslúcidas rojizas.

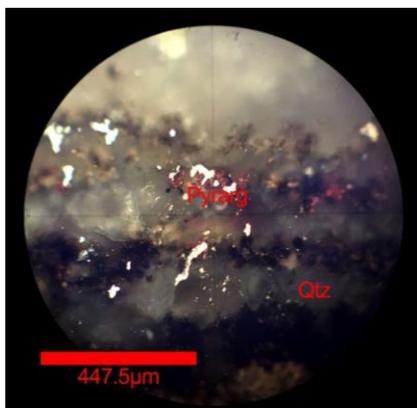


Fig. 104 (32x) Cristal de pirargirita bordeado por impregnaciones rojizas.

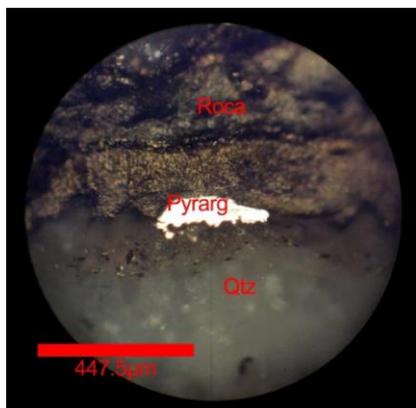


Fig. 105 (32x) Cristal de pirargirita en el borde entre una banda de cuarzo y roca.

Es de hacer notar que sólo en ciertas bandas de cuarzo aparece la pirargirita. También, la pirargirita ocurre en vetillas muy finas monominerales que atraviesan el cuarzo, y en algunos cristales elongados que se encuentran en el contacto de cuarzo-roca.

La pirargirita, también aparece en impregnaciones rojizas siguiendo fracturas en el cuarzo. Algunas cristalizaciones de pirargirita manifiestan bordes de apariencia corroída (Fig. 106 y 107), posiblemente por un proceso de oxidación en donde el mineral opaco gradúa a cristales translúcidos, de color rojizo.

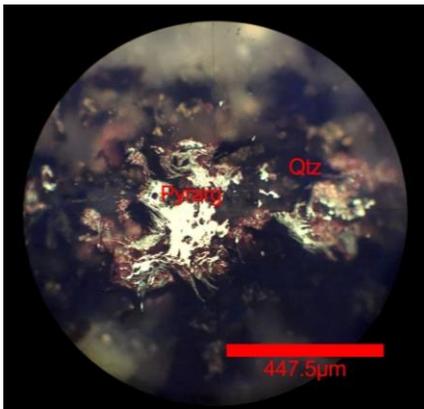


Fig. 106 (32x) Cristal de pirargirita corroído.

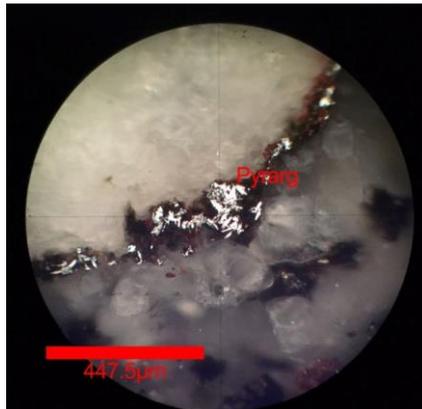


Fig. 107 (32x) Cristal de pirargirita bordeado por pátina rojiza, entre dos bandas de cuarzo.

4.4.3. Análisis químicos cuantitativos

Como parte final de la obtención de datos mineralógicos de este trabajo, las secciones pulidas utilizadas en los análisis mineragráficos fueron enviadas para realizar estudios de mineralogía avanzada en campos selectos, de particular interés, al Laboratorio de Microanálisis del Instituto de Geofísica de la UNAM, *Campus Morelia*.

En algunos campos, el propósito específico fue determinar la naturaleza de fases que no se pudieron identificar en el microscopio mineragráfico. En otros, caracterizar la composición química completa de minerales ya identificados, con el objetivo de contrastar la variabilidad química de elementos (tanto mayores, como menores y traza) entre distintas zonas y profundidades de la mina, con el propósito de hallar patrones en direcciones o vectores, que puedan señalar potencial metálico.

Es importante mencionar que dichos análisis siguen en proceso, dado el tiempo requerido para la obtención de los correspondientes estándares y también debido a la necesidad de calibrar el Microscopio Electrónico de Barrido (*SEM*, por sus siglas en inglés) para dichas mediciones.

En esta parte del trabajo, se buscará enriquecer las descripciones y determinaciones macroscópicas y microscópicas, con los datos obtenidos en el *SEM*. El resto de los análisis y datos que se obtengan, de mayor detalle y alcance, seguirán siendo trabajados con miras a generar futuros trabajos de mayor profundidad y significado en la exploración.

A continuación, se expondrán los datos obtenidos de mayor interés, en orden de cercanía al Cerro Proaño y, por consiguiente, de antigüedad.

Muestra 3513, zona de minas del Cerro Proaño

En la minerografía, en el segundo campo de la muestra 3513 fue observada una fase más clara incluida en una cristalización gruesa de pirargirita. Dicho campo fue fotografiado (Fig. 108) y analizado con el SEM para determinar la naturaleza de dicha fase (Fig. 109).

Commented [CGGV53]: Fíjate que es necesario incluir, después de ese punto y aparte, las características del equipo utilizado y las variables que se manejan para los tipos de análisis (SEM, EDS), así como los tipos de estándares utilizados. Es necesario que le preguntes esto a Noemí, porque veo que incluíste todos los datos que se generaron en la microsonda

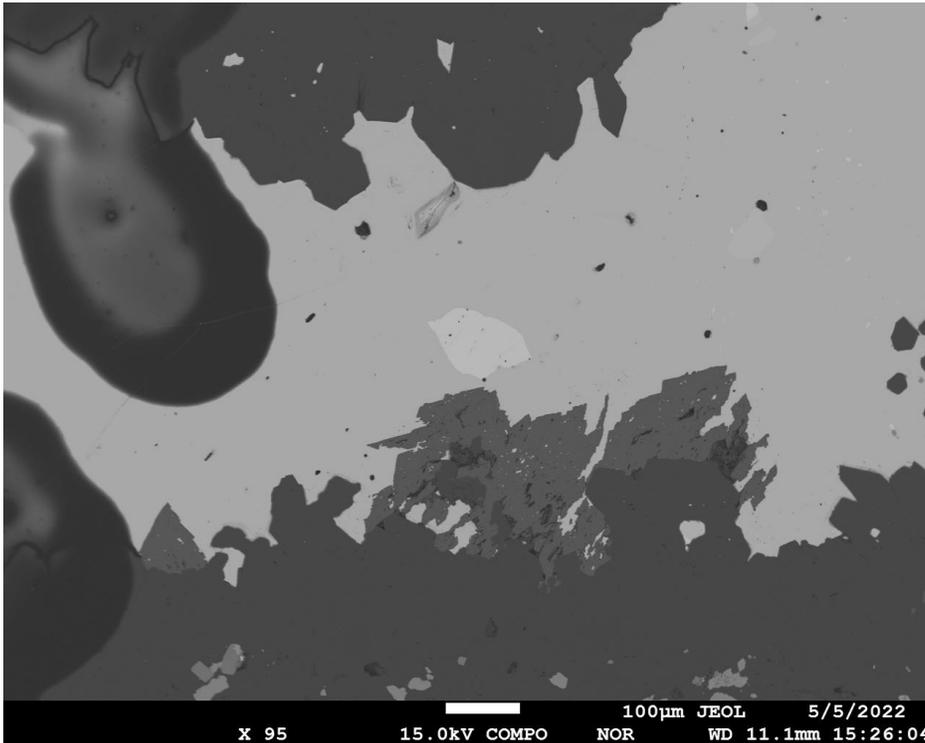


Fig. 108. Se observa una inclusión de una fase más clara en una cristalización de pirargirita. Dicha fase es el objetivo del estudio en este campo.

Con base en el análisis rápido de espectroscopía de energía dispersiva (*EDS*) realizado para estimar la composición, se obtuvieron respuestas concordantes con la presencia de Pb, S, Ag y Sb (Fig. 109). Las cantidades aparentes de cada uno de estos elementos permitieron determinar que se trata de una cristalización de miargirita (AgSbS_2). Este mineral es una fase de menor temperatura y de menor contenido de Ag, cuya presencia otorga indicios de que el lugar de procedencia de la muestra se aproxima al límite termodinámico de estabilidad de la pirargirita.

Commented [CGGV54]: Lo ideal es presentar un diagrama de fases. Pero ya no hay tiempo!!

001

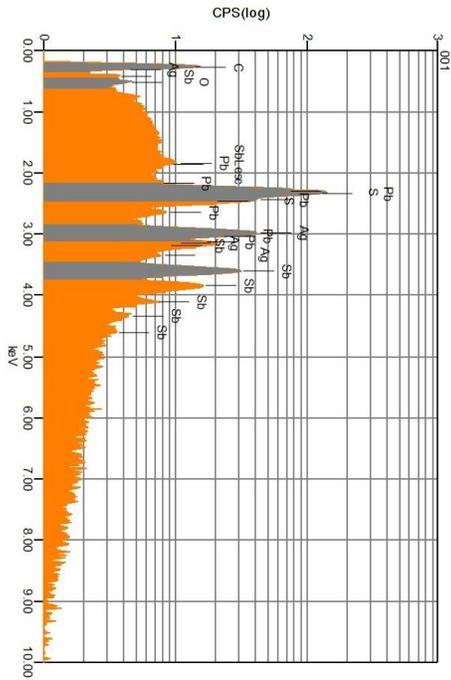
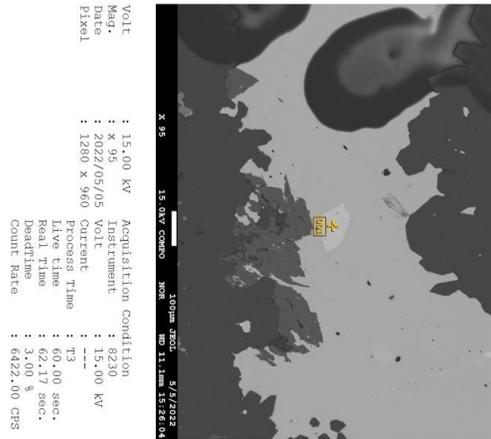
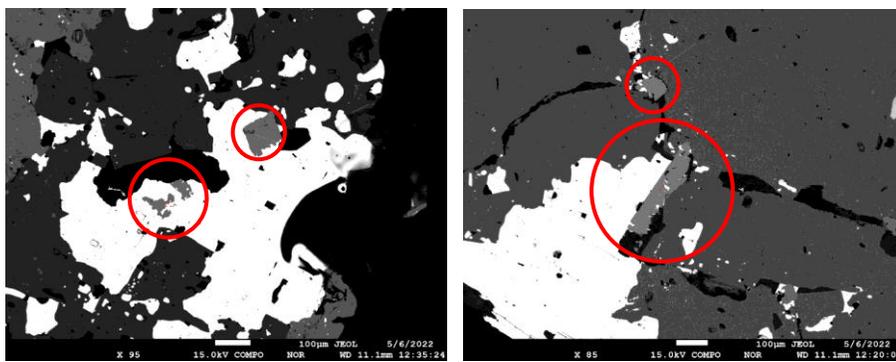


Fig. 110. Análisis rápido EDS a la muestra 3513, en la fase más clara. Se determina que corresponde con miargirita.

Muestra 1892, zona de minas del Cerro Proaño

En la muestra 1892, se observó un intercrecimiento de pirita con cuarzo y galena, una fase que cristalizó en los límites de dichos sulfuros. Dicha fase se observó como un mineral más claro que la misma pirita y es el objetivo del análisis en dos campos de la muestra (Figs. 111 y 112).



Figs. 111 y 112. Se observa en un tono gris medio, señalada con los círculos rojos, a la fase desconocida cuya naturaleza es el objetivo del análisis en estos campos. A la derecha el campo 3 y a la izquierda el campo 1.

En ambos campos, se realizó tanto un análisis rápido EDS, como un análisis cuantitativo con la técnica microsonda WDS (*análisis de rayos X por dispersión de longitud de onda*) de mayor precisión y confiabilidad. * Ambos análisis arrojaron una clara respuesta correspondiente con la presencia de As, Fe y S en dicha fase (Figs. 113 a 116), evidenciando de forma muy clara que se trata de arsenopirita, asociada a la etapa primaria de mineralización de sulfuros.

**La confiabilidad del análisis rápido EDS es menor, ya que determina los elementos presentes con base en respuestas de ondas electromagnéticas, en Rayos X. En dicho análisis, las respuestas son susceptibles de provocar, entre ellas, interferencia constructiva, generando picos de mayor amplitud que corresponden simplemente con dicha interferencia y no con algún elemento detectado, pero que el equipo puede interpretar como algún elemento en específico (com. personal, Fis. Naomi Salazar, Instituto de Geofísica de la UNAM, Campus Morelia, 2022).*

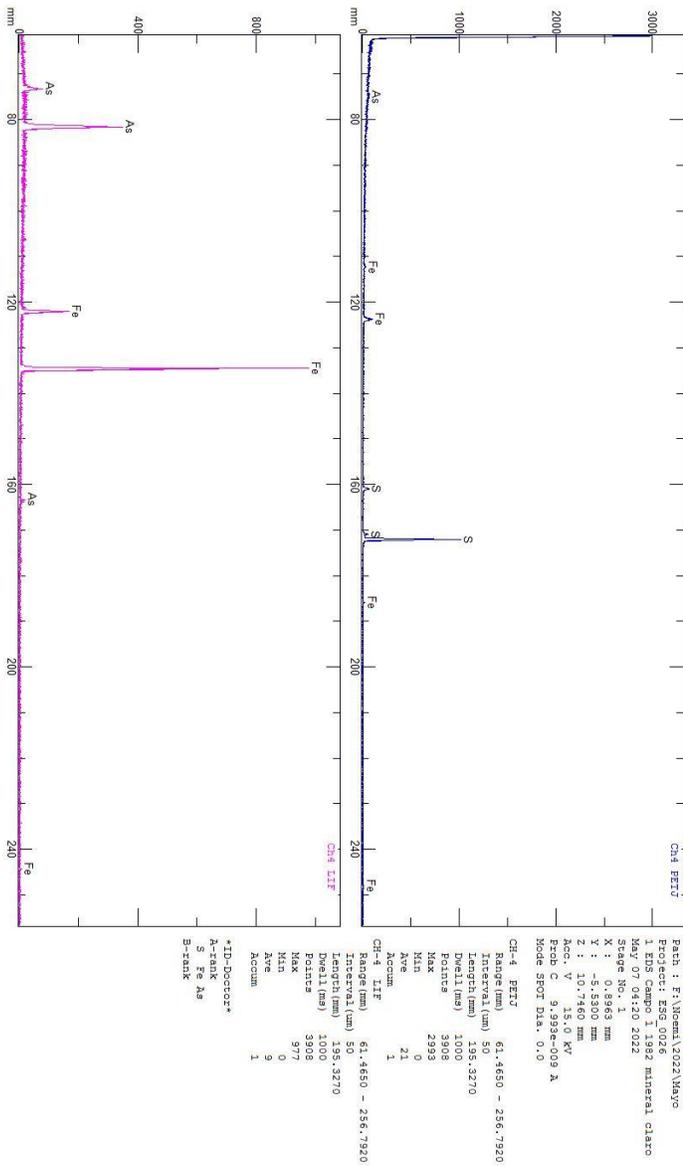


Fig. 114. Análisis cuantitativo WDS, realizado a la muestra 1892 en el campo 1. Se observa bajo la leyenda *ID Doctor* que el equipo determinó la presencia de Fe, As y S.

Commented [CGGV55]: Rafa: Y en dónde están entonces los datos cuantitativos??? Hay que preguntarle a Noemí, porque se supone que se trata de datos más precisos y confiables que los obtenidos en el EDS!! Ella debió habérselos proporcionado

002

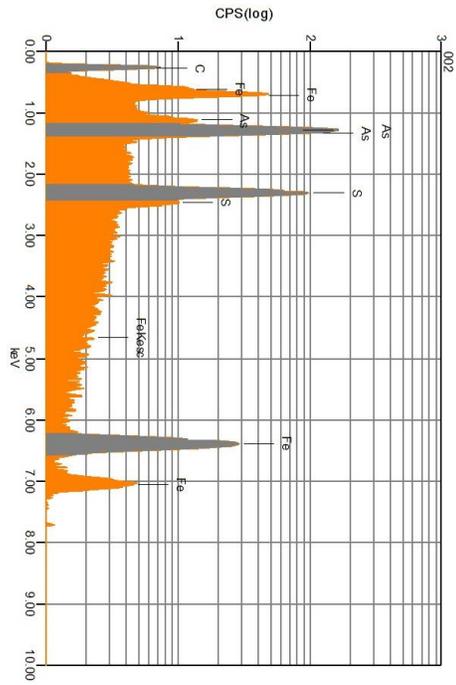
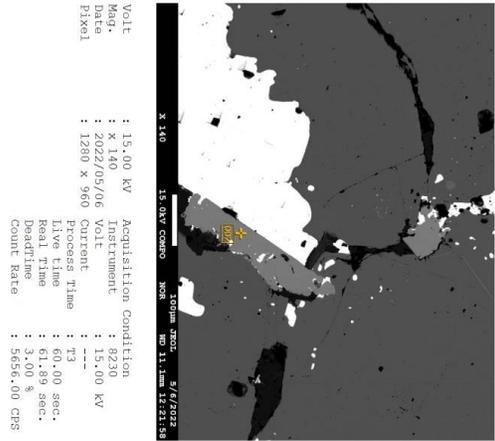


Fig. 115. Análisis rápido EDS, a la muestra 1892 en el campo 3. Se observa la presencia de Fe, As y S.

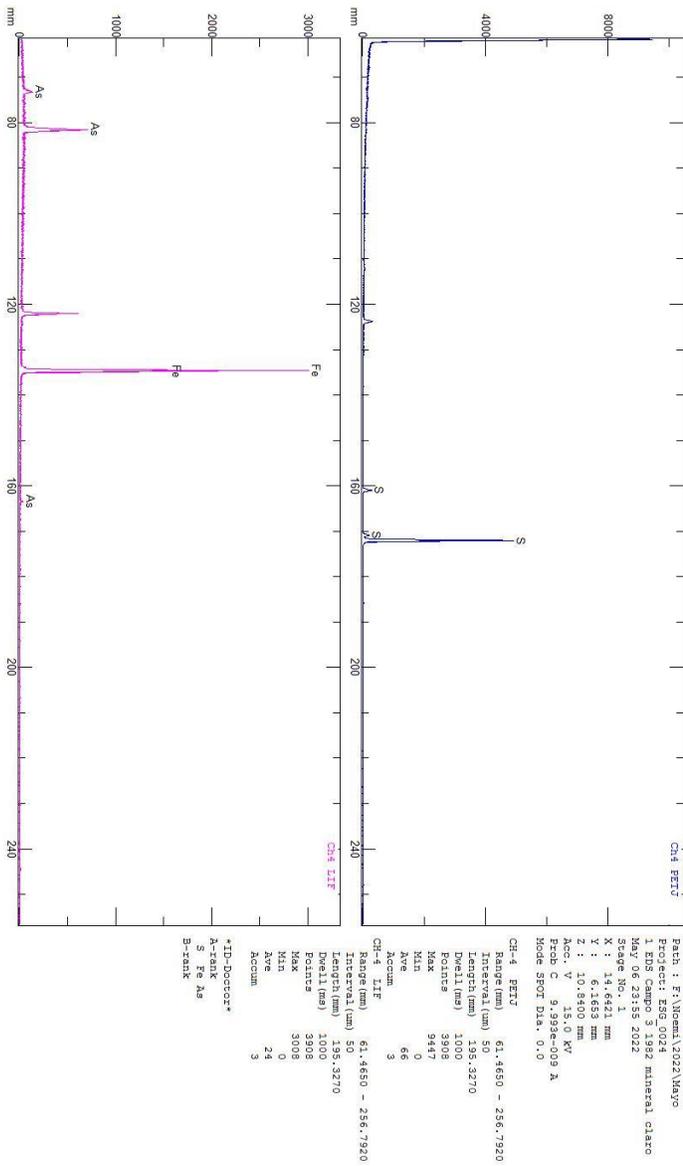


Fig. 116. Análisis cuantitativo WDS realizada a la muestra 1892 en el mineral desconocido, en el campo 3. La función *ID Doctor* determina Fe, As y S.

Muestra 141, zona de minas del Cerro Proaño

Para la muestra 141, también proveniente de la zona de minas del Cerro Proaño, se observó en la minerografía una fase parduzca, no identificada. Aquí, el objetivo del análisis EDS es determinar la naturaleza de ese mineral (Fig. 117).

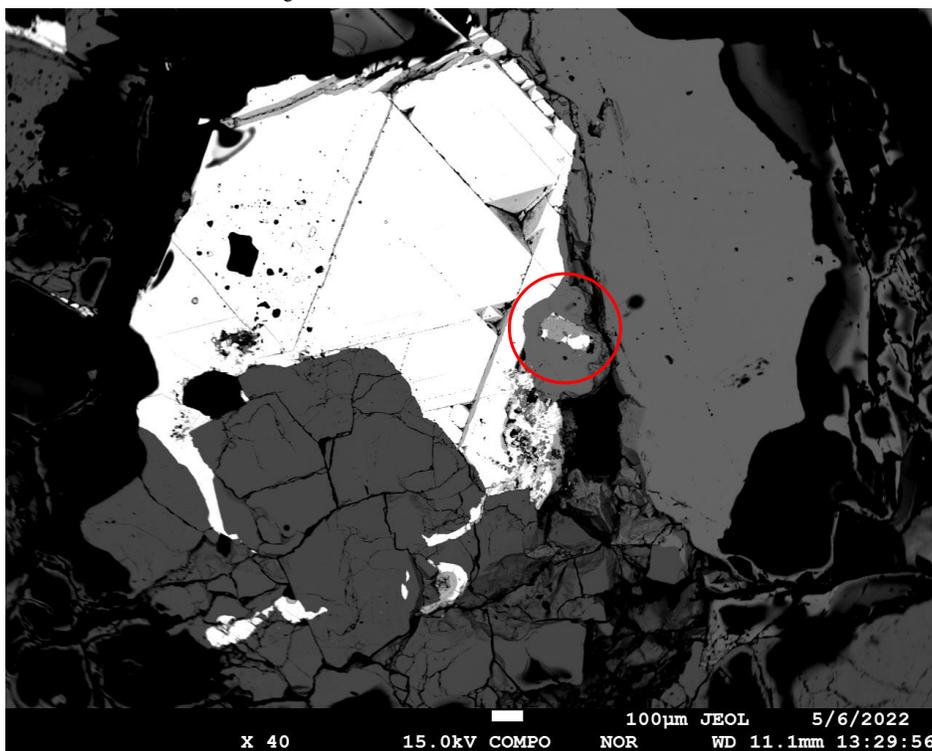


Fig. 117. Fotografía realizada a la muestra 141. En el círculo se observa la fase desconocida, vista por el SEM.

El análisis rápido EDS arrojó respuestas que detectan la presencia de S, Ag, Sb, Cu y Fe (Fig. 118). El sulfoantimoniuro de Cu y Fe deducido se aproxima a la composición de la tetraedrita. Los valores de plata necesitan ser medidos con precisión. En función de dichos valores, se podría determinar si se trata de argentotetraedrita o freibergita, fase que no está descrita en la mayoría de la literatura correspondiente al distrito minero de Fresnillo.

002

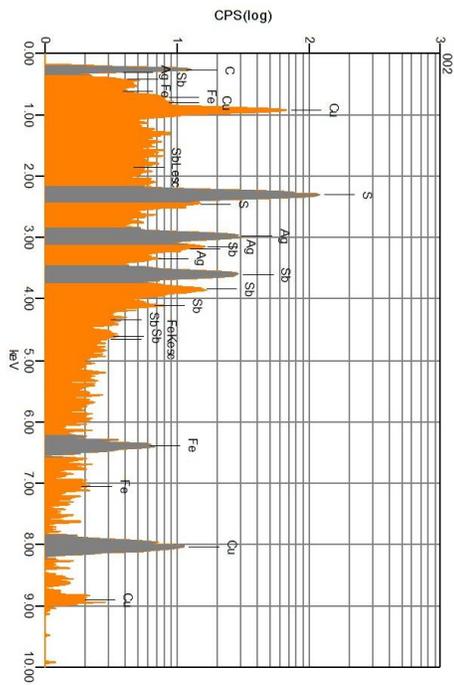
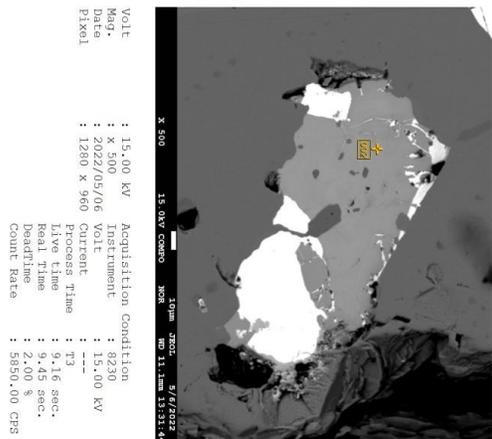


Fig. 118. Análisis rápido EDS a la muestra 141, en el mineral parduzco. Se observa una clara respuesta correspondiente con Cu, Fe, Sb y S, con presencia de Ag.

Otros datos de interés

De los análisis cuantitativos WDS que están en curso, se han medido varios elementos en cantidades traza en las muestras. Se presenta el avance realizado hasta la fecha, correspondiente con los análisis que han arrojado datos relevantes. Esta etapa del trabajo será continuada en futuras investigaciones, pero se incluye aquí para enriquecer a las descripciones y análisis ya realizados.

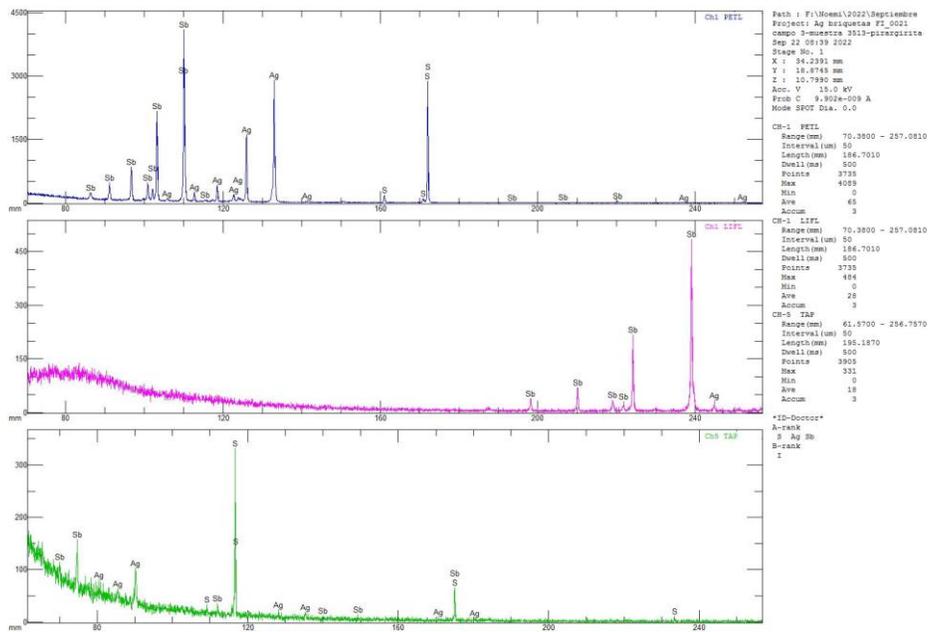


Fig. 119. Análisis WDS realizado a la muestra 3513, proveniente de la zona de minas del Cerro Proaño. Llama la atención la presencia de yodo.

Commented [CGGV56]: Igualmente aquí. Los datos cuantitativos?? Where??

En la muestra 3513 se determina la presencia, en cantidades traza, de yodo (Fig. 119). Esto puede indicar, dentro del contexto del distrito minero, baja temperatura.

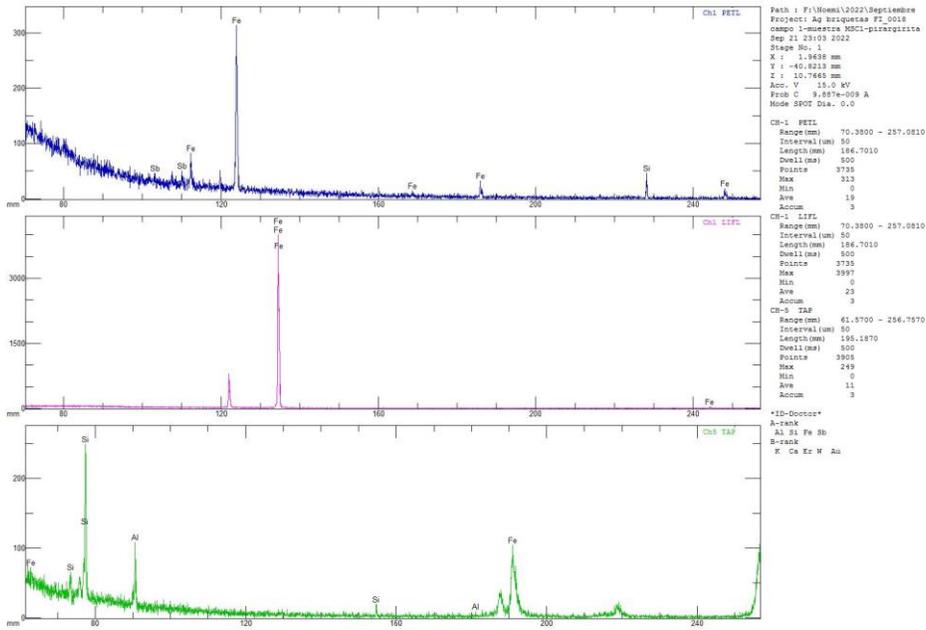


Fig. 120. Análisis cuantitativo WDS realizado a la muestra MSC-1, de reciente obtención, en la veta San Carlos, a mayor distancia y profundidad del Cerro Proaño. Llama la atención la presencia de Er, W y Au que el equipo detecta, en cantidades traza.

El análisis en microsonda en la muestra reciente de la veta San Carlos, se realizó en un mineral de ganga asociado a pirargirita. Es evidente que el análisis cuantitativo WDS detecta la presencia de elementos no observados en todos los análisis previos realizados a las muestras más cercanas o correspondientes al Cerro Proaño. Dada la mineralogía del distrito minero, la anómala presencia de erbio y de tungsteno llama especialmente la atención, así como los valores de Au detectados, que revelan un gran potencial a profundidad por este elemento (Fig. 120).

Commented [CGGV57]: Surge la obvia observación: Si el análisis se llevó a cabo en pirargirita, en dónde están los valores de Ag, Sb y S??? Dudo que el análisis se haya llevado a cabo en la sulfosal y entonces el punto recayó en la ganga. Esto hay que aclararlo antes de publicar la tesis!!! Y el análisis rápido EDS en dónde está?? Lo único interesante sería el Au y eso con reservas, dado el resultado obtenido

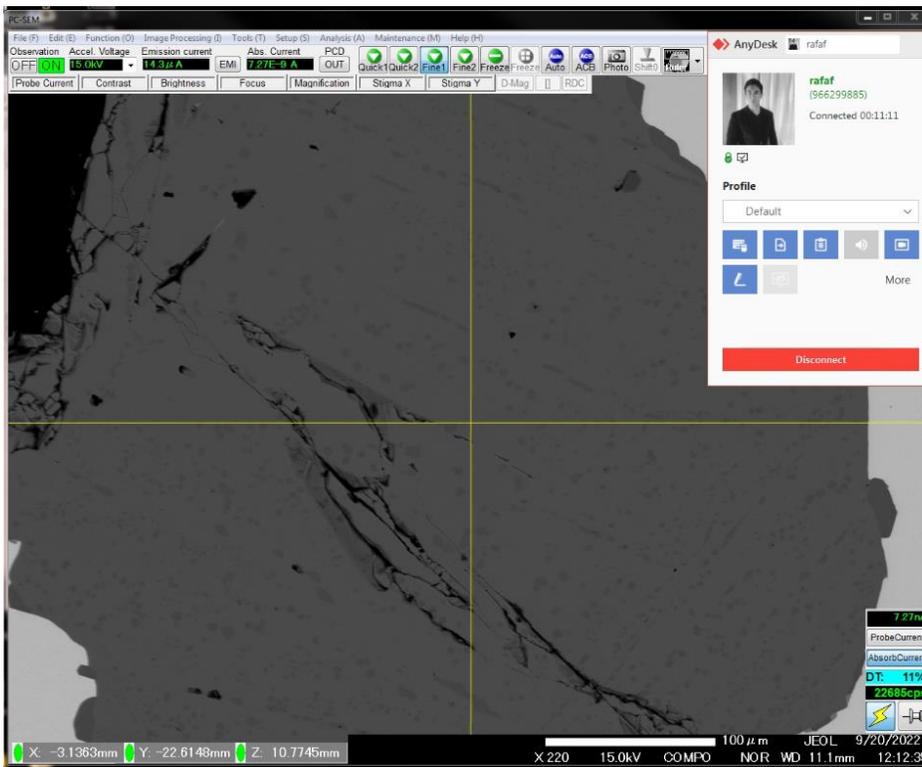


Fig. 121. Se observan las manchas más oscuras en la cristalización gruesa de esfalerita, correspondiente con la muestra 141, del Cerro Proaño. Dicha esfalerita luce lisa en el análisis minerográfico.

Durante los análisis preliminares a las muestras de esfalerita, en la muestra 141, el Laboratorio de Microanálisis del Instituto de Geofísica reportó composiciones que constan, casi exclusivamente, de Fe y S, en ausencia de Zn. Al barrer la muestra, inspeccionando la esfalerita se observan manchas, que asemejan *motitas*, a lo largo de toda la cristalización. Se determina que el análisis preliminar cayó en uno de esos puntos, y que esas fases que no fueron vistas previamente en la minerografía constan de pirrotita, exsuelta a partir de la esfalerita, acusando una sobresaturación de Fe al cristalizar la esfalerita y precipitación a mayor profundidad.

Commented [CGGV58]: Solo es sucesión!

4.5. Paragénesis y Sucesión

Tomando por hecho la procedencia de las muestras estudiadas, con base en los registros de la colección “*Andrés Manuel del Río*”, es posible inferir una paragénesis característica de las zonas de explotación de metales base y plata del distrito minero de Fresnillo.

La sucesión reconocida en las muestras sigue, a grandes rasgos, la siguiente tendencia:

Mineralización Primaria	Mineralización Tardía	Oxidación y Enriquecimiento Supergénico
Cuarzo	Cuarzo	Óxidos de Hierro
Pirita	Pirita	Óxidos de Manganeseo
Esfalerita	Calcita	Probable mimetita
Calcopirita	Pirargirita	Hemimorfita
Galena	Miargirita	Calcoaurita
Pirargirita		
Minerales arcillosos		
Clorita y/o Epidota		

Fig. 122. Resumen de los minerales observados y etapas de mineralización.

Cabe hacer notar que la mineralogía manifiesta variaciones de muestra en muestra, probablemente en función de la profundidad y distancia a la fuente desde donde fueron colectadas. En algunas zonas, la mena más importante es la pirargirita y acantita. En otras, cobran relevancia los metales base, siendo observados en minerales como la galena, esfalerita y, en menor medida, el cobre en minerales como la calcopirita, azurita y la calcoaurita.

Dichas diferencias llegan a mostrar traslape, es decir, se pueden observar minerales de metales base y plata en una misma muestra. Esto es un posible indicador de la profundidad, correspondiendo con una zona intermedia, entre la de metales base y metales preciosos (de zonas más someras de baja sulfuración a más profundas de sulfuración intermedia).

Está claro que el cuarzo se mantuvo como un mineral constante durante la gran mayoría del periodo de mineralización, acompañando a asociaciones de sulfuros y sulfosales en las etapas principales de formación de la mena y, posteriormente, a una etapa de carbonatos. Los sulfuros y sulfosales están comúnmente asociados, formando intercrecimientos.

Con base en las observaciones realizadas en las muestras, y tomando en cuenta que la gran mayoría de las muestras que fueron analizadas son de naturaleza histórica y procedentes de la zona de minas del Cerro Proaño, veta Andrea y veta San Carlos, se propone la siguiente paragénesis y sucesión:

1. Se da una etapa primaria de mineralización, principalmente de sulfuros de metales base y cuarzo. Se observaron muchas asociaciones pirita-esfalerita, en proporciones muy similares ambos minerales, en las muestras de las tres zonas estudiadas. En la misma etapa se forma galena, que fue observada en menor abundancia pero siempre asociada a pirita y esfalerita. Asimismo, en estas últimas asociaciones se identificó también la presencia de arsenopirita. Al final de esta etapa, en algunos puntos específicos, se reconoce pirargirita, que se observó en muchos casos asociada a otros sulfuros de metales base y también a cuarzo.
2. En las etapas tardías del proceso de mineralización se manifiesta la alteración de sulfuros a carbonatos. En esta etapa sigue presente el cuarzo. También se observan algunos silicatos, generados por la alteración de dichos sulfuros de metales base, como la hemimorfita. Asociado a este cuarzo, también se llegó a observar pirargirita, probablemente debida a una oxidación y enriquecimiento supergénico. Sustenta esta teoría la apariencia corroída y los halos rojizos de oxidación observados en la pirargirita en esta etapa. Esto tiene congruencia con minerales que requieren un ambiente oxidante para formarse, aspecto que se evidencia *aún más* en la siguiente etapa.
3. Etapa de oxidación. Se observaron algunos sulfuros y carbonatos recubiertos de óxidos de hierro y -en una muestra- plomo (masicot), así como muestras constituidas en su totalidad de óxidos (hematita, romanechita). Esto es más notorio en las menas someras, correspondientes con el Cerro Proaño. Es, seguramente, proveniente de las porciones más someras del *stockwork* oxidado reportado ampliamente en la literatura general del distrito (De Cserna, 1976; Ruvalcaba-Ruiz, 1988).

Es razonable atribuir las últimas dos etapas aquí mencionadas a procesos de oxidación.

La muestra de la veta Andrea (Fig. 126) exhibe la asociación de sulfuros y sulfosales descrita en la primera etapa (esfalerita, galena, pirita, pirargirita). Es importante notar que las cristalizaciones de pirargirita observadas en la minerografía son gruesas, con bordes bien definidos y corresponde con la principal etapa de mineralización ya que dichas cristalizaciones han sido observadas asociadas a pirita, esfalerita y galena.

Commented [CGGV59]: Nota que todos los párrafos que estoy quitando sale sobrando la idea, es repetitivo aunque lo digas de otra forma, la idea original es lo que vale y no tienes porqué repetirla

Commented [CGGV60]: El hecho que la pirargirita existe en cristalizaciones gruesas y con bordes definidos NO implica que sea de esa etapa

Commented [CGGV61]: Es mejor que onitas el término bulk, eso crea confusión, mejor trátalo como principal episodio de mineralización

La muestra de la veta San Carlos (Fig. 125) contiene bandas de cuarzo con pirargirita presente en los límites entre banda y banda. La pirargirita que es coextensiva con silicificación y carbonatación se observa en forma de cristales anedrales, fuertemente dependientes del bandeamiento del cuarzo, con bordes muy corroídos y dejando impregnaciones rojizas hacia los bordes, sugiriendo el inicio de procesos de oxidación.

La paragénesis y sucesión reconocidas en las muestras correspondientes al Cerro Proaño se sintetizan en la Figura 123.

Commented [CGGV62]: En el microscopio mineralógico no es posible determinar minerales translúcidos o transparentes, solamente minerales opacos

Commented [CGGV63]: Fíjate que es muy difícil distinguir una pirargirita formada por enriquecimiento supergénico. Mejor déjalo como pirargirita con algo de oxidación

Commented [CGGV64]: OJO: esto va en sucesión!

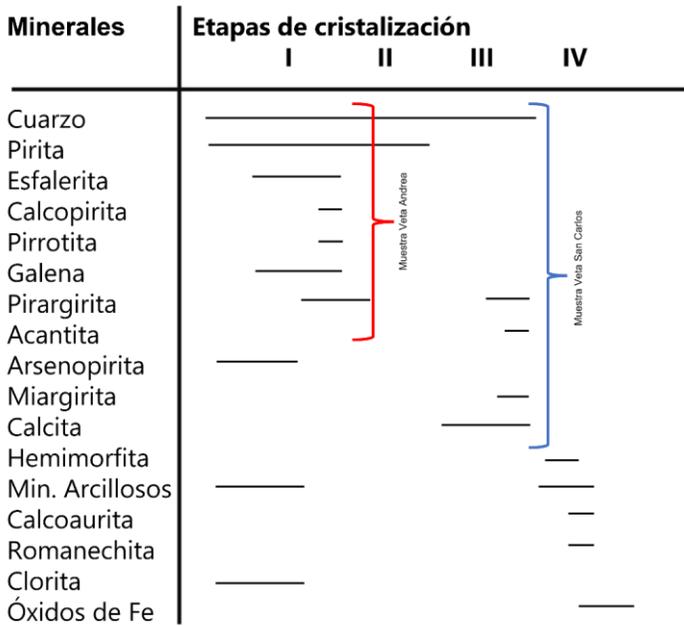


Fig. 123. Paragénesis y sucesión propuestas de los estudios químicos-mineralógicos de este trabajo. Entre la llave roja, los minerales observados en la muestra de la veta Andrea. En la llave azul, los minerales observados en la muestra del filón San Carlos.

Commented [CGGV65]: No haces referencia de dónde tomaste este diagrama como base, o es de tu propia cosecha. No ubicas igualmente en un contorno, la paragénesis reconocida en Proaño. Ubicas la pirargirita de San Carlos en la fase III, pero según me has comentado ahí también hay sulfuros de metales base. Esta veta es la de mayor profundidad. Y luego???. La miargirita quizá sea más tardía que la pirargirita, ahí la ubicas como contemporánea a ella (lamentablemente, ya no hay tiempo para exponer un diagrama de fases)

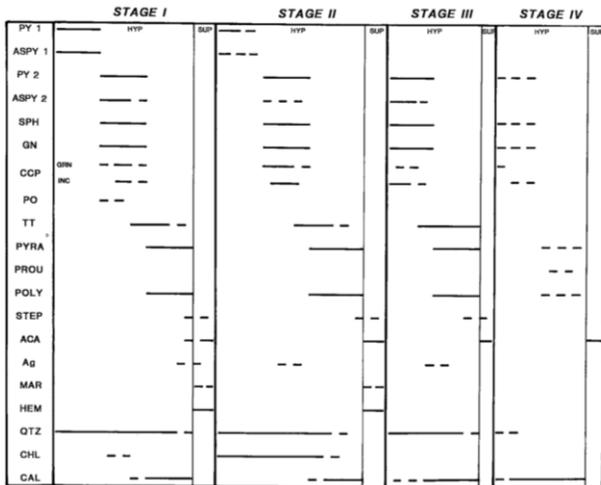


Fig. 124. Paragénesis y sucesión propuestas por Gemmell, et. al. en un trabajo dedicado a la veta Santo Niño, 1988. Los minerales corresponden con: py=pirita, aspy=arsenopirita, sph=esfalerita, gn=galena, ccp=calcopirita, po=pirrotita, tt=tetraedrita, pyra=pirargirita, prou=proustita, poly=polibasita, step=estefanita, aca=acantita, Ag=plata nativa, Mar=marcasita, Hem=hematita, Qtz=cuarzo, Chl=clorita, Cal=calcita.

Commented [CGGV66]: Es muy evidente que este trabajo es de mucho detalle, pero no haces referencia a la o las estructuras mineralizadas que Gemmell estudió. Debes de hacer referencia a ello.

En la Fig. 124, se constata la paragénesis y sucesión descrita por Gemmell (1988), en la que se detallan 4 estados o etapas de mineralización. La ausencia de los óxidos en el trabajo de Gemmell (1988), entre otros contrastes, se explica por la simple razón de que en este trabajo se contó con muestras históricas provenientes del stockwork oxidado del Cerro Proaño, colectadas en la última mitad del siglo XIX.

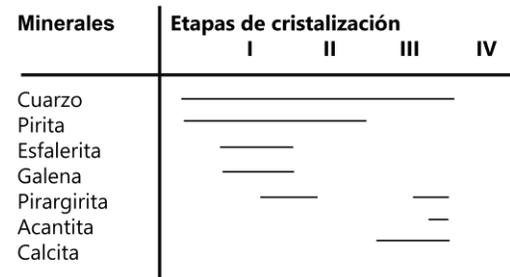


Fig. 125. Paragénesis y sucesión correspondiente a la veta San Carlos, diagrama elaborado a partir de la muestra MSC-1 y la mineralogía descrita en el reporte de Vallejo, *Cía. Fresnillo*.

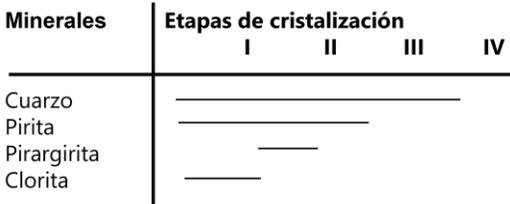


Fig. 126. Paragénesis y sucesión observada en la muestra MSR-1, correspondiente con la veta Andrea.

PERSPECTIVAS E IMPLICACIONES EN LA EXPLORACIÓN

Capítulo 5

Commented [CGGV67]: Falta exponer ideas que formen la parte esencial de este capítulo. Observa tus objetivos. Las conclusiones y recomendaciones siempre se consideran en un capítulo aparte. Habrá que responder algunas preguntas (no las incluyas en el texto) básicas como:
¿Qué implicaciones en la exploración surgen o se derivan de tus estudios mineralógicos?
¿Qué contrastes se reconocen en la Mineralogía de la zona de Proaño con las zonas recientes?
¿En qué zonas o minas se reconocen los intrusivos cuarzomonzoníticos y granodioríticos? ¿Cuál es su posición con respecto a Proaño y a las zonas recientes? Te comentaron en la mina los geólogos que probablemente se tenga un gran stock sepultado hacia la parte sur del distrito ¿Qué te dice o sugiere la mineralogía que has reconocido, respecto a dicha hipótesis?
Es importante que a partir de la literatura que ya tienes, juntamente con tus estudios mineralógicos, puedas responder también a la pregunta, emitiendo sugerencias lógicas: ¿Existe una tendencia a nivel distrito minero de la distribución y potencialidad metálica?
Para que te refieras de lo general a lo particular, te sugiero que primero abordes el tema de los intrusivos en Fresnillo. Has una descripción de su ubicación con respecto a la ubicación de tus muestras. En la literatura haz un breve análisis de las paragénesis y sucesión de los mismos puntos estratégicos: Proaño, San Carlos, Andrea o de otros cercanos que consideres de interés, como lo puede ser la veta Santo Niño. Hasta donde sea posible haz un análisis comparativo de tus datos mineralógicos con los datos que investigues. El asunto es que reconozcas alguna tendencia(s) que seguramente hay detrás de los datos, cuando se conjunen tus propios datos con los existentes en la literatura.

5.1. Contrastes a nivel de distrito minero

El principal objetivo del presente trabajo fue reconocer, en los minerales de diferentes zonas del distrito minero de Fresnillo, tendencias químico-mineralógicas que puedan dar indicios de potencialidad e, inclusive, la dirección de la misma. Con base en las descripciones y en el avance de los análisis, algunas tendencias a nivel de distrito minero ya son reconocibles:

- Los minerales de oxidación se concentran en la zona de minas del Cerro Proaño. En algunos trabajos consultados, ni siquiera son mencionados como parte de la paragénesis. Gracias a la colección mineralógica *Andrés Manuel del Río* se describieron muestras que sólo pudieron provenir de este importante sector.
- La pirargirita es la principal mena de plata del distrito minero de Fresnillo. En varios trabajos fueron descritos minerales como la polibasita, la matildita, y la estefanita; sin embargo, la presencia de estas fases tiene limitada representación de la mineralización económica a nivel de distrito minero.
- En la zona cercana al Cerro Proaño, la pirargirita se muestra como cristalizaciones gruesas, asociadas a la etapa de depósito en *bulk* de sulfuros de metales base y cuarzo. En la muestra más lejana al Cerro Proaño, proveniente de la veta San Carlos, nivel 840, la pirargirita está presente como una fase asociada a cuarzo y calcita. Esta distinta etapa también es evidenciada por la diferente textura exhibida en la muestra; la pirargirita aparece con bordes muy corroídos e impregnaciones rojizas hacia el cuarzo que le rodea, lo que evidencia un incipiente proceso de oxidación.
- La identificación de miargirita ocurre en una muestra correspondiente con el Cerro Proaño. La miargirita aparece incluida en una cristalización gruesa de pirargirita, mientras que no aparece en la pirargirita de la veta Andrea ni en aquella correspondiente con la veta San Carlos. Esto sugiere, en general, que el ejemplar fue colectado en una zona de menor temperatura en el sector del Cerro Proaño.

5.2. Implicaciones y perspectivas en la exploración

La producción de Fresnillo provino, durante mucho tiempo, directamente de la zona de minas del Cerro Proaño. Es aquí donde vetas hidrotermales y un complejo *stockwork* oxidado afloraban directo, desde la profundidad reconocida en ese tiempo. De Cserna (1976) reportó, en las cercanías de Proaño, la existencia de un cuerpo intrusivo, de composición cuarzomonzonítica (Fig. 127).

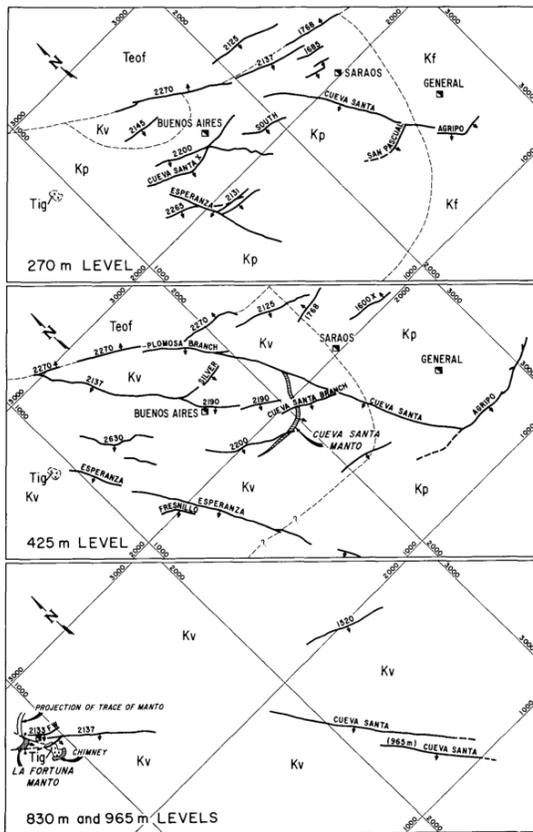


Fig. 127. Mapa de las principales vetas. Tig corresponde con el stock cuarzomonzonítico, cortado por las vistas en planta en los niveles 270, 425 y 830. Tomado de De Cserna, 1976.

Es muy importante notar la relación espacial entre los cuerpos mineralizados de la zona de minas del Cerro Proaño y el cuerpo intrusivo cuarzomonzonítico. De Cserna (1976) inclusive relaciona genéticamente a los cuerpos de reemplazamiento (mantos) con los intrusivos en la mina de Fresnillo. Es lógico pensar que los dos cuerpos intrusivos reconocidos funcionaron como fuentes de energía y como proveedores de materia mineral para los fluidos hidrotermales. Es entonces, que las fallas y fracturas actuaron como controles estructurales, guiando a los fluidos a través de los mismos.

Es aquí que la geología estructural juega un rol importante.

El Cerro Proaño está descrito como un pliegue anticlinal de flancos de bajo ángulo (De Cserna, 1976), cuya charnela está basculada y, por ende, las unidades estratigráficas que afloran en Proaño se van sepultando a mayor profundidad hacia el sur. Es por este motivo, entre otros, que la mineralización va apareciendo a mayor profundidad, conforme la lejanía a Proaño aumenta.

Este dato es importante, ya que la búsqueda de nuevas estructuras mineralizadas debe seguir a las unidades que puedan hospedar a la mineralización; la mena es principalmente albergada en el Grupo Proaño. Si dichas litologías se sepultan más con la distancia, los cuerpos mineralizados también deberían hacerlo. Dicho con otras palabras, **con la distancia al Cerro Proaño, también cabrá esperar que las estructuras mineralizadas estén cada vez más sepultadas.**

Si se toma como base en la exploración el llamado Grupo Proaño, también implicaría alejarse de los cuerpos ígneos intrusivos reconocidos en dicho sector. No obstante, la presencia de miargirita en muestras provenientes de Proaño, así como valores traza detectados de yodo en el análisis químico cuantitativo realizado para el presente trabajo sugieren que, en general, la mineralización explotada en la segunda mitad del siglo XIX en el Cerro Proaño corresponde con fases de menor temperatura, concordante con la mayor lejanía a la fuente de la mineralización. Desde el punto de vista del gradiente paleogeotérmico, la variabilidad química y contenidos de elementos traza en la estructura cristalina de la esfalerita pueden revelar, no solamente potencial metálico, sino condiciones de presión (profundidad) y temperatura.

Las esfaleritas estudiadas mostraron una importante diferencia textural; **algunas de ellas presentan exsolución de calcopirita, mientras que otras manifiestan exsolución de pirrotita.** Dichas texturas revelan condiciones termoquímicas distintas en el fluido mineralizante; la esfalerita con exsolución de calcopirita evidencia que, en algún momento, la esfalerita tenía la temperatura necesaria para tener asimilados valores de Cu, incompatibles con su estructura cristalina (de la esfalerita) al descender la temperatura. Este fenómeno puede sugerir en sí mismo, que el fluido mineralizante pudo evolucionar hasta la precipitación de todas las fases necesarias para llegar al equilibrio.

La esfalerita con patrones punteados de pirrotita acusa sobresaturación de Fe en el fluido mineralizante, al grado de exceder al porcentaje de Fe que la esfalerita puede retener en su estructura cristalina. Estos datos, entre otros de naturaleza química-mineralógica podrían contribuir a proponer un vector que señale hacia dónde se hallan las zonas de mayor temperatura y, por ende, la fuente de metales.

Los distintos elementos reveladores, encontrados en cantidades traza, sólo en la muestra más distante del Cerro Proaño (análisis WDS) que pertenece a la veta San Carlos, evidencian que la mineralización ocurrida en ese sector, manifiesta la presencia de elementos químicos no observados en ninguna otra muestra, lo que sugiere una menor distancia a la fuente que produjo la anomalía geotérmica.

Esta hipótesis es reforzada por la ausencia de la miargirita, fase de menor temperatura, tanto en la muestra de la veta San Carlos como en Andrea. Ambos aspectos indican que hay un incremento de la temperatura hacia el filón San Carlos. Es importante notar que en dirección de ese vector (dirección hacia el S, desde Proaño), también se encuentra la unidad minera Saucito, que explota algunas otras estructuras análogas a las vetas de la unidad minera Fresnillo.

La conjunción de estas observaciones sugieren que el potencial se localiza en dirección hacia el sur desde el Cerro Proaño, y aumentando la profundidad junto con la distancia (Fig. 128).

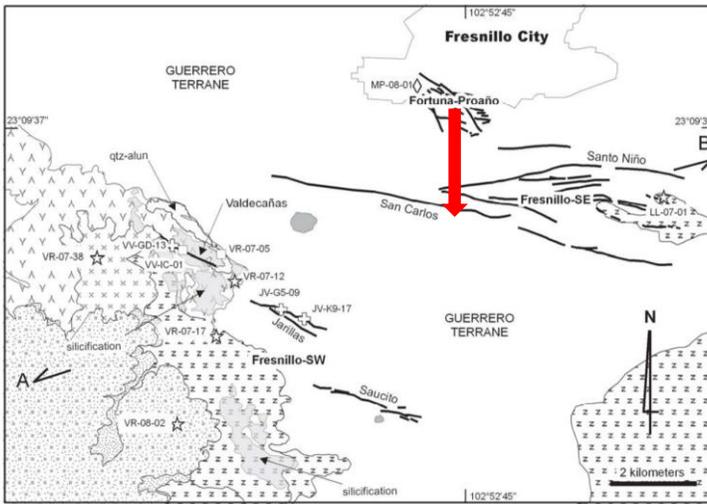


Fig. 128. Mapa geológico del distrito minero de Fresnillo. Se observan las estructuras mineralizadas de Fresnillo y de la Unidad minera Saucito. Se señala con la flecha roja la dirección del incremento del potencial metálico. Mapa tomado de Velador et. al. (2010).

Es poco razonable pensar que todas las estructuras, inclusive las más lejanas como San Carlos o las mismas vetas en producción de la unidad minera Saucito, fueron alimentadas por el dique y el stock cuarzomonzonítico descrito cerca de las inmediaciones del Cerro Proaño (De Cserna, 1976).

Como consecuencia de las observaciones y análisis de este trabajo, **se considera la probable existencia de un cuerpo intrusivo sepultado, de mayores dimensiones, que es lejano al Cerro Proaño y menos lejano a la veta San Carlos. Este cuerpo podría ser el responsable de la mineralización en el distrito minero de Fresnillo, desde la Unidad Minera Fresnillo, Saucito y hasta Plateros.**

Hay que recordar que, en un contexto geológico mayor, la zona mineralizada se encuentra en el límite suroriental de la mayor LIP (Gran Provincia Ígnea) en el mundo correspondiente con el Cenozoico (Ferrari, et al. 2007). Cuerpos plutónicos batolíticos son la generalidad en la gran mayoría del margen occidental de la República Mexicana, desde la Baja California hasta el estado de Guerrero. Sin embargo, como se ha sugerido, la actividad magmática somera constituyó un factor fundamental en la edificación de los sistemas de filones de plata y oro, principalmente observados en la parte sur del distrito de Fresnillo.

Bajo esta propuesta, **el dique y el stock cuarzomonzonítico observados y descritos en la mina Proaño (De Cserna, 1976), además de ser tomados como fuentes principales de calor y materia mineral en ese sector, son también considerados como síntomas de la existencia de un gran cuerpo intrusivo sepultado.**

Casi medio milenio de historia de producción de plata demuestra el potencial contenido en el distrito minero de Fresnillo. De ser verdadera la hipótesis, la existencia del cuerpo ígneo sepultado podría implicar la presencia de otros tipos de mineralizaciones (por ejemplo, mineralizaciones de Cu-Au y cuerpos con Au diseminado en chimeneas, mineralizaciones en skarn y hornfels, vetas polimetálicas con Ag y Au y en zonas más someras, sistemas de vetas de Ag de alto potencial con importantes valores de Au, similares a las reconocidas al sur del distrito de Fresnillo), pudiendo implicar un aumento en las reservas de mineral y un proyecto minero nacional sin precedentes.

En la unidad minera Fresnillo ya se ha pensado en la teoría del intrusivo sepultado, inclusive se tiene conocimiento de que ya se realizó una barrenación, de aproximadamente 400 metros, con el objetivo de hallar dicho cuerpo (*comunicación personal, Ing. Julián Castro, Fresnillo PLC, 2019*). Sin contar con mayor detalle sobre dicha exploración, se sabe que esta campaña no dio el resultado esperado, como es de suponer, dado el corto alcance de la barrenación.

Commented [CGGV68]: Rafa: 400 metros es muy poca profundidad para comprobar dicho cuerpo

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado del presente trabajo, se han logrado observar algunos patrones y contrastes representativos en el distrito minero de Fresnillo. No obstante, hace falta mucha información acerca de la variabilidad química y mineralógica, a ser evaluada en el contexto geológico del distrito.

Aún se requieren muchos análisis químicos cuantitativos que precisen la presencia y cantidades exactas de elementos *pathfinder*, en menas de distintos puntos de los cuerpos mineralizados, que refuercen o refuten las teorías aquí propuestas.

Otro aspecto por considerar es la representatividad de las muestras respecto a las nuevas zonas de explotación. Es preciso la planificación y desarrollo de una campaña de muestreo sistemático de las diferentes zonas de reciente exploración y explotación.

Con el objetivo de continuar esta línea de trabajo e investigación aplicada, se emiten las siguientes sugerencias y recomendaciones:

- Las estructuras mineralizadas del distrito minero de Fresnillo se formaron por una superposición de episodios tectónicos observables a escala regional (arco continental durante el Cretácico, plegamiento y posterior fallamiento en el límite Mesozoico-Cenozoico y magmatismo durante el Cenozoico). Una gran región de la Sierra Madre Occidental que, debido a dificultades en accesibilidad y a la enorme extensión de dicha provincia, no ha sido explorada (Ferrari, et. al. 2007) puede repetir dichas condiciones, haciendo posible otros yacimientos de similar naturaleza.

Inclusive De Cserna (1976) sugiere que el distrito minero corresponde con una paleobahía de circulación restringida y que la mineralización comenzó desde las primeras etapas de sedimentación.

Se sugiere realizar estudios paleogeográficos en el margen oriental de la Sierra Madre Occidental, en su límite con la Mesa del Altiplano Central Mexicano, buscando condiciones paleogeográficas análogas a las del distrito minero de Fresnillo, juntamente con evaluaciones litogeoquímicas, con el propósito de definir preconcentraciones metálicas vinculadas a episodios vulcano sedimentarios primigenios.

- La estratigrafía regional mostrada en la literatura tiene, definitivamente, puntos importantes que esclarecer, tales como la posición estratigráfica y edad de la formación Chilitos o la posición de la Formación Fresnillo, que comúnmente se muestra en contacto con unidades distintas (de Cserna, 1976; Ruvalcaba-Ruiz, 1988; Albinson, 1988; Velador, 2010). **Se sugiere mapear a detalle todos los contactos visibles en la región y en el interior mina para determinar de manera estricta el orden y temporalidad de todas las unidades litológicas del distrito minero, para así lograr un control estrato estructural más detallado y que sirva de base como guía de mineralización.**
- Los valores de plata son evidentes en varias muestras de alta ley y se llegan a observar asociados a la etapa de cristalización de sulfuros. Su ausencia, cuando solo se observan minerales como la esfalerita y la galena, no es del todo evidente. **Se sugiere realizar análisis químicos mediante microsonda electrónica a la pirita, esfalerita, galena y sulfosales de distintos puntos de los cuerpos mineralizados,** con el propósito de reconocer elementos químicos (*pathfinders*), para conformar guías mineralógicas y geoquímicas de alto impacto en la exploración.
- De ser correcta la hipótesis de un cuerpo intrusivo de mayores dimensiones sepultado, las menas de la unidad minera Saucito al sur de la unidad minera Fresnillo, podrían contener información mineralógica y geoquímica valiosa, que ayude a reforzar la hipótesis y generar un vector más preciso para orientar la exploración. **Se sugiere también realizar estudios mineralógicos y análisis químicos mediante microsonda electrónica a muestras de mena de la unidad minera Saucito.**
- **La existencia de fases no identificadas asociadas a la pirargirita supone una cuestión muy importante a resolver,** pues la composición química de dichas fases puede evidenciar una variabilidad química de gran significado en la exploración y en la génesis de los yacimientos.
- La presencia -o ausencia- de plata y de otros elementos traza incluidos en la estructura cristalina de sulfuros de metales base y sulfosales, todos ellos asociados a

sus correspondientes etapas hidrotermales, representan importantes indicadores potenciales de fenómenos metalogénicos y, por ende, constituyen importantes guías en la exploración. Para estudiar la variabilidad espaciotemporal con más detalle, **se sugiere realizar estudios mineralógicos y químicos cuantitativos, a fin de reconocer la variabilidad química de elementos que no necesariamente forman parte de las fórmulas químicas de los sulfuros** (p. ej. presencia y variabilidad de As en las sulfosales, cantidades de Fe en las esfaleritas o, inclusive, valores de Ag y otros elementos traza en la pirita, galena, entre otras fases). No se excluye el reconocimiento de microinclusiones y nanoinclusiones de oro en pirita, así como microinclusiones de minerales argentíferos en galena y otras fases asociadas.

- **La ausencia de valores de plata en los sulfuros de metales base, juntamente con datos específicos sobre la variabilidad química y mineralógica de minerales de mena y ganga podrían ayudar a definir zonas de los yacimientos con limitadas posibilidades económico-mineras** y así orientar la barrenación hacia los sectores más favorables.
- Estudios de mineralogía avanzada aplicados a la exploración minera, representan una poderosa herramienta en la toma de decisiones en la búsqueda de yacimientos minerales. En las unidades mineras y proyectos de exploración se debería implementar una verdadera cultura mineralógica, tendiente principalmente a la recolección de muestras selectas de los cuerpos mineralizados, para el estudio y evaluación de los significados de las variaciones químico-mineralógicas, con la aplicación de técnicas analíticas avanzadas. **En paralelo a esto se tomarían acciones concretas para preservar el patrimonio mineralógico de México.**
- Las asociaciones mineralógicas más importantes se han reconocido en las muestras estudiadas. Este plan de estudios se puede extrapolar a ejemplares de otros distritos mineros que pertenecen a la colección mineralógica *Andrés Manuel del Río* de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. **La colección contiene información de muchos distritos mineros mexicanos, con potencial interés en la exploración.**

- Es evidente que diversos tipos de análisis químicos cuantitativos no existían en la época de muestreo desde la cual provienen muchos ejemplares mineralógicos. Por tanto, **es posible generar nueva información a partir de muestras de importantes zonas mineralizadas que fueron explotadas a fines del siglo XIX y durante el siglo XX. Se sugiere poner a disposición de la industria minera mexicana, mediante trabajos que contribuyan a la formación de los estudiantes de la Facultad de Ingeniería, toda la información resguardada en la colección mineralógica, correspondiente a los más importantes distritos mineros mexicanos.**

Commented [CGGV69]: Esta recomendación deberá ir al final

Fuentes de Información

Aguilera G., *Inventario de Recursos Minerales de la Carta Mesillas F13-B35 (2012)*, Servicio Geológico Mexicano, México.

Albinson, T., *Geologic Reconstruction of Paleosurfaces in the Sombrerete, Colorada, and Fresnillo Districts, Zacatecas State, Mexico* (1988), *Economic Geology* vol. 83, págs. 1647-1667.

Benton, L. *Composition and Source of the Hydrothermal Fluids of the Santo Niño Vein, Fresnillo, Mexico, as Determined from $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Stable Isotope, and Gas Analyses* (1991). Tesis de Maestría. New Mexico Institute of Mining and Technology. E.E.U.U.

de Cserna Z., *Geology of the Fresnillo area, Zacatecas, Mexico* (1976), Instituto de Geología, UNAM, México.

Ferrari, L. et. al., *Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of the western margin of North America* (2007), *Geological Society of America Special Paper* 422, págs. 1-39, E.E.U.U.

Gemell B. et. al., *Silver Sulfosalts of the Santo Niño vein, Fresnillo District, Zacatecas, Mexico* (1989), *Canadian Mineralogist* vol. 27, Canadá.

Geología Económica de México (2009). Editado por Kenneth F. Clark, Guillermo A. Salas Pizá y Rodolfo Cubillas Estrada. Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C. Servicio Geológico Mexicano. Segunda edición, p.p. 910-916.

International Chronostratigraphic Chart (2022), International Commission on Stratigraphy, IUGS.

Knoph A., *Analysis of Some Recent Geosynclinal Theory* (1960), Departamento de Geología, Universidad de Stanford, E.E.U.U.

Moncada, D. et. al., *Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuto, Mexico: Application to exploration* (2012), Journal of Geochemical Exploration vol. 114, págs. 20-35, E.E.U.U.

Monografía de Zacatecas, Censos Económicos (2009), INEGI, México.

Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Fresnillo, Zacatecas Clave geoestadística 32010 (2010), INEGI, México.

Ruvalcaba-Ruiz, D. et. al., *Ore Deposits at the Fresnillo Mine, Zacatecas, Mexico* (1988), Economic Geology vol. 83, págs. 1583-1596.

Sedlock, R. et. al., *Tectonostratigraphic Terranes and Tectonic Evolution of Mexico* (1993), Geological Society of America Special Paper 278, E.E.U.U.

Torres E. *Estudio de Paragénesis y Sucesión Mineralógica de las Vetas Santa Elena y Santo Niño, de la Sección San Luis, en el Distrito Minero de Fresnillo, Zacatecas* (1983). Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

Velador, J. et. al., *Timing of Magmatic Activity and Mineralization and Evidence of a Long-Lived Hydrothermal System in the Fresnillo Silver District, Mexico: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology* (2010), Economic Geology vol. 105, págs. 1335-1349, E.E.U.U.