



Universidad Nacional Autónoma de México
Posgrado en Ciencias de la Tierra
Instituto de Geología
Estación Regional del Noroeste

Estudio petrográfico, geoquímico y estructural del depósito tipo skarn de Buenavista Zinc, Cananea, Sonora

Tesis

Que para optar por el grado de:

Maestra en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:

VIOLETA ORTIZ OLVERA

TUTOR pRINCIPAL:

Dr. Thierry Calmus - ERNO, Instituto de Geología, UNAM

COMITÉ TUTOR:

Dr. Thierry Calmus - ERNO, Instituto de Geología, UNAM

Dra. Mélanie Noury - ERNO, Instituto de Geología, UNAM

Dra. Verónica Moreno - Universidad Estatal de Sonora

Dra. Vanessa Colás Ginés – Instituto de Geología, UNAM

Dra. Melanie Noury – ERNO, Instituto de Geología, UNAM

Dr. Thierry Calmus – ERNO, Instituto de Geología, UNAM

Dr. Lucas Ochoa Landín – Universidad de Sonora

Dra. Verónica Moreno Rodríguez – Universidad Estatal de Sonora

Hermosillo, Sonora, diciembre de 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Declaratoria de ética académica

"Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales."

Ortiz Olvera Violeta.

Violeta Ortiz Olvera

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi tutor, el Dr. Thierry Calmus, por su apoyo incondicional y gran esfuerzo, porque él hizo posible que este proyecto se llevara a cabo aún con todos los obstáculos que se nos presentaron en el camino. Gracias por darme una cálida bienvenida en Sonora y por sus enseñanzas, su paciencia y su tiempo.

Agradezco infinitamente a la Dra. Mélanie Noury, parte de mi comité tutor, por su interés y disposición para apoyarme durante la realización de esta tesis. Muchas gracias por brindarme un apoyo incondicional y guiarme durante todo este proceso. Todo el tiempo a su lado fue increíblemente enriquecedor. En especial gracias por dedicarle tanto tiempo a la revisión de este trabajo.

Gracias a la Dra. Verónica Moreno, parte de mi comité tutor, por su apoyo en campo y en el análisis petrográfico de esta tesis. En especial gracias por confiar en mis conocimientos y ayudarme a adquirir seguridad en mí misma como geóloga.

Hago un reconocimiento especial a Grupo México y a las personas que permitieron realizar este trabajo. Al Ing. Mario Rascón Heimpel, Gerente de Exploración; al Ing. Edgardo Barrera Moreno, Superintendente de Geología, y todo su equipo de geólogos de la mina Buenavista el Cobre, que me brindaron todo su apoyo para el trabajo de campo y muestreo en la mina; al Ing. Adolfo Gastélum del departamento de Geología de Buenavista del Cobre por todo su apoyo y buena disposición durante mi estancia; y al Lic. Irnardo Pacheco Delgado, de Capacitación OMINSA, por todo el trabajo administrativo que permitió mi estancia en Buenavista del Cobre.

Le agradezco a CONACyT y al Posgrado en Ciencias de la Tierra por la beca otorgada para este proyecto. También agradezco a la Geól. Aimée Orci Romero y al M.C. Elizard González Becuar de la Estación Regional del Noroeste por el procesamiento de las muestras para análisis geoquímicos, así como al Dr. Rafael del Río Salas por el apoyo en la microscopía electrónica de barrido. También quiero agradecer al Dr. Dante Morán y al Dr. Roberto Maldonado por su apoyo en el Instituto de Geología como colegas y amigos.

Quiero agradecer a Emiliano, Aura, Albán y Silja por compartir conmigo las peripecias de hacer un posgrado en las condiciones que nos tocaron.

Finalmente quiero agradecer a mi familia por su apoyo durante este tiempo, ya que sin su apoyo incondicional no podría haber realizado este trabajo. Gracias por estar presentes, a veces lejos y a veces cerca, por escucharme y siempre darme ánimos.

Quiero dejar registro de que esta tesis fue realizada durante la pandemia del COVID-19 que afectó al mundo entero. Durante el segundo semestre de mi posgrado se cerraron todas las instalaciones de la UNAM y se suspendieron clases presenciales. Este proyecto fue suspendido a inicios del 2020 porque no había seguridad de poder salir a realizar el trabajo de campo necesario. A mediados del 2020 se reanudó gracias al esfuerzo conjunto de Grupo México, mi Comité Tutor y el Instituto de Geología.

Los objetivos y las metodologías propuestas tuvieron que cambiar radicalmente ante las dificultades de utilizar los laboratorios de la universidad, que permanecían cerrados. El proyecto se fue realizando, tomando en cuenta las herramientas que se tenían en esos momentos donde no había garantías ni lapsos de tiempo claros de cuándo se reanudarían actividades.

Horarios reducidos, así como suspensión de actividades por cambios en los semáforos epidemiológicos demoraron considerablemente el procesamiento de procesamiento de muestras y la obtención de resultados por parte de los laboratorios.

El aislamiento, el miedo a perder seres queridos y la incertidumbre fueron obstáculos que también se presentaron y que con mucha dificultad pude sobrellevar. Pero quiero mencionarlos, porque afectaron considerablemente las condiciones que como estudiante tuve que enfrentar durante la realización de este posgrado y que no fueron normales.

En estos tiempos extraordinarios, la creatividad, la persistencia, la resiliencia y la esperanza de todos nosotros fueron puestas a prueba.

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	VII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 CONTEXTO GEOLÓGICO DEL NOROESTE DE MÉXICO	1
1.2 CONTEXTO GEOLÓGICO DEL DISTRITO DE CANANEA	3
1.3 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	5
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
1.5 HIPÓTESIS.....	7
1.6 OBJETIVOS.....	8
1.6.1 <i>Objetivos principales</i>	8
1.6.2 <i>Objetivos específicos</i>	9
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1 GENERALIDADES SOBRE LOS SKARNS.....	10
2.2 FORMACIÓN DE UN SKARN	10
2.3 CLASIFICACIÓN.....	13
2.4 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL	14
2.5 MINERALOGÍA Y CLASIFICACIÓN DE ACUERDO CON LAS COMPOSICIONES DE LOS GRANATES Y PIROXENOS.....	15
2.6 FLUIDOS MINERALIZANTES.....	19
2.7 RELACIÓN CON EL MAGMATISMO	20
2.8 SKARNS DE ZN	21
3. MARCO GEOLÓGICO	24
3.1 ESTRATIGRAFÍA DEL DISTRITO DE CANANEA.....	24
3.1.1 <i>Basamento precámbrico</i>	24
3.1.2 <i>Secuencia paleozoica</i>	24
3.1.3 <i>Secuencia mesozoica y cenozoica</i>	27
3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	29
3.3 SKARN DE BUENAVISTA ZINC	30
3.3.1 <i>Morfología del depósito tipo skarn</i>	30
3.3.2 <i>Evolución del depósito</i>	32
3.3.3 <i>Mineralización</i>	33
4. METODOLOGÍA	36
4.1 TRABAJO DE CAMPO	36
4.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL	36
4.3 PETROGRAFÍA Y MINERAGRAFÍA.....	37
4.4 GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS MAYORES Y TRAZA.....	38
5. RESULTADOS	43
5.1 ESTRUCTURA DEL ÁREA BUENAVISTA ZINC	43
5.2 SKARN DE BUENAVISTA ZINC	48
5.2.1 <i>Petrografía de unidades asociadas al depósito</i>	48
5.2.2 <i>Zoneamiento mineralógico del depósito</i>	59
5.2.3 <i>Distribución de la mineralización</i>	61
5.3 SKARN DE PUERTECITOS	65
5.3.1 <i>Petrografía del depósito</i>	66
5.3.2 <i>Zoneamiento mineralógico del depósito</i>	73

5.3.3 Distribución de la mineralización	75
5.4 GEOQUÍMICA	78
5.4.1 Elementos mayores	78
5.4.2 Elementos trazas	82
5.4.3 Tierras raras	84
6. DISCUSIÓN.....	86
6.1 ESTRUCTURAS ASOCIADAS A LA COMPRESIÓN LARAMIDE	86
6.1.1 Cabalgamiento del Granito Cananea sobre la Cuarcita Bolsa.....	86
6.1.2 La falla inversa Ricketts.....	86
6.1.3 La falla inversa Elisa	87
6.2 EXTENSIÓN <i>BASIN AND RANGE</i> DEL OLIGOCENO TARDÍO-MIOCENO.....	89
6.2.1 La falla normal Capote Pass	89
6.3 CONTROL DEL ZONEAMIENTO MINERALÓGICO EN EL SKARN DE BUENAVISTA ZINC.....	90
6.3.1 Zoneamiento mineralógico y la falla Elisa.....	91
6.3.2 Ausencia de endoskarn en los pórfidos	92
6.3.3. Control estratigráfico de la geometría del skarn.....	92
6.3.4 La fuente del calor y de los fluidos.....	93
6.4 NATURALEZA DEL SKARN DE PUERTECITOS	94
6.4.1 Desarrollo espacial del zoneamiento mineralógico.....	94
6.4.2 Endoskarn de la granodiorita Cuitaca	94
6.4.3 Control litológico del exoskarn	95
6.4.4 Comparación del skarn de Puertecitos con el skarn de Buenavista Zinc	95
6.5 GEOQUÍMICA	96
6.6 PATRONES Y CRONOLOGÍA DE LA MINERALIZACIÓN	98
6.6.1 Sulfuros.....	98
6.6.2 Coincidencia con el zoneamiento mineralógico	98
6.7 PERSPECTIVAS	99
7. CONCLUSIONES.....	100
8. REFERENCIAS	102
ANEXO 1.....	110
BARRENOS PARA CONSTRUCCIÓN DE SECCIONES	110
ANEXO 2.....	114
UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA DE MUESTRAS	114
ANEXO 3	121
ANÁLISIS GEOQUÍMICOS	121
ANEXO 4.....	126
INFORMACIÓN ANALÍTICA DEL LABORATORIO ALS CHEMEX	126

Resumen

El distrito de Cananea se encuentra dentro de un cinturón magmático y tectónico que fue activo en el noroeste de México durante el Cretácico y el Paleógeno, contemporáneo con la Orogenia Laramide. El eje del magmatismo migró hacia el interior del continente en un lapso entre 90 y 40 Ma en Sonora. En el noreste de Sonora y sureste de Arizona se generaron numerosos depósitos magmáticos hidrotermales de clase mundial, asociados con el magmatismo antes mencionado. El distrito minero de Cananea, donde se encuentra la mayor reserva de cobre del país, contiene varios tipos de depósitos, como pórfidos de cobre, skarns, mantos, etc.

En este trabajo se estudiaron los depósitos tipo skarn de Buenavista Zinc y Puertecitos que se ubican en el distrito de Cananea. Los skarns están alojados en rocas sedimentarias paleozoicas y alrededor de ellos hay rocas ígneas de varios eventos magmáticos: el Granito Cananea de 1400 ± 15 Ma, la Formación Elenita de 170-180 Ma, la Sienita el Torre de 170-150 Ma, la Formación Mesa de 67.4 ± 3.4 Ma y la granodiorita Cuitaca de 64 ± 3 Ma. Además, en el área de estudio hay dos fallas importantes que delimitan a la secuencia paleozoica, la falla Elisa y la falla Capote Pass. Los estudios previos realizados en Buenavista Zinc no han logrado definir claramente la fuente magmática responsable de proporcionar el calor y los fluidos para la generación de los skarns, ni el papel de la falla Elisa en la génesis del depósito, ya que esta falla no ha sido caracterizada consistentemente. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue analizar la falla Elisa para esclarecer la cronología de eventos que dieron lugar a los depósitos tipo skarn. También se determinó la fuente de fluidos y calor del depósito tipo skarn de Buenavista Zinc estudiando el zoneamiento mineralógico de los silicatos cálcicos, analizando la geoquímica del skarn y las posibles fuentes ígneas y comparándolo con el skarn de Puertecitos.

La deformación compresiva asociada con la Orogenia Laramide se expresa en el área por las fallas inversas Elisa, Ricketts y el cabalgamiento del Granito Cananea. De

acuerdo con las relaciones de corte, se concluyó que este sistema de fallas fue activo durante el Cretácico entre 67 y 64 Ma.

La falla Capote Pass es interpretada como una falla normal de acuerdo con las relaciones geométricas y litológicas. El único evento extensional posterior al Paleógeno es el *Basin and Range* del Oligoceno tardío-Mioceno. La edad y cinemática de esta falla sigue sujeta a discusión por su compatibilidad con las estructuras del *Basin and Range*.

El estudio petrográfico y geoquímico del depósito tipo skarn de Buenavista Zinc indicó que el zoneamiento mineralógico del depósito no está afectado por las fallas antes mencionadas, es decir, el skarn se formó después de la deformación estructural que dio forma al depósito. Los pórfidos y brechas también son posteriores a la deformación porque ocuparon las fallas como planos preferenciales para ascender. Además, la estructura del skarn de Buenavista Zinc está controlada principalmente por la litología del protolito, producto de metamorfismo y cambios de masa locales. El zoneamiento mineralógico apunta a una fuente no conocida ubicada hacia el NE debajo de la Formación Mesa. También existe la hipótesis que la fuente de calor corresponda a todo el sistema porfídico del área de estudio. En contraste, en el skarn de Puertecitos se identificó un endoskarn en la granodiorita Cuitaca, lo que confirma que Cuitaca es la fuente de calor y de fluidos del depósito tipo skarn de Puertecitos.

Por último, el skarn retrógrado y la mineralización están asociadas espacialmente con los pórfidos y brechas. En Buenavista Zinc el skarn retrógrado se desarrolló intensamente. La mineralización se distribuye de acuerdo con la orientación de las capas sedimentarias, sulfuros de cobre en las capas inferiores y sulfuros de zinc en las capas superiores. En Puertecitos, el skarn retrógrado es débil y se localiza alrededor de las brechas mineralizadas enriquecidas en carbonatos y sulfuros de cobre.

Abstract

The Cananea mining district is part of the Late-Cretaceous-Early Paleogene tectonic and magmatic belt active in northwestern Mexico during the Laramide Orogeny. In Sonora, the magmatic arc migrated to the east between 90 and 40 Ma. Numerous hydrothermal deposits among them world-class copper porphyries are associated with that magmatism in southern Arizona and northern. The Cananea mining district contains the largest porphyry copper deposit of the country and other different kinds of deposits, such as mineralized breccias skarns, and replacement deposits.

This work presents a structural and mineralogical study of the Buenavista Zinc and Puertecitos skarn deposits which are hosted in a Paleozoic sedimentary sequence unconformably overlying the 1400 Ma old Cananea granite. The Laramide Cuitaca batholith and associated smaller plutons are intruded in the Proterozoic and Paleozoic basement, as well as in a Jurassic volcanic sequence represented by the 180 Ma old Elenita Formation of, the 170 Ma old El Torre Sienite and the Henrietta and Cretaceous Mesa Formations. The Paleozoic sequence is limited by, two major faults, the Elisa and Capote Pass faults. Previous studies of Buenavista Zinc didn't clearly define neither the magmatic source responsible of the skarn formation, nor the Elisa fault kinematics. Thus, the aim of this study was to characterize the Elisa fault to constrain the chronological structural and hydrothermal evolution of the Buenavista Zinc skarn deposit. Also, the petrographic study of the skarn zonation and the geochemical data provided information about the location of the magmatic source that generates this deposit. In addition, in an attempt to determine the heat source and possible connection between both deposits, this study compares the Buenavista Zinc and the Puertecitos skarn.

The compressive deformation associated with the Laramide Orogeny in the study area is expressed by the Elisa, the Ricketts and the Cananea granite high-angle thrust faults. According to the spatial relations, this fault system was active during Late Cretaceous, between 67 and 64 Ma. Meanwhile, the Capote Pass fault is interpreted as a normal

fault according to the lithologic relationships observed between footwall and hanging wall. This suggests a possible relation with the Tertiary Basin and Range extensional province.

Petrological and geochemical analyses indicate that the mineral zonation of Buenavista Zinc is not affected by the Elisa and Ricketts faults, suggesting that the skarn deposit was formed after the Laramide compression in this area. Porphyries and breccia pipes used the fault planes to emplace, suggesting that they are younger than the faults. In addition, the Buenavista Zinc skarn mineralogy is controlled by the protolith composition, due to metamorphism and local mass changes. The mineral zonation indicates a northeast unknown source located beneath the Mesa Formation, even though, there is a possibility that the porphyry system has been the source of the Buenavista Zinc skarn deposit. In contrast, the Cuitaca granodiorite is clearly the source of heat and fluids of Puertecitos skarn, which has been demonstrated by the presence of an endoskarn within the igneous protolith.

Finally, retrograde skarn and mineralization are related with porphyry bodies and breccias. Retrograde skarn is well developed in Buenavista Zinc deposit. Mineralization distribution is consistent with the stratigraphic layers, copper sulphides in the Abrigo and Escabrosa Formations and zinc sulphides in the Martín Formation and Naco Group. On the contrary, retrograde skarn in Puertecitos area is weak and it is located around breccia pipes enriched with copper carbonates and copper sulphides.

1. Introducción

1.1 Contexto geológico del noroeste de México

En el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos se ubica el antiguo borde del cratón Norteamericano del periodo Proterozoico y Paleozoico (Stewart, 1988). En particular, en Sonora afloran rocas como el Esquisto Pinal y el Granito Cananea (1440 ± 15 Ma) que son parte de las provincias Precámbricas que forman el cratón norteamericano (Anderson y Silver, 1977; Anderson y Bender, 1989). Arriba de estas rocas, se depositaron durante el Paleozoico secuencias carbonatadas someras de plataforma y secuencias silíceas y detríticas de ambientes marinos profundos que conforman el margen pasivo del cratón norteamericano (Stewart, 1988; Poole et al., 1991). Los escasos afloramientos de rocas de plataforma se encuentran al norte de la ciudad de Hermosillo. Por el contrario, los afloramientos de rocas silíceas y detríticas, aunque dispersos, se ubican al sur de Hermosillo (Poole et al., 1991).

La ruptura de Pangea a inicios del Mesozoico dio origen a una zona de subducción de la placa Farallón debajo de la placa Norteamericana (Figura 1.1) que continuó activa hasta el Mioceno. Esta zona de subducción es la responsable de la actividad magmática mesozoica y cenozoica del noroeste de México. Posteriormente, el margen cambió de régimen tectónico, pasando a un límite transformante a causa de la subducción de la dorsal Farallón-Pacífico, que inició aproximadamente a la latitud de los Ángeles, y por la creación de los puntos triples de Rivera y de Mendocino. Entre ambos puntos triples hubo un cese de la subducción. En el noroeste de México, este límite transformante originalmente localizado a lo largo del sistema lateral derecho de las fallas Tosco-Abrejos y San Benito (Spencer y Normark, 1979, 1989) migró al este durante el Mioceno tardío para formar el *rift* oblicuo del Golfo de California. El *rifting* del Golfo de California provocó la incorporación de la franja continental de la actual península de Baja California a la placa del Pacífico y su migración hacia el noroeste respecto a la placa Norteamericana a la cual pertenece la parte continental de México.

Por lo tanto, en el territorio de Sonora, hay un registro de varios arcos magmáticos continentales que se emplazaron en el basamento cristalino Proterozoico y sedimentario Paleozoico, en distintos periodos de tiempo. Existe un registro escaso de rocas volcánicas y plutónicas que conformaron un arco que tienen edades del Pérmico tardío (Arvizu et al., 2011) hasta el Jurásico tardío (Figura 1.1A) (Anderson and Silver, 1979; Busby-Spera, 1988; Grajales-Nishimura et al., 1992, Del Rio-Salas, et al., 2017; Arvizu et al., 2009; Lawton y Molina, 2014). Por otro lado, las rocas ígneas más abundantes en Sonora pertenecen a un arco magmático que migró hacia el este hasta alcanzar la actual frontera con Chihuahua, en un periodo entre 97 y 59 Ma (Figura 1.1B) (Valencia-Moreno et al., 2006; Del Río-Salas, et al., 2017), contemporáneo con la Orogenia Laramide. La migración del arco magmático ha sido clásicamente interpretada como la consecuencia de un aumento de la tasa de convergencia entre las placas Farallón y Norteamericana y de una disminución del ángulo de subducción. Este cinturón magmático se caracteriza por grandes batolitos con una composición que varía de diorita a granito (Valencia-Moreno, 2001), así como potentes secuencias volcánicas agrupadas bajo el término de Formación Tarahumara en el centro de Sonora (McDowell et al., 2001).

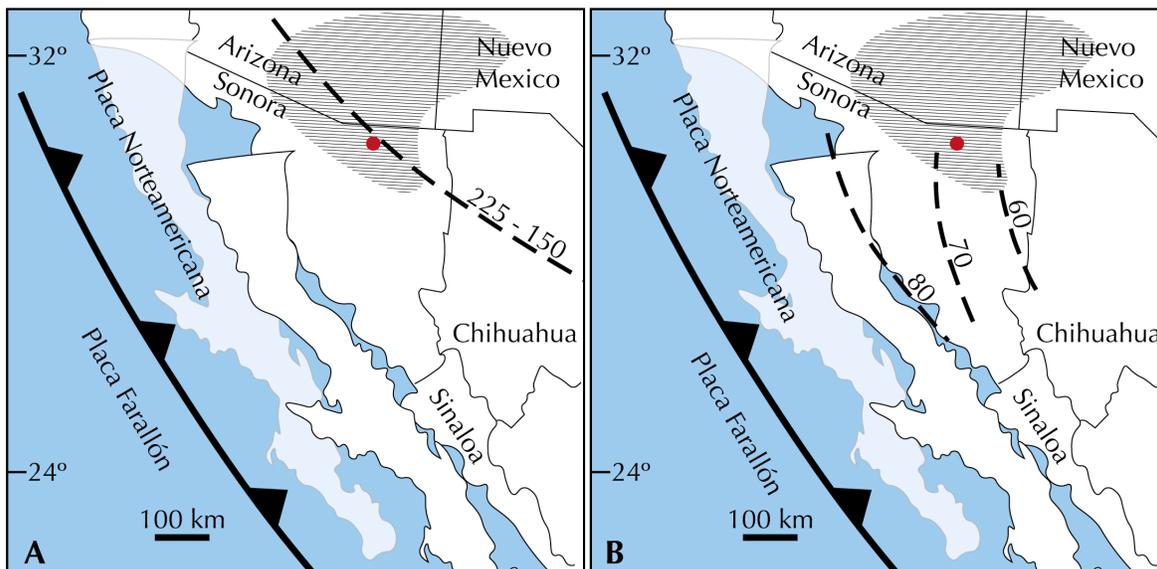


Figura 1.1 Mapa geotectónico del estado de Sonora. Las líneas discontinuas son isócronas en millones de años que muestran la posición y migración del frente oriental del arco magmático. La zona sombreada es el gran cluster de pórfidos cupríferos de edades entre 90 y 40 Ma de Arizona, Nuevo México y Sonora. El punto rojo corresponde al distrito de Cananea. Modificado de Valencia-Moreno et al. (2006), Valencia-Moreno y Ortega-Rivera (2011) y Del Río-Salas et al. (2017).

Diversos factores, como la geometría particular de la placa en subducción (Valencia-Moreno et al., 2017) generaron condiciones favorables para el emplazamiento de numerosos depósitos magmáticos hidrotermales. En particular ha resaltado el gran *cluster* de pórfidos cupríferos ubicado en el noreste de Sonora y sureste de Arizona (Figura 1.1) porque contiene depósitos de clase mundial.

El evento tectónico denominado Orogenia Laramide y al cuál se asocia el magmatismo Cretácico y del Paleógeno no está bien caracterizado respecto a las estructuras y la compresión que ocasionó en Sonora. Sin embargo, en el noreste y centro del Estado, se han documentado evidencias de levantamiento tectónico de bloques por fallas inversas de alto ángulo, involucrando el basamento proterozoico y las rocas sedimentarias paleozoicas (Davis, 1979; Calmus et al., 2011; Del Rio-Salas, et al., 2017), así como cabalgamientos en el noreste de Sonora involucrando las mismas rocas del Paleozoico y secuencias volcánicas y sedimentarias del Jurásico hasta el Cretácico tardío (Rangin, 1977).

1.2 Contexto geológico del distrito de Cananea

El distrito minero de Cananea se ubica en el noreste del Estado de Sonora. Se encuentra a 219 km al noreste de Hermosillo, a 40 km al sur de la frontera norteamericana, a 70 km al sureste de Nogales y a alrededor de 150 km al sur de Tucson, Arizona (Fig. 1.2). Este distrito presenta varios estilos de mineralización, como pórfidos de cobre, skarns, mantos y brechas hidrotermales (Einaudi, 1981; Meinert 1982; Valencia-Moreno et al., 2017).

En el noreste de Sonora, el basamento Proterozoico está constituido principalmente por el esquisto Pinal intrusionado por el Granito Cananea, de 1400 +/- 15 Ma (U-Pb en zircón, Anderson y Silver, 1977). Sobre el basamento se encuentra en contacto discordante una secuencia sedimentaria marina de plataforma paleozoica, de edad entre 541 y 298 Ma, (por fósiles, Mulchay y Velasco 1954; Meinert 1982 y referencias aquí). Cabe mencionar desde ahora que esta secuencia sedimentaria aloja la mineralización tipo skarn del depósito Buenavista Zinc. En discordancia sobre el Granito Cananea y las rocas paleozoicas, se encuentran las rocas vulcanosedimentarias jurásicas de las Formaciones Henrietta y Elenita de posiblemente 170-180 Ma (Anderson y Silver, 1977; Meinert, 1982).

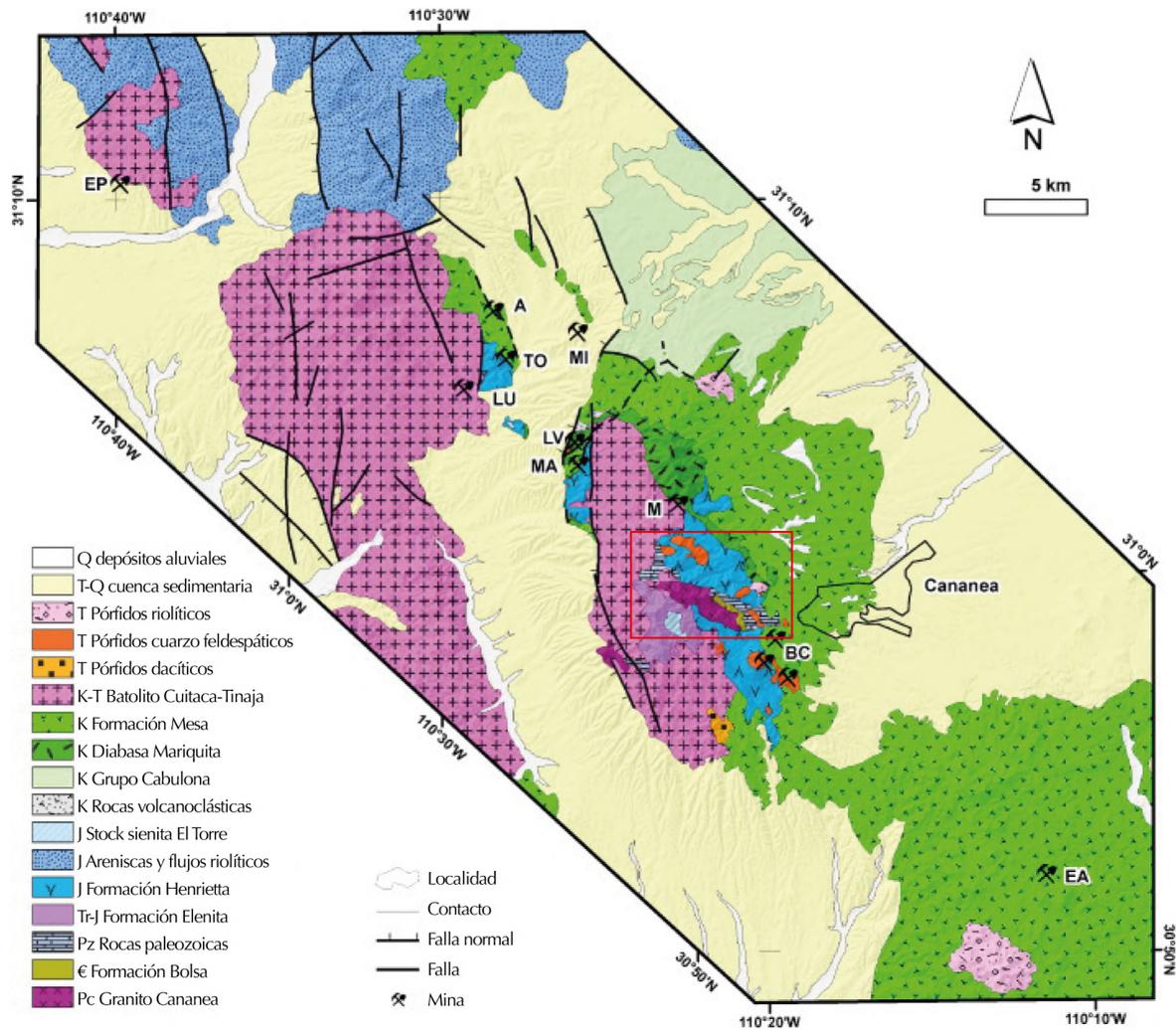


Figura 1.2 Mapa del distrito de Cananea. Recuadro rojo indica área de estudio. Tomada de Del Río-Salas et al., 2017. EP=El Pilar, LU=Lucy, TO=Toro, A=Alisos, MI=Milpillas, M=María, BC=Buenavista del Cobre, EA=El Alacrán

También afloran sus contrapartes intrusivas, la sienita El Torre de edad entre 150 y 170 Ma (U-Pb en zircón, Anderson y Silver, 1977; Meinert, 1982). En contacto discordante arriba de ellas se depositaron las rocas vulcanosedimentarias cenozoicas de la Formación Mesa, la cuál arrojó una edad K-Ar en roca total de 67.4 ± 3.4 Ma (Compañía Minera de Cananea en Meinert, 1982). La Formación Mesa representa el equivalente volcánico de las intrusiones múltiples profundas y someras que constituyen el batolito granodiorítico Cuitaca de 64 ± 3 Ma (U-Pb en zircón, Anderson y Silver, 1977). La mineralización de pórfidos de cobre generados durante el Cretácico y el Paleógeno temprano en el distrito de Cananea representa la mayor reserva de cobre de México. Las edades casi contemporáneas de plutones pre-mineralizados y mineralizados sugieren que los depósitos están asociados a

pulsos de magma pequeños generados durante el enfriamiento de plutones calco-alcalinos situados a mayor profundidad.

La configuración estructural del distrito de Cananea es compleja. La estructura principal que se reconoce es un monoclinal con una dirección NW-SE y un echado de 40 a 60° hacia el NE (Figura 1.2). Los afloramientos del Granito Cananea y de su cobertura paleozoica están controlados y limitados por dos fallas principales: La falla Capote Pass en el sur con una dirección prácticamente E-W y la Falla Elisa, en el norte, con una dirección WNW-ESE a NW-SE. Son las fallas más importantes y antiguas junto con la falla Tinaja Creek. Un grupo de fallas que cortan a las fallas anteriores con una dirección N-S se caracterizan por controlar estructuralmente a los pórfidos y, en general, a las formaciones mineralizadas (Figura 1.2). Existen fallas secundarias en las zonas mineralizadas con una orientación controlada por las fallas principales (Valentine, 1932).

1.3 Características del área de estudio

El área de estudio se ubica dentro del distrito minero de Cananea, en la mina de Buenavista del Cobre. La explotación a gran escala empezó a principios del siglo XX en la región de Cananea y, con ella, comenzaron los estudios de las rocas y los depósitos del área (Valentine, 1932). Los skarns se alojan esencialmente en las rocas carbonatadas paleozoicas. Tres zonas de interés han sido identificadas en el depósito de Buenavista del Cobre: el área de Puertecitos en donde existen restos de minas subterráneas antiguas, el área de la mina subterránea antigua Elisa y los depósitos de la Cuenca Capote (Figura 1.3) nombrados bajo el nombre Buenavista Zinc por la compañía minera.

El skarn de BZ, el cual se ha explotado de forma subterránea en el pasado, tiene el potencial económico para su explotación y es un blanco actual de la compañía minera Grupo México. Se caracteriza por estar enriquecido en Zn, con valores de Zn/Cu de 17/3. El enriquecimiento en zinc no está distribuido alrededor de los stocks de pórfido cuarzo-monzoníticos, sino que los valores más altos se encuentran cerca del contacto con la Formación Mesa (Meinert, 1982).

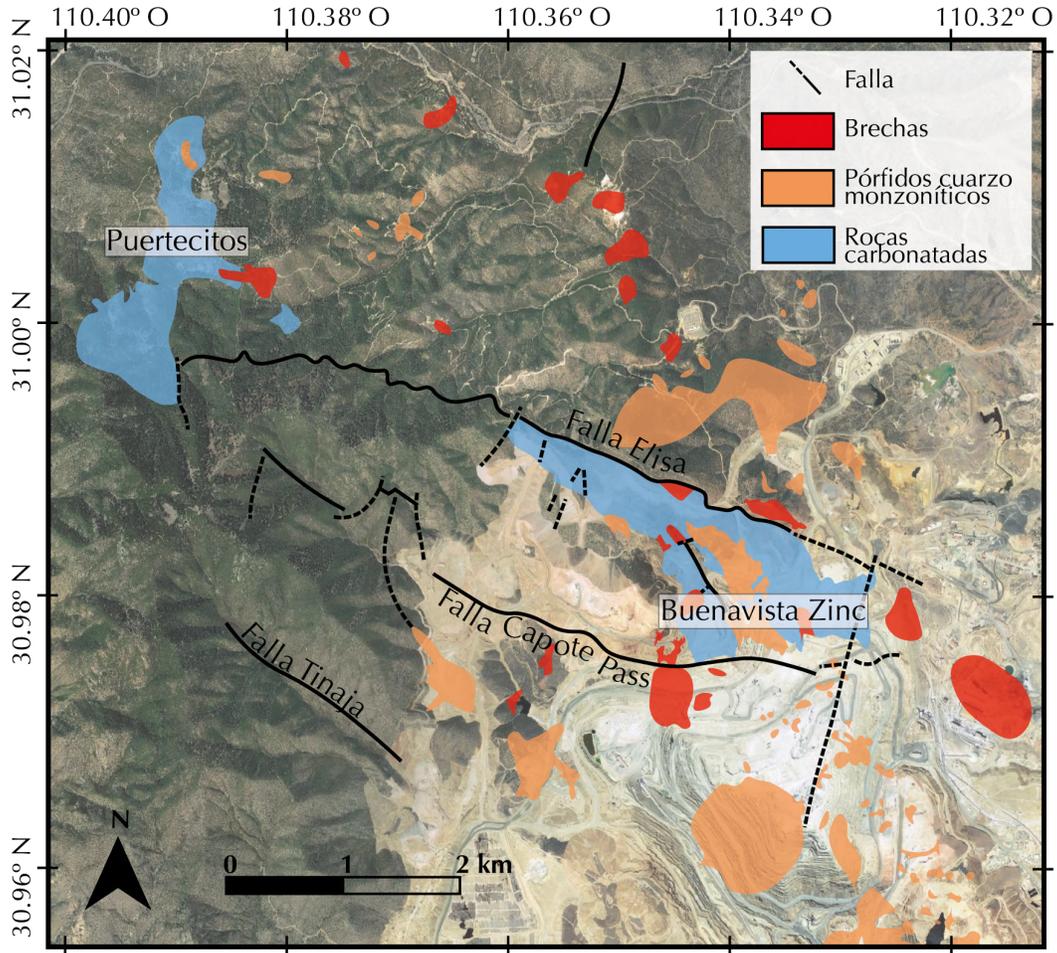


Figura 1.3 Ubicación de las rocas carbonatadas en donde se hospeda la mineralización de tipo skarn. Se muestran las principales fallas que controlan la geología del área de estudio.

La formación del skarn se llevó a cabo preferencialmente en las capas calcáreas-arcillosas de la secuencia sedimentaria Paleozoica, resultando en el desarrollo de granate pobre en Fe, piroxeno y vesuvianita (Meinert, 1982). Según Fafán-Panama (2002) la geometría de la mineralogía metamórfica y del cuerpo mineralizado es el resultado de un control estratigráfico-estructural. Para explicar porque el zoneamiento no está asociado a los stocks pórfido monzoníticos que intruyen a los carbonatos, Meinert (1982) sugiere que el skarn de Buenavista Zinc está relacionado a una fuente magmática más profunda que no aflora en superficie. Además, Bushnell (1988) reconoció que el zoneamiento mineralógico del skarn se distribuye respecto a la falla Elisa y que las rocas volcánicas al norte de la falla presentan un fracturamiento y una sericitización asociados a una chimenea brechosa (*brecha pipe*),

denominada brecha Buenavista. Según este autor, la presencia de un stock pórfido cuarzo-feldespático profundo es el origen los fluidos que generaron el skarn (Bushnell, 1988). Sin embargo, Wodziki (1995) notó que la ubicación de los skarns de Buenavista Zinc y Puertecitos cerca de la sienita El Torre, la diorita Tinaja y la granodiorita Cuitaca sugiere que estos cuerpos intrusivos sean también una posible fuente de fluidos mineralizantes por lo menos durante las primeras etapas de skarnificación (Wodziki, 1995). Las investigaciones previas (Meinert, 1982; Wodziki, 1995; Farfán-Panama, 2002) que se han hecho en Buenavista Zinc no han sido consistentes en definir cuál de cuerpos magmáticos fue la fuente magmática que generó el skarn.

1.4 Planteamiento del problema

Por lo tanto, en la zona de estudio existen rocas que pertenecen a al menos dos eventos magmáticos distintos: uno Jurásico representado por la Formación Henrietta, la Formación Elenita, y la sienita El Torre; y un evento cretácico-paleoceno representado por la Formación Mesa, el batolito Cuitaca, así como los pórfidos y brechas mineralizados.

Ya que la formación de un skarn es un proceso que afecta tanto a la fuente de calor ígnea y a las rocas sedimentarias encajonantes, la alteración que se genera en las rocas ígneas cerca del contacto con las rocas sedimentarias se denomina endoskarn. En Buenavista Zinc el skarn presenta un zoneamiento mineralógico controlado por la Falla Elisa (Meinert, 1982; Wodziki, 1995; Farfán-Panamá, 2002), o por la misma actitud de las rocas Paleozoicas y no hay descrito un endoskarn.

Farfán-Panama (2002) mencionó a la falla Elisa como la responsable del control estructural en la génesis del skarn de Buenavista Zinc. La falla Elisa se ha interpretado como falla normal (Valentine, 1932; Wodziki, 1995). Sin embargo, Meinert (1982) y Farfán-Panamá (2002) la representan como falla inversa de alto ángulo, pero no argumentan su interpretación. Hasta la fecha, no hay evidencias concretas y fundamentadas que favorezcan alguna de las dos interpretaciones.

1.5 Hipótesis

Uno de los puntos de partida de esta tesis de maestría es que si los pórfidos que cortan al skarn fueran la fuente de calor y de los fluidos, deberían existir evidencias petrológicas del

flujo del fluido hacia la roca encajonante y el zoneamiento del depósito debería ser concéntrico alrededor de los pórfidos. Sin embargo, en el skarn de Buenavista Zinc no se ha descrito un endoskarn, de tal manera que identificarlo permitiría definir cuál fue la fuente de calor y de fluidos que generaron el depósito, cuáles son los vectores de mineralización y ayudaría a entender la distribución de la mineralización. Si el endoskarn no preservó texturas relictas que ayuden a identificarlo, se puede utilizar la firma geoquímica del skarn y compararla con la firma geoquímica de los pórfidos y la granodiorita Cuitaca para poder identificar al endoskarn (Mrozek et al., 2020). El objetivo sería establecer una posible correlación entre la concentración de elementos mayores, trazas y tierras raras inmóviles de los tres conjuntos de rocas (skarn, plutón Cuitaca y cuerpos porfídicos).

Por otro lado, el análisis de la geometría y la cinemática de la falla Elisa ayudaría a esclarecer la cronología de los eventos que dieron origen al skarn y con ello su posible fuente. Si la falla es anterior al evento mineralizante que generó el skarn, entonces la distribución del skarn mostrará un claro control estructural. También ayudaría a determinar si el bloque localizado al norte de la falla es un blanco potencial para explorar la posible extensión del bloque mineralizado.

A ~5 km al oeste de Buenavista Zinc, se encuentra el skarn de Puertecitos, el cual está en contacto con la granodiorita Cuitaca. Otro punto importante será comparar los depósitos tipo skarn de Buenavista Zinc y Puertecitos dará luz sobre los factores que controlaron su formación. Si Cuitaca es la fuente magmática del skarn de Puertecitos y es la misma que originó el skarn de Buenavista Zinc, entonces se encontrarán similitudes geoquímicas entre ambos depósitos, porque se considera que afectan a la misma secuencia sedimentaria. Si la fuente es única, pero los depósitos son distintos, significa entonces que otros factores como la estructura, la roca encajonante y la profundidad, controlaron la formación de

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivos principales

1. Caracterizar la falla Elisa a partir de determinar su geometría, el tipo de contacto y su cinemática.

2. Determinar la fuente magmática que originó la mineralización del skarn de Buenavista Zinc estudiando el zoneamiento mineralógico y la geoquímica del depósito, así como determinar donde se encuentra el endoskarn y el exoskarn en el depósito a partir de las características mineralógicas.

1.6.2 Objetivos específicos

- 1) Identificar la geometría y estructuras relacionadas con la falla Elisa a partir del análisis de barrenos de la mina Buenavista del Cobre que corten a la falla a distintas profundidades, el análisis de microestructuras en lámina delgada y la elaboración de secciones perpendiculares a la falla.
- 2) Realizar un mapa geológico actualizado a la escala 1:5000 con la bibliografía existente y la información colectada en el trabajo de campo.
- 3) Identificar el zoneamiento mineralógico de los skarns de Buenavista Zinc y Puertecitos tanto en superficie como en barrenos para caracterizar y comparar los dos depósitos a partir de láminas delgadas y Microscopía Electrónica de Barrido.
- 4) Identificar la fuente magmática de los depósitos a partir de buscar evidencias del desarrollo de un endoskarn en los diferentes cuerpos ígneos (i.e. Granodiorita Cuitaca y cuerpos porfídicos) en láminas delgadas y comparando los elementos mayores, trazas y tierras raras de las muestras del skarn y de las muestras ígneas.

2. Marco teórico

2.1 Generalidades sobre los skarns

Se define un skarn como una roca compuesta por silicatos de calcio, principalmente piroxeno y granate (Zharikov, 1970; Einaudi et al., 1981; Meinert, 1992). Un skarn se forma por metamorfismo regional o de contacto, asociado con una variedad de procesos metasomáticos y metamórficos que pueden involucrar fluidos magmáticos, metamórficos, meteóricos o marinos (Meinert, 1992; Meinert et al., 2005). Se puede encontrar asociado a cualquier tipo de roca, pero lo más común es encontrarlo asociado con calizas. El desarrollo de un skarn indica una combinación específica entre la presión, la temperatura, los fluidos, así como el tipo de roca encajonante en un campo particular de estabilidad de los minerales que lo forman (Meinert, 1992). Los skarns pueden contener mineralización con importancia económica, a los cuales se les denomina depósitos tipo skarn. En muchos casos, el skarn y la mineralización son resultado del mismo sistema hidrotermal, aunque haya diferencias en la distribución y la temporalidad de los minerales a escala local (Meinert et al., 2005).

Una característica destacable de los skarns es que están zoneados mineralógica y composicionalmente (Meinert et al., 2005). El zoneamiento es importante en la exploración minera porque permite reconocer la estructura y ayuda a determinar su geometría, los vectores de mineralización y la fuente de fluidos y metales (Chang y Meinert, 2008). Los principales factores que determinan el patrón de zoneamiento y geometría de un skarn son: la profundidad de formación, la composición del magma (si está relacionada la skarnificación con el magmatismo), las características de los fluidos magmáticos generados por exsolución, el estado de oxidación del magma y el estado de oxidación de la roca encajonante (Chang y Meinert, 2008).

2.2 Formación de un skarn

La formación de un skarn es un proceso dinámico. La primera etapa para generar un skarn requiere una fuente de calor. El enterramiento o un cuerpo magmático pueden ser las fuentes de calor (Meinert, 2020). En el caso del emplazamiento de un plutón, ocurre un

metamorfismo isoquímico en las rocas encajonantes que están en contacto con la roca intrusiva, lo cuál induce una recristalización y cambios en la estabilidad mineral sin transferencia de masa significativa (Figura 2.1A). Este proceso ocurre comúnmente entre 600 y 800°C, pero puede llegar a 1200°C (Wallmach y Hatton, 1989). Los cambios de fase y la recristalización metamórfica generan un fluido que empieza a circular localmente y forman minerales calci-silicatados en estratos carbonatados impuros. En particular, en el contacto entre caliza y lutita, el calcio se mueve hacia la lutita y el hierro, potasio, sodio, magnesio, aluminio y silicio migran hacia la caliza (Figura 2.1A). Gracias a este proceso, se forman eventualmente bandas compuestas de un solo mineral calco-silicatado, wollastonita si el fluido es rico en calcio, piroxeno si es rico en silicio o granate si el contenido es proporcionado. A esta zona ubicada en el contacto entre estratos de litologías distintas se le denomina skarn de reacción (Vidale, 1969; Meinert, 1992) (Figura 2.1B). El gradiente de temperatura entre un intrusivo y las rocas encajonantes facilita la circulación de fluidos (Meinert, 1992). Los fluidos aceleran las reacciones metamórficas, generando una litología con una composición aún controlada por el protolito denominada skarnoide (Figura 2.1B) (Zharikov, 1970).

En la siguiente etapa (Figura 2.1C), la exsolución de fluidos hidrotermales crea un skarn puramente metasomático que se sobrepone a la alteración previa, corta a la secuencia sedimentaria y no está controlado por la litología de la roca encajonante. En el caso de un skarn asociado a un intrusivo, el exoskarn está zoneado mineralógicamente con respecto al plutón con el granate proximal, el piroxeno distal y wollastonita en el contacto con los mármoles (Meinert, 2020).

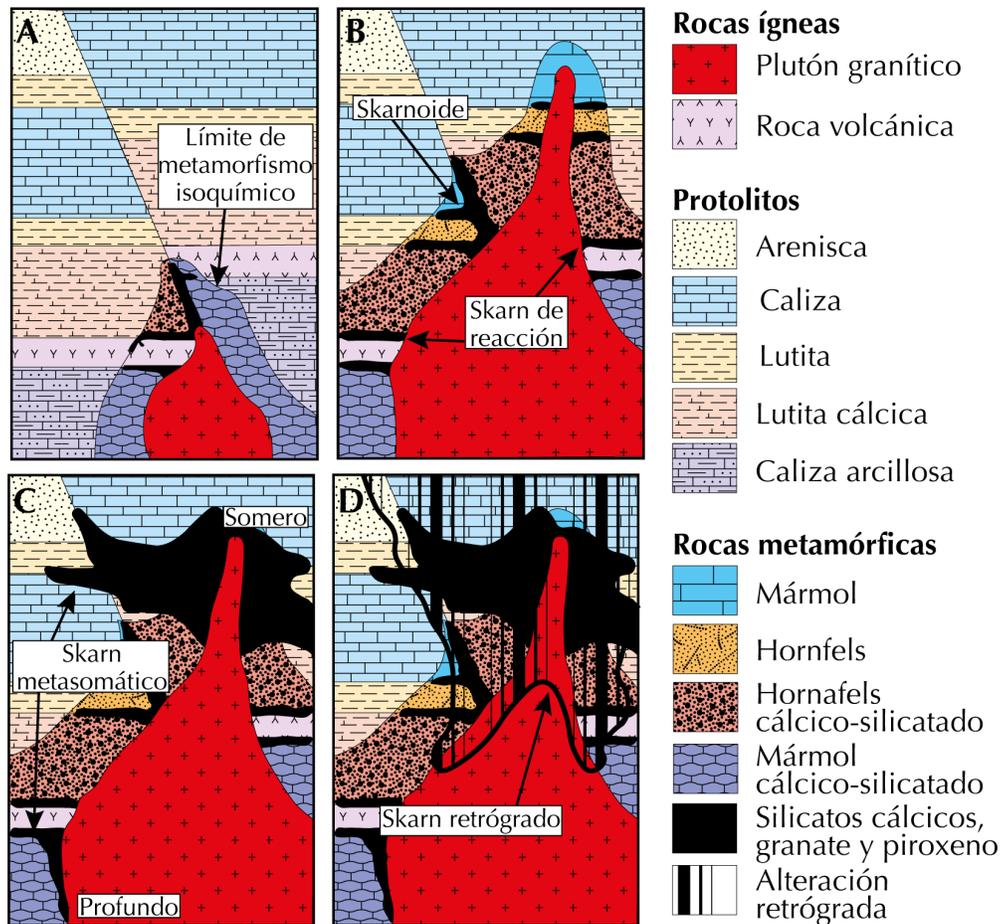


Figura 2.1 Evolución de un skarn asociado con un intrusivo. A) Primera etapa correspondiente al emplazamiento de un intrusivo, metamorfismo isoquímico. B) Recristalización metamórfica, la mineralogía depende de la naturaleza y de la composición del protolito. En el contacto entre diferentes litologías ocurre intercambio de elementos que generan skarns de reacción y skarnoides. C) La cristalización del intrusivo y la separación de fases resulta en la liberación de fluidos que controlan la formación del skarn metasomático. De acuerdo con la profundidad, la morfología del skarn es diferente. D) El enfriamiento del plutón y la circulación de aguas meteóricas generan una alteración retrógrada de los minerales calci-silicatados. La alteración retrógrada es más extensa en zonas someras. Tomado de Meinert et al. (2005)

Por último, mientras la temperatura del intrusivo disminuye puede ocurrir una mezcla de fluidos magmáticos o metamórficos con agua meteórica y la actividad hidrotermal se intensifica. En estos casos empieza la formación de minerales retrógrados como epidota, actinolita, algunos sulfuros y óxidos, reemplazando a la mineralogía previa (Figura 2.1D) (Pirajno, 2009). La alteración retrógrada es más intensa en skarns someros que profundos porque el hidrotermalismo asociado con aguas superficiales es más frío y no alcanzan fácilmente hacia los skarns profundos (Meinert, 1992).

2.3 Clasificación

De acuerdo con el tipo de protolito, en los skarns generados por metamorfismo de contacto se utiliza el término exoskarn para indicar que el protolito es sedimentario y para indicar que se ubica fuera del intrusivo que lo causó (Meinert, 1992). Por otra parte, el término endoskarn se usa para indicar que el protolito es ígneo y que se encuentra dentro del intrusivo (Meinert, 1992) (Figura 2.2). En relación con la composición química dominante del protolito y del skarn, los skarns se clasifican en magnesiano, manganesiano o cálcico (Figura 2.2). Se usan frecuentemente estos términos combinados con endo- y exo- skarn (Meinert et al., 2005).

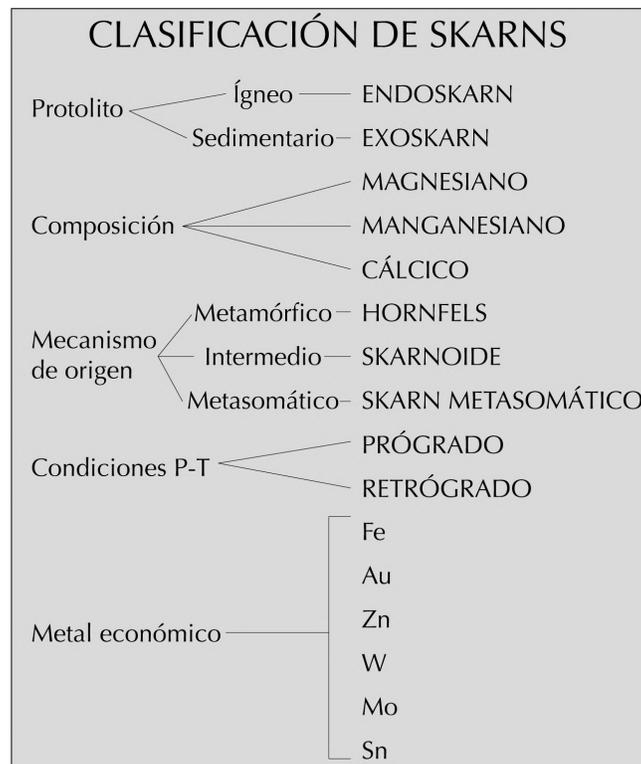


Figura 2.2 Mapa conceptual de clasificación de skarns.

Los skarns también se pueden clasificar de acuerdo con los mecanismos de origen. Si la roca refleja parcialmente la composición del protolito, y su origen es incierto o complejo, se puede denominar skarnoide (Einaudi et al., 1981). Un *hornfels* calci-silicatado es un término descriptivo para una roca de grano fino generada por metamorfismo de un carbonato impuro. Genéticamente, el skarnoide es un intermedio entre un *hornfels*

puramente metamórfico y un skarn puramente metasomático (Meinert, 1992) (Figura 2.2). En función de la evolución temporal y de la temperatura de la skarnificación, se puede denominar skarn prógrado a las asociaciones que aparecen durante el calentamiento de la roca. En oposición a lo anterior, se habla de un skarn retrógrado para referirse a la asociación mineralógica tardía, de menor temperatura con fases hidratadas (Figura 2.2). Finalmente, de acuerdo con el metal de importancia económica que contiene, los skarns se clasifican en siete grupos: Au, Fe, W, Cu, Sn, Mo y Zn (Meinert, 1992; Meinert et al., 2005) (Figura 2.2).

2.4 Distribución temporal y espacial

Los depósitos de tipo skarn del Precámbrico son raros a escala global, una posible causa es porque la existencia de calizas en ese periodo de tiempo era escasa (Misra, 1999). En contraste, la mayoría de los skarns actualmente conocidos son Mesozoicos o más jóvenes, posiblemente porque la erosión ha removido los depósitos más antiguos de este tipo. Por otro lado, los depósitos tipo skarn de Cu y Zn-Pb que son de ambiente somero, tienen edades del Cenozoico principalmente.

Los skarns se pueden localizar junto a plutones, asociados a fallas, zonas de cizalla, piso oceánico, sistemas hidrotermales someros o terrenos metamórficos enterrados a niveles profundos de la corteza (Meinert, 1992). Además, algunos tipos de skarn ocurren en un ambiente tectónico determinado. Por ejemplo, los skarns cálcicos de Fe-Cu sólo se forman en arcos de islas oceánicas (Figura 2.3A), mientras que los skarns de Cu, Zn-Pb y W se encuentran asociados con arcos magmáticos continentales (Figura 2.3B). Asimismo, los skarns de Au están asociados generalmente con cuencas tras-arco de arcos volcánicos (Figura 2.3 A y B), y a su vez en cuencas tras-arco formadas por procesos de *rifting* es más probable encontrar skarns ricos en F, Sn o polimetálicos (Figura 2.3C). Por otro lado, los skarns asociados con granitos tipo S de magmatismo intra-continental son ricos en Sn o F (Figura 2.3D) (Meinert et al., 2005).

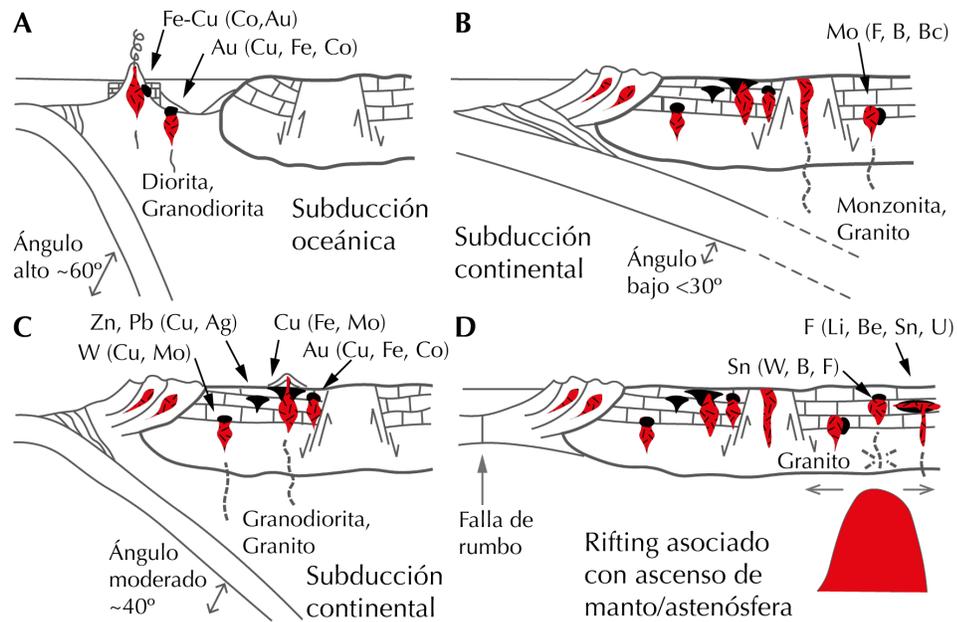


Figura 2.3 Ambientes geotectónicos de formación de los skarns. En rojo se indican cuerpos ígneos y en negro depósitos tipo skarn. A) Ambiente de subducción oceánica y ambiente de tras-arco. B) Ambiente de subducción continental con un arco oceánico acrecionado a la corteza continental. C) Ambiente de subducción avanzada, el arco magmático migra hacia adentro del continente, con posibles procesos locales de *rifting*. D) Ambiente post-subducción o de rifting continental. Tomado de Meinert et al. (2005).

2.5 Mineralogía y clasificación de acuerdo con las composiciones de los granates y piroxenos

Los skarns asociados a intrusivos muestran un zoneamiento mineralógico con respecto a la fuente de calor y de fluidos, por lo cual se definen zonas proximales y distales. La distribución espacial de las fases es la siguiente: un patrón de granate proximal, piroxeno distal y vesuvianita, wollastonita, o algún piroxenoide como wollastonita o rodonita en el contacto entre el skarn y el mármol (Meinert, 1992). Al mismo tiempo, muchos minerales de skarns presentan variaciones sistemáticas de color. Así pues, el granate proximal es rojizo-pardo y se va aclarando con la distancia hasta llegar a un verde amarillento pálido cerca del frente de mármol (Atkinson y Einaudi, 1978). Conviene subrayar que este cambio de color no refleja estrictamente cambios composicionales, pero en general, los granates ricos en hierro son más oscuros que los pobres en hierro. Por otro lado, en el caso del piroxeno, los cristales son verdes pálidos en zonas proximales y se oscurecen hacia zonas distales. Aunque el cambio de color en los piroxenos no es tan marcado, típicamente refleja

el incremento en hierro o manganeso hacia el límite de la skarnificación (Meinert et al., 2005).

Uno de los factores que pueden modificar el zoneamiento mineralógico es el estado de oxidación de los fluidos. En particular, una alta concentración de Ca en el fluido facilita la formación de la solución sólida de grosularia (Al)-andradita (Fe), mientras que la presencia de Fe^{2+} favorece la formación de hedenbergita (Figura 2.4, Tabla 2.1).

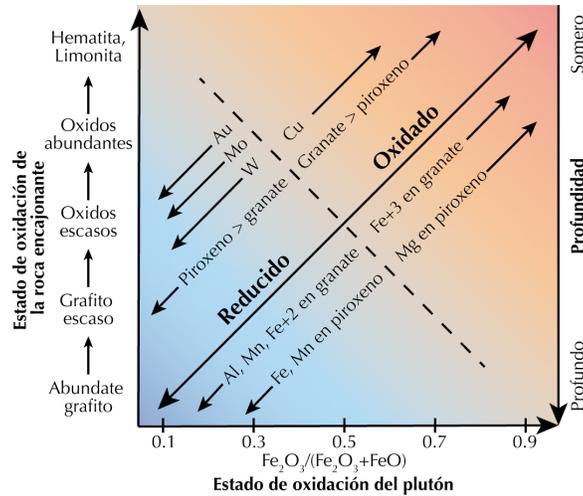


Figura 2.4. Variación de minerales que se forman en un skarn de acuerdo con el grado de oxidación. Tomado de Meinert (2020).

Tabla 2.1. Lista de minerales presentes en skarns. Minerales en color rojo característicos de etapa prógrada y minerales en verde característicos de etapa retrógrada. Modificado de Meinert (2020) y Haldar (2020).

Mineral	Miembros extremos	Abreviación	Composición
Granate	Grosularia	Gr	$Ca_3Al_2Si_3O_{12}$
	Andradita	Ad	$Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$
	Espersatina	Sps	$Mn_3Al_2Si_3O_{12}$
	Almandino	Al	$Fe_2Al_2Si_3O_{12}$
Piropo	Prp	$Mg_3Al_2Si_3O_{12}$	
Piroxeno	Diópsida	Di	$CaMgSi_2O_6$
	Hedenbergita	Hd	$CaFeSi_2O_6$
	Johannsenita	Jo	$CaMnSi_2O_6$
Piroxenoides	Ferrosilita	Fs	$FeSiO_3$
	Rodonita	Rd	$MnSiO_3$
	Wollastonita	Wo	$CaSiO_3$
Vesuvianita		Vs	$Ca_{10}(Mg,Fe,Mn)_2Al_4Si_9O_{34}(OH, F, Cl)_4$
Anfíbol	Tremolita	Tr	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$

	Ferroactinolita	Ft	$\text{Ca}_2\text{Fe}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Actinolita de Mn	Ma	$\text{Ca}_2\text{Mn}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Hornblenda	Hb	$\text{Ca}_2\text{Mg}_4\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Pargasita	Pg	$\text{NaCa}_2\text{Mg}_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Ferrohastingsita	Fh	$\text{NaCa}_2\text{Fe}_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Cummingtonita	Cm	$\text{Mg}_5\text{Fe}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Dannemorita	Dm	$\text{Mn}_2\text{Fe}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})$
	Grunerita	Gru	$\text{Fe}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Epidota	Piamontita	Pm	$\text{Ca}_2\text{MnAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
	Allanita	All	$(\text{Ca},\text{REE})_2\text{FeAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
	Epidota	Ep	$\text{Ca}_2\text{FeAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
	Pistacita	Ps	$\text{Ca}_2\text{Fe}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
	Clonizoisita	Cz	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
Clorita	Fórmula general:	$\text{M}_{4-6}\text{T}_4\text{O}_{10}(\text{O},\text{OH})_8$	M=Al, Fe ³⁺ , Fe ²⁺ , Li, Mn ²⁺ , Cr, Ni, Zn T= Si, Al, Fe ³⁺ , Be, B

La relación entre granate/piroxeno también refleja la relación Fe³⁺/Fe²⁺ (Chang Y Meinert, 2008). Cuando cambia la proporción de Gt>Px a Px>Gt hay una transición de un ambiente oxidante a uno reductor (Figura 2.4). Esta transición depende del grado de oxidación del intrusivo respecto a la roca encajonante (Meinert, 2020).

La mineralogía retrógrada (epidota, anfíbol, clorita y otras fases hidratadas, Tabla 2.1) está controlada por la configuración estructural del skarn y se sobrepone al zoneamiento prógrado (Meinert, 1992). Como consecuencia, en algunos casos, es difícil discriminar entre el zoneamiento retrógrado y el zoneamiento espacial relacionado con las reacciones prógradas asociadas a los fluidos metasomáticos. Ya que el skarn metasomático frecuentemente no es controlado por la estructura de las rocas encajonantes y el skarn retrógrado tampoco respeta la estructura previa. Además, los minerales hidratados no están asociados exclusivamente a la alteración retrograda.

El estudio sistemático de la mineralogía de los skarns (Zharikov, 1970; Burt, 1977; Einaudi et al., 1981; Meinert, 1992) ha permitido hacer una clasificación de acuerdo con la

composición de los granates y piroxenos, la cual se puede ilustrar con diagramas ternarios expresados en términos de los miembros extremos de dichos minerales (Figura 2.5).

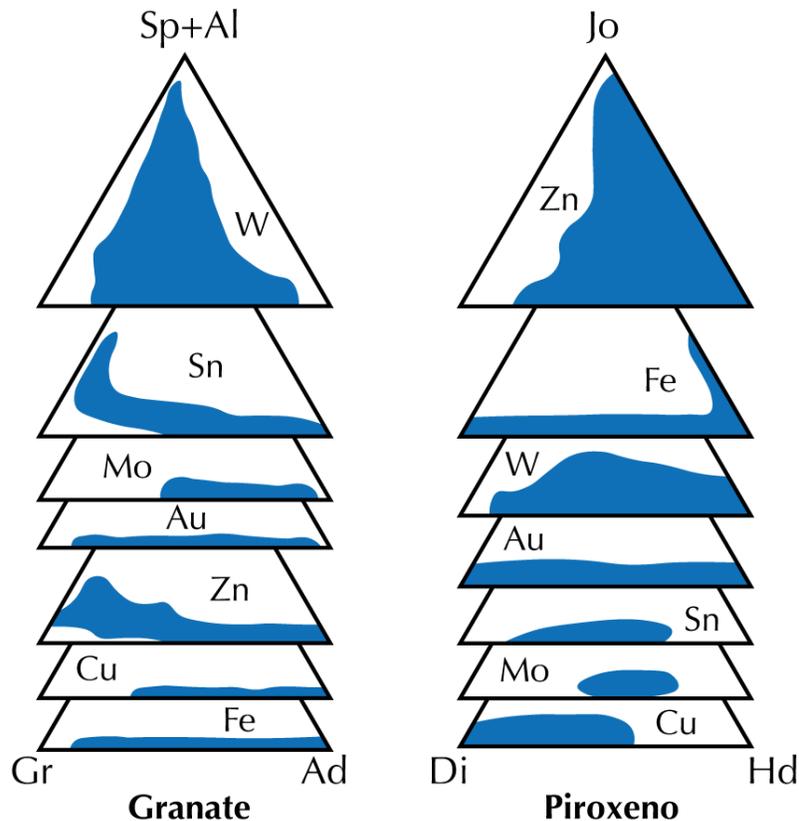


Figura 2.5 Diagramas ternarios de composición de granate y piroxeno con los campos de los principales tipos de skarn resaltados en azul. Gr=grosularia Ad=andradita Sp+Al=esfersatina y almandino Di=diópsida Hd=hedenbergita Jo=johannsenita Modificado de Meinert (2005) y (2020)

Con el uso de nuevas técnicas analíticas como la microsonda electrónica (EMPA por sus siglas en inglés) y la ablación láser acoplada a un espectrómetro de masas cuadrupolar de plasma inductivamente acoplado (LA- ICP-MS por sus siglas en inglés), se ha podido refinar la composición de los minerales como el granate y piroxeno y se ha estudiado el zoneamiento mineralógico dentro de un mismo tipo de depósito y también el zoneamiento composicional en cristales aislados. Los granates pueden presentar a nivel del depósito un zoneamiento de elementos mayores (Jamtveit, 1991), menores, elementos trazas (Smith et al., 2004) e isótopos (Clechenko y Valley, 2003). Además, en un solo cristal de granate se pueden encontrar variaciones composicionales que reflejan las características de la composición de los fluidos sucesivos con los que interactuó el cristal (Meinert et al., 2005). Además, la variación en la composición de los fluidos es un reflejo del cambio

composicional de la fuente de fluidos. Por ejemplo, se han encontrado cristales con un zoneamiento oscilatorio que refleja ciclos de circulación de los fluidos y periodos de estabilidad en el sistema (Jamtveit, 1991) o que evidencian cambios químicos del estado de oxidación o de las fuentes de los fluidos.

2.6 Fluidos mineralizantes

La reconstrucción de la composición de los fluidos hidrotermales y de sus condiciones físico-químicas a partir de los minerales presentes en el skarn se basa en el principio de equilibrio entre el fluido y el mineral (Reed, 1997). Sin embargo, los modelos para los sistemas de tipo skarn no han sido exitosos porque una característica intrínseca de este tipo de sistemas es el estado constante de desequilibrio entre el fluido hidrotermal y los minerales (Lasaga y Rye, 1993; Meinert et al., 2005). Las reacciones químicas durante el proceso de skarnificación pueden tener un efecto de retroalimentación positiva si causan una disminución en la porosidad, porque concentran el fluido y aceleran la reacción. Por el contrario, si las reacciones provocan un aumento de la porosidad, inducen una migración del fluido y cesan por falta de fluido (Meinert et al. 2005). Por lo tanto, los patrones de flujo y la composición del fluido son los parámetros que determinan la precipitación de minerales metálicos. Estudios realizados por Heinrich et al. (1992) y Baker en inclusiones fluidas muestran que las salmueras magmáticas y los vapores de baja densidad pueden transportar cantidades suficientes de metales para formar los depósitos de tipo skarn. La fase de vapor puede transportar importantes cantidades de Cu y otros metales, los cuales pueden seguir múltiples trayectorias, independientes de la fase líquida (Heinrich et al., 1992; Baker et al., 2004; Meinert, 2005).

Los estudios isotópicos también han dado luz sobre la naturaleza de los fluidos en la génesis de los skarns. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ medido en fases como piroxeno, granate y cuarzo varían entre 4‰ y 9‰, lo que indica que los isótopos estables de oxígeno de los fluidos que formaron estas fases derivan de una fuente magmática. Frecuentemente, la firma isotópica magmática en los minerales de la fase prógrada disminuye alejándose de la fuente magmática. Por otra parte, en minerales hidratados, como biotita, anfíbol y epidota, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ también muestran un rango de valores desde un polo magmático entre 4‰

y 9‰, hasta un polo sedimentario y/o de aguas meteóricas entre -23‰ y -12‰ (Meinert et al., 2003). Además, los isótopos de azufre $\delta^{34}\text{S}$ han mostrado que los fluidos magmáticos contribuyen en la formación de los sulfuros (como pirita, pirrotita, molibdenita, calcopirita, esfalerita, galena, bornita o arsenopirita) (Shimazaki y Sakai, 1984; Meinert, 2005). Por el contrario, en los skarns distales de Zn, hay aporte de azufre desde las rocas sedimentarias (Megaw et al., 1988).

2.7 Relación con el magmatismo

La composición de la fuente magmática es uno de los factores que determina el tipo de skarn que se desarrolla. Este efecto se puede observar en diagramas de discriminación geoquímica, usando elementos mayores y trazas (Meinert, 1995), donde cada tipo de skarn presenta una composición característica del tipo de plutón al cual está asociado. Se ha observado que skarns están asociados mayoritariamente a plutones calco-alcalinos, aunque hay excepciones

Por otro lado, en el diagrama $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ versus $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, la mayoría de los plutones asociados a depósitos de tipo skarn se encuentran relativamente cerca del límite entre metaluminosos y peraluminosos. A su vez, los plutones peralcalinos asociados a depósitos de tipo skarn son muy escasos. En particular, los plutones más ricos en aluminio están asociados con skarns de estaño y los más empobrecidos en aluminio están asociados a skarns de hierro (Meinert et al., 2005).

En relación con el estado de oxidación del magma, este determina cuales son las fases que cristalizan en el skarn (Meinert et al., 2005). Los magmas oxidados cristalizan magnetita y en sus depósitos asociados es común la presencia de magnetita primaria. En cambio, en los magmas reducidos en común encontrar ilmenita (Shimazaki, 1980 y referencia en texto) y sulfuros de hierro y de hierro-cobre (Sillitoe, 2000; Simon et al., 2003). Esto se debe a que los magmas oxidados y ricos en agua maximizan el contenido de metales en las fases líquidas resultantes, inhibiendo la precipitación temprana de sulfuros que se transportan en la fase líquida (Sillitoe, 2010).

Los elementos volátiles en el magma pueden modificar el zoneamiento mineralógico de los skarns. Concretamente, el flúor incrementa dramáticamente la solubilidad del aluminio en

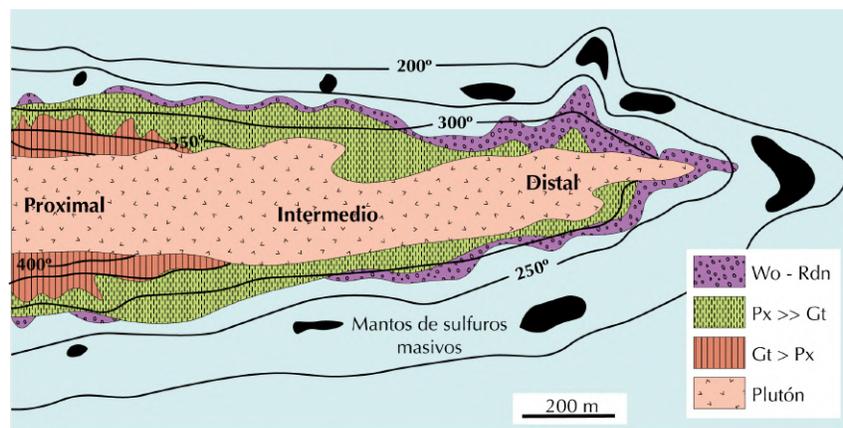
fluidos hidrotermales, lo que facilita la formación de abundante granate en condiciones reducidas y más alejadas del intrusivo (Newberry, 1998; Chang y Meinert, 2008). Además, este elemento facilita la disolución de minerales magmáticos calci-silicatados, aportando espacio y aluminio, de manera que favorece la formación del endoskarn (Chang y Meinert, 2004). Igualmente, el flúor puede introducir zinc a las zonas más proximales del sistema, a pesar de que es común en las zonas distales. Otro efecto de este elemento es disminuir la temperatura del *solidus* del magma, por lo cual los fluidos hidrotermales que exsuelven del magma se encuentran a temperaturas más bajas y no requieren viajar tanto para enfriarse y alcanzar la temperatura a la cual precipita la esfalerita (Chang y Meinert, 2008).

Las concentraciones iniciales de elementos inmóviles en los protolitos ígneos y sedimentarios se verán difícilmente modificadas durante el metamorfismo de contacto y la alteración hidrotermal posterior, debido a su naturaleza no compatible con los fluidos. Este hecho hace que el protolito preserve una huella geoquímica que se ha utilizado recientemente para discriminar aquellos endoskarns y exoskarns donde las evidencias texturales no son determinantes para su discriminación (Mrozek et al., 2020). En ambientes donde se forman los skarns, los fluidos no movilizan el aluminio y los elementos de alto potencial iónico (HFSE, por sus siglas en inglés). Dichos elementos inmóviles se localizan en feldespatos y minerales accesorios como magnetita, zircón, apatito, rutilo y titanita, los cuales son resistentes a la alteración (Deer et al. 1992; Mrozek et al., 2020). Por consiguiente, durante la formación de un skarn, la mineralogía puede cambiar, pero la baja solubilidad de los elementos inmóviles permite que sean reincorporados en los minerales nuevos durante su crecimiento (Huggins et al. 1977; Nicolescu et al., 1998; Gaspar et al., 2008; Mrozek et al., 2020).

2.8 Skarns de Zn

Ya que el skarn de Buenavista Zinc está enriquecido en zinc, a continuación se mencionan las principales características de este tipo de skarns: 1) están clásicamente asociados con un ambiente tectónico de subducción o rifting; 2) se encuentran en zonas distales con respecto a la fuente magmática; 3) presentan minerales ricos en hierro y manganeso; 4) se pueden encontrar en contactos litológicos y estructurales; 5) no presentan aureolas metamórficas; 6)

el piroxeno es el mineral dominante y los minerales retrógrados son ilvaíta rica en manganeso, piroxenoides, anfíbol subcálcico y clorita (Einaudi et al., 1981). Los depósitos tipo skarn de zinc pueden presentarse en una gran variedad de formas, de tamaños, así como de temperaturas de formación (Einaudi et al., 1981). La mineralización en este tipo de yacimientos decrece desde zonas asociadas al intrusivo hasta zonas sin intrusivos asociados, lo que sugiere que en los distritos donde aún no se ha encontrado la fuente magmática el depósito tipo skarn no se ha identificado en su totalidad (Megaw et al., 1988). Además, el aumento de manganeso en la composición de los piroxenos ayuda a identificar las zonas proximales de las zonas distales en los depósitos (Figura 2.6).



Características	Proximal	Intermedio	Distal
Granate:Piroxeno	> 1:1	1:20	Sin granate
Max Jo en piroxeno	< 25%	25-50%	> 50%
Óxidos de hierro	mag > hem	hem - mag	hem > mag
Sulfuros	sp > gn ~ ccp	sp > gn > ccp	sp ~ gn > ccp
Skarn:mineralización	> 10	1-10	< 1
Temperatura	> 400°C	320° - 400°C	< 320°C
Salinidad (NaCl eq.wt.%)	> 15%	7.5 - 15%	< 7.5%
Zn/Cu	< 10	10-20	> 20
Zn/Pb	> 5	2-5	< 2
Pb/Cu	< 5	5-10	> 10

Figura 2.6 Esquema de zonamiento mineralógico en un skarn rico en zinc. Modificado de Meinert (1987). Wo:wollastonita, Rdn:rodonita, Px:piroxeno, Gt:granate, Jo:johannesita, mag:magnetita, hem:hematita, sp:esfalerita, gn:galena, ccp:calcopirita

Dada la variedad de ambientes donde se pueden encontrar, los depósitos de skarn de zinc se pueden subclasificar en: skarns formados cerca de batolitos, cerca de stocks, cerca de diques, lejos de la fuente magmática o fuente magmática desconocida, y en vetas carbonatadas con minerales calci-silicatados ricos en manganeso (Einaudi et al., 1981). Algunos autores consideran que las vetas carbonatadas no son estrictamente skarns (en Einaudi et al., 1981), sin embargo, al contener minerales ricos en manganeso se pueden

considerar como el miembro extremo opuesto a los depósitos tipo skarn en contacto con la fuente magmática (Einaudi et al., 1981).

Los depósitos tipo skarn de Zn **formados cerca de batolitos** se caracterizan por su pequeño tamaño, asociación con ambientes profundos, pobreza en manganeso, dominio de piroxeno y mineralización distribuida de forma masiva dentro de la roca skarnificada (Einaudi et al., 1981).

Los depósitos tipo skarn **formados cerca de stocks** presentan un endoskarn bien desarrollado con epidota, anfíbol y clorita, con abundante clinopiroxeno rico en Mn y esfalerita. La mineralización se distribuye dentro y fuera de la roca skarnificada (Einaudi et al., 1981). Algunos yacimientos de clase mundial pertenecen a este grupo (Einaudi et al., 1981), como Central Mining en Nuevo Mexico (Hernon y Jones, 1968).

Los depósitos tipo skarn **formados cerca de diques** generalmente se distribuyen alrededor de ellos. En algunos casos el dique no es la fuente de fluidos, pero sirve como transporte para fluidos de fuentes cogenéticas más profundas. Los diques se caracterizan por desarrollar un endoskarn. La skarnificación se desarrolla alrededor de los diques y se extiende a través de fallas y estratificaciones en forma de chimeneas y mantos masivos. También es común que haya una transición entre el skarn y las calizas con sulfuros masivos. Justamente, esta zona es la de leyes más altas en depósitos como en Naica, México (Stone, 1959). La mineralogía prógrada se caracteriza por piroxenos ricos en manganeso y granate del tipo andradita, además estas fases se enriquecen en manganeso y hierro con el tiempo. Por otro lado, las fases retrógradas son ricas en manganeso, como rodonita, ilvaíta rica en manganeso, anfíbol subcálcico del tipo cummingtonita y clorita. (Einaudi et al., 1981).

Los depósitos tipo skarn pueden presentar un zoneamiento **controlado por una falla**. En este caso los fluidos tuvieron que moverse mayores distancias antes de generar los skarns y la mineralización (Einaudi et al., 1981). Este tipo de skarn se caracteriza por la dominancia del piroxeno respecto al granate.

3.Marco geológico

3.1 Estratigrafía del distrito de Cananea

3.1.1 Basamento precámbrico

El distrito minero de Cananea se encuentra en la provincia Paleoproterozoica Mazatzal, que se extiende desde el sur de Arizona, sur de Nuevo México hasta el norte de Sonora. Esta provincia está conformada por el esquisto Pinal de edad paleoproterozoica y el granito Cananea, que aflora en el distrito de Cananea, con edad de 1400 Ma (Figura 3.1 y 3.2) (U-Pb en zircón, Anderson y Silver, 1977). La provincia Mazatzal se ha interpretado como la terminación suroeste del cratón norteamericano.

3.1.2 Secuencia paleozoica

En el distrito de Cananea se encuentra una secuencia sedimentaria paleozoica (Mulchay y Velasco, 1954; Stewart, et al. 1990; Poole et al., 2005) en discordancia angular sobre el basamento precámbrico. De base a techo, la secuencia está conformada por las siguientes formaciones:

- **Formación Bolsa** o cuarcita Capote (Cámbrico): Esta formación tiene un espesor de ca. 180 m y muestra una gradación de arcosas y conglomerados en la base, a areniscas y limolitas hacia el contacto con las calizas de la Formación Abrigo (i.e. el techo de la secuencia; Valentine, 1932; Meinert, 1982). Esta unidad se considera como cuarcita debido a la alteración de los feldespatos a sericita y porque hay evidencias de recristalización del cuarzo (Valentine, 1932).
- **Formación Abrigo** o Esperanza (Cámbrico): Esta formación está constituida por estratos de 20 cm a 1m de espesor y capas laminadas de 1 a 5 mm de micrita y microesparita con dolomias color gris pardo intercaladas con micrita arcillosa y lutitas de 1 a 10 mm de ancho. La Formación Abrigo alcanza un espesor de hasta 130 m.

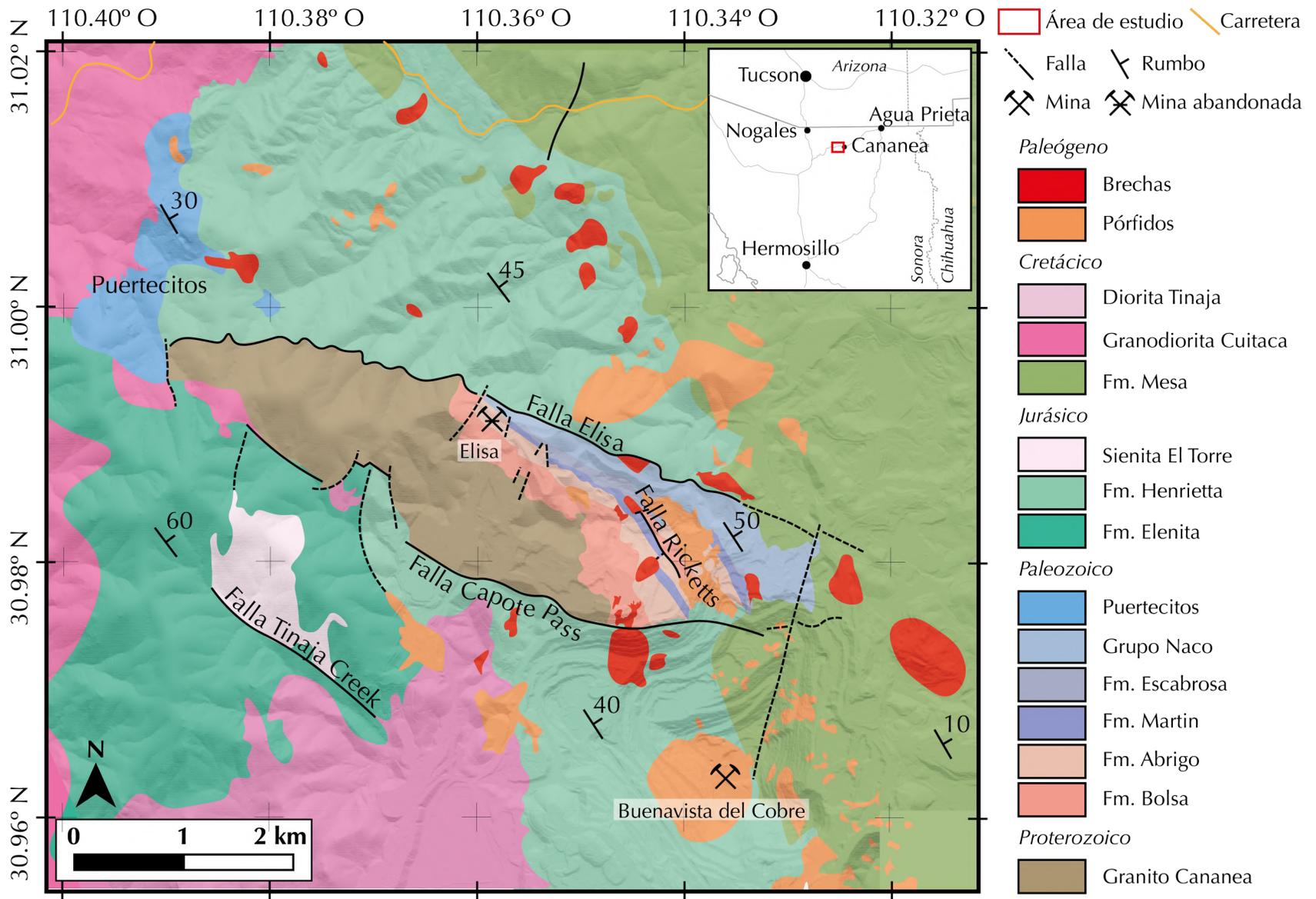


Figura 3.1 Mapa del área de estudio.

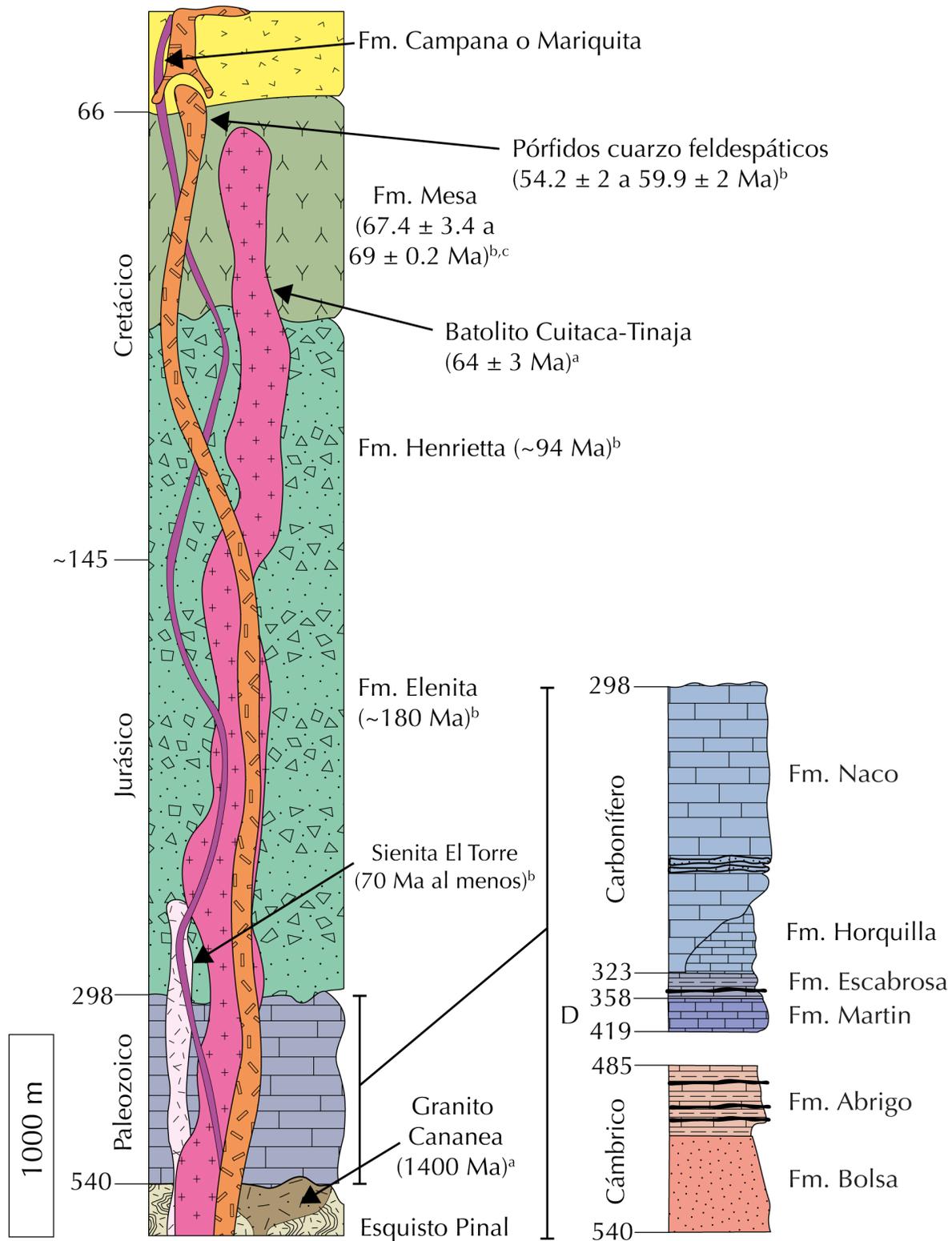


Figura 3.2. Columna estratigráfica esquemática del distrito de Cananea. ^aAnderson y Silver (1977), ^bWodziki (1995), ^cMeinert (1982). Modificado de Meinert (1982) y Wodziki (1995). D= Devónico

- **Formación Martin** o Cristalina (Devónico): Está constituida por capas de 30 cm a 1 m de espesor compuestas de micrita gris con un poco de microesparita y dolomías. El espesor total de la formación es de 60 m. Las unidades superiores contienen braquiopodos, crinoides y oolitas (Meinert, 1982).
- **Formación Escabrosa** o Chivatera (Carbonífero): Se caracteriza por capas gruesas de 30 cm a 1.5 m de espesor de micrita arcillosa y microesparita arcillosa con nódulos de pedernal y abundantes crinoides (Meinert, 1982). Su espesor total es cercano a los 50 m.
- **Grupo Naco** o caliza Buenavista (Carbonífero): Este grupo es el más potente de la secuencia, con un grosor de ca. 500 m y está conformado por la formación Horquilla y la Formación Naco. La Formación Horquilla es la base del Grupo, alcanza los 130 m de espesor. Se caracteriza por presentar estratos de 1.5 a 2 m de grosor, de colores rojizos y grises, formados por microesparita, micrita arcillosa o dolomítica. Se observan nódulos y *stockworks* de pedernal, calcita y arcilla (Meinert, 1982). La Formación Naco se caracteriza por estratos de 10 cm a 1 m de espesor de calizas puras y dolomías, con un horizonte índice de limolita de 5m de espesor (Meinert 1982).

3.1.3 Secuencia mesozoica y cenozoica

Sobre la secuencia paleozoica se encuentran discordantemente rocas volcánicas mesozoicas y cenozoicas (Valentine, 1932). Las formaciones que sobreyacen a las rocas paleozoicas son las siguientes:

- **Formación Elenita:** está constituida por una columna de ca. 1800 m de riolitas y andesitas intercaladas con cuarcitas y areniscas (Figura 3.1 y 3.2). Su similitud con depósitos volcanosedimentarios de edad Triásica-Jurásica en el sur de Arizona sugieren que son de la misma edad, pero no hay fechamientos isotópicos disponibles de esta formación (Valentine, 1936; Wodziki, 1995).
- **Formación Henrietta:** Esta formación sobreyace a la Formación Elenita (Figura 3.2). Está compuesta por flujos y tobas con una composición que varía desde dacitas a riolitas y tiene un espesor de 1700 m (Valentine, 1932). Los flujos dacíticos masivos

y las tobas dan el color gris distintivo a esta formación. Los flujos contienen cristales de feldespatos, anfíbol y cuarzo, la matriz está constituida principalmente de ortoclasa y cuarzo, y contiene esquirlas de vidrio. Las tobas también son masivas, oscuras y densas con un lustre vítreo y están formadas por cristales angulosos de cuarzo y feldespato en una matriz de clorita y mica (Valentine, 1932). Se han hecho fechamientos de Ar-Ar, obteniendo una edad de 57.0 ± 0.2 Ma que coincide con la edad de mineralización del distrito y una edad de 94 Ma que se interpretó como una posible edad mínima de formación (Wodziki, 1995). Sin embargo, los isótopos de ϵNd y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sugieren que su edad puede ser mayor, posiblemente jurásica (Wodziki, 1995).

- **Sienita El Torre:** este cuerpo representa la contraparte intrusiva de las formaciones Elenita y Henrietta (Figura 3.1 y 3.2). Las relaciones de corte encontradas en campo y su similitud con plutones Triásico-Jurásicos del sur de Arizona sugieren que tiene una edad jurásica (Meinert, 1892; Wodziki, 1995). Se han realizado fechamientos de Ar-Ar en anfíbol y arrojan edades de 58.4 ± 0.5 Ma y 70 Ma, las cuales se han interpretado como eventos de recalentamiento (Wodziki, 1995).
- **Formación Mesa:** consiste en tobas, lahares y flujos, aglomerados, conglomerados y areniscas volcanoclásticas (Wodziki, 1995) de 1500 m de espesor que sobreyacen discordantemente a la Formación Elenita y Henrietta (Figura 3.1 y 3.2) (Valentine, 1932; Bushnell, 1988). Su composición dominante es andesítica. Esta formación es importante porque hospeda la mineralización rica en cobre más importante del distrito minero de Cananea. En la Formación Mesa se han obtenido dos fechamientos: 67.4 ± 3.4 Ma con K-Ar en roca total (Compañía Minera, datos reportados en Meinert, 1982) y 69 ± 0.2 Ma con el método de Ar-Ar en biotita (Wodziki, 1995).
- **Diorita Tinaja** y la **granodiorita Cuitaca:** los dos intrusivos conforman un batolito que se considera como el equivalente plutónico de la Formación Mesa (Figura 3.1 y 3.2). La granodiorita Cuitaca de 64 ± 3 Ma (Anderson y Silver, 1977) es una roca fanerítica de grano medio, color gris claro a rosa, constituida por plagioclasa, ortoclasa, cuarzo y minerales ferromagnesianos como anfíbol y biotita. En los contactos con la roca encajonante, la roca intrusiva se vuelve más oscura debido al

aumento de la concentración de ferromagnesianos y se observan diques aplíticos y porfídicos que intersectan la granodiorita y los sedimentos paleozoicos. Este efecto es más notorio en el contacto con los sedimentos calcáreos paleozoicos de Puertecitos (Valentine, 1932).

- **Formación Campana o Formación Mariquita:** Es un sistema de diques de diabasa y *plugs* porfídicos cuarzo monzoníticos que intruyen a todas las rocas antes descritas hasta la formación Mesa, con dos orientaciones preferenciales: N 40° E y N 60-80° W (Figura 3.2) (Bushnell 1988; Meinert 1982).
- **Pórfidos cuarzo feldespáticos:** toda la columna estratigráfica está intruída por estos cuerpos porfídicos (Figura 3.1 y 3.2). Se caracterizan por contener cuarzo y feldespatos, pero algunos contienen megacristales de feldespato, otros contienen fenocristales de biotita, o tienen una composición más máfica con fenocristales de andesina, hornblenda y biotita (Valentine, 1932). La edad de los pórfidos obtenida con K-Ar en biotita hidrotermal y sericita es de 59.9 ± 2 (Damon et al., 1983 en Wodziki, 1995) y 54.2 ± 2 Ma, respectivamente (Mexicana de Cananea en Wodziki, 1995). También se han obtenido edades con Re-Os en molibdenita de 57.4 ± 1.6 Ma (McCandless et al., 1993 en Wodziki, 1995), 73.9 ± 0.4 Ma, 61.3 ± 0.3 Ma y 59.3 ± 0.3 Ma (Del Río-Salas et al., 2017). Además, los pórfidos están asociados a brechas mineralizadas (Meinert, 1982) que se generaron en condiciones de temperatura menores a las calculadas para el depósito tipo skarn (Farfán-Panamá, 2002).

De acuerdo con Wodziki (1995), las rocas ígneas y la mineralización son parte de una serie comagmática, cuya fuente fue un magma derivado del manto que evolucionó por cristalización fraccionada y asimilación.

3.2 Geología estructural

El distrito de Cananea se caracteriza por presentar una estructura general tipo monoclinal definida por el granito Cananea y de los sedimentos paleozoicos, con una dirección NW-SE y un echado de 40 a 60° hacia el NE (Figura 3.1). Este monoclinal está limitado por dos fallas, la **falla Elisa** al norte del área con orientación WNW-ESE, y la **falla Capote Pass** al sur con orientación E-W (Figura 3.1). La falla Elisa pone en contacto la secuencia Paleozoica

con la Formación Henrietta en la parte NW del área y con la Formación Mesa en la parte SE (Figura 3.1). Si bien la falla Elisa es sub-paralela a la dirección estructural del monoclinial y a la Formación Horquilla, la falla Capote Pass es oblicua con respecto a la secuencia paleozoica y corta todas las Formaciones incluyendo el basamento representado por el Granito Cananea (Figura 3.1). Estas fallas fueron interpretadas anteriormente por McKee y Anderson (1998) y Rodríguez-Castañeda (2002) como fallas normales, activas durante el Cretácico temprano, limitando un horst, que posiblemente formaba parte del “Alto Cananea”, el cual separaba la cuenca Bisbee al norte y una cuenca en el sur-centro de Sonora.

Existen otras fallas en el área de Buenavista Zinc como la **falla Ricketts** y otras fallas más pequeñas que tienen una orientación NW-SE (Figura 3.1). La Falla Ricketts se encuentra cortando a la secuencia paleozoica en el distrito de Cananea (Figura 3.1). Mientras que las fallas NW-SE controlan el emplazamiento de pórfidos y diques de diabasa que afloran con las mismas orientaciones (Valentine, 1932) e indican un régimen tectónico distinto al régimen tectónico que prevaleció al momento de la formación de las fallas Elisa y Capote Pass (Valentine, 1932; Meinert, 1982).

El evento de deformación más reciente del distrito de Cananea son las fallas y fracturas con una orientación N-S y buzamiento hacia el este (Valentine, 1932; Wodziki, 1995). Estas estructuras pertenecen al evento tectónico extensional Cenozoico *Basin and Range*, que provocó un basculamiento de toda la secuencia estratigráfica hacia el este (Meinert, 1982).

3.3 Skarn de Buenavista Zinc

3.3.1 Morfología del depósito tipo skarn

El depósito tipo skarn de Buenavista Zinc se localiza en la secuencia sedimentaria paleozoica. En la Formaciones Abrigo y Escabrosa hay capas con textura de hornfels constituidas por minerales calci-silicatados. Mientras que en el Grupo Naco es donde se localiza la mineralogía del skarn de forma masiva (Meinert, 1982). Dichas rocas mineralizadas contienen granate, piroxeno, wollastonita, epidota, anfíbol, clorita, carbonatos y cuarzo (Ochoa-Landín et al., 2011).

En general el depósito tiene cuatro zonas mineralógicas, las cuales se distribuyen respecto a la falla Elisa (Figura 3.3): 1) granate >>> piroxeno en el contacto con la falla, 2) granate + piroxeno, alrededor de la zona 1 y hacia el SE del depósito, 3) wollastonita + piroxeno + granate, rodeando a la zona 3 hasta el límite sur de los metasedimentos, y 4) cuarzo + anfíbol, cerca del contacto con la falla Elisa (Figura 3.3) (Meinert, 1982; Farfán-Panamá, 2002). La mineralogía del límite del skarn depende de la litología y composición del protolito (Meinert, 1982).

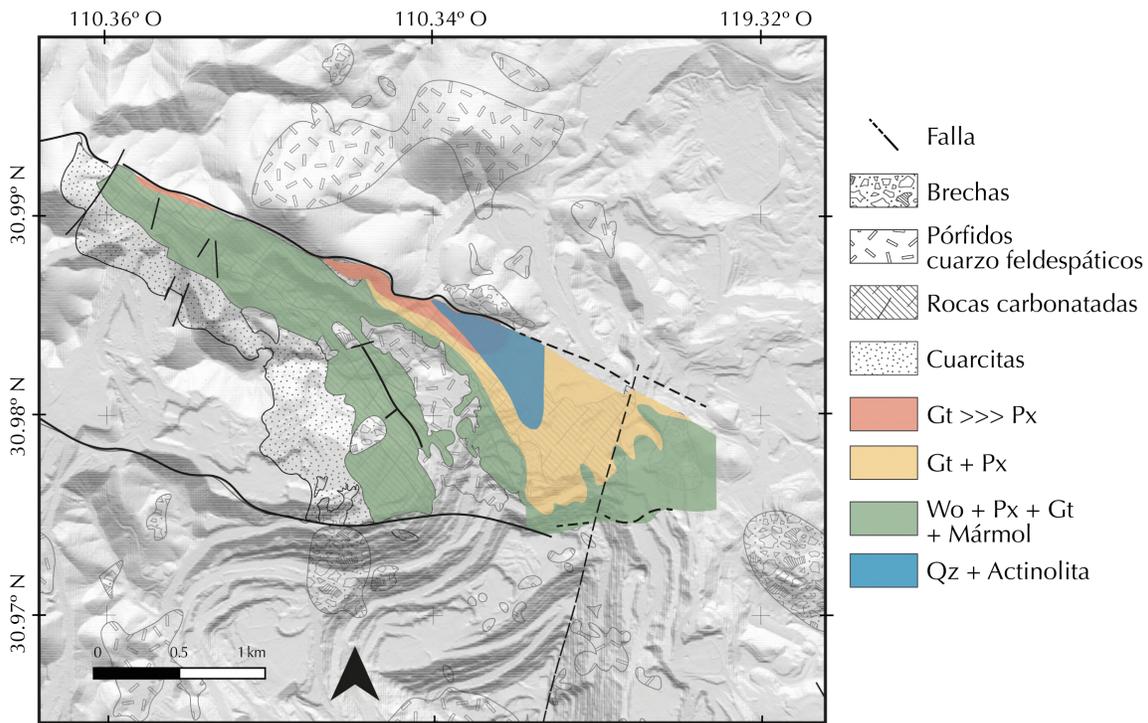


Figura 3.3 Mapa con zoneamiento mineralógico del depósito tipo skarn de Buenavista Zinc. Modificado de Meinert (1982).

En profundidad, el zoneamiento mineralógico se distribuye de acuerdo a la geometría de las formaciones (Figura 3.4): 1) Gt >>> Px en la Formación Escabrosa, en la parte inferior de Grupo Naco y en el centro de la Formación Abrigo, 2) Gt+Px en la parte superior de Grupo Naco, rodeando a Gt >>> Px en la Formación Abrigo y en la base de la Formación Escabrosa, 3) Wo+Px+Gt en el contacto superior de la Formación Abrigo con la Formación Martín y en el contacto inferior de la Formación Escabrosa con la Formación Martín, y 4) Cal+Px en la Formación Martín (Farfán-Panamá, 2002).

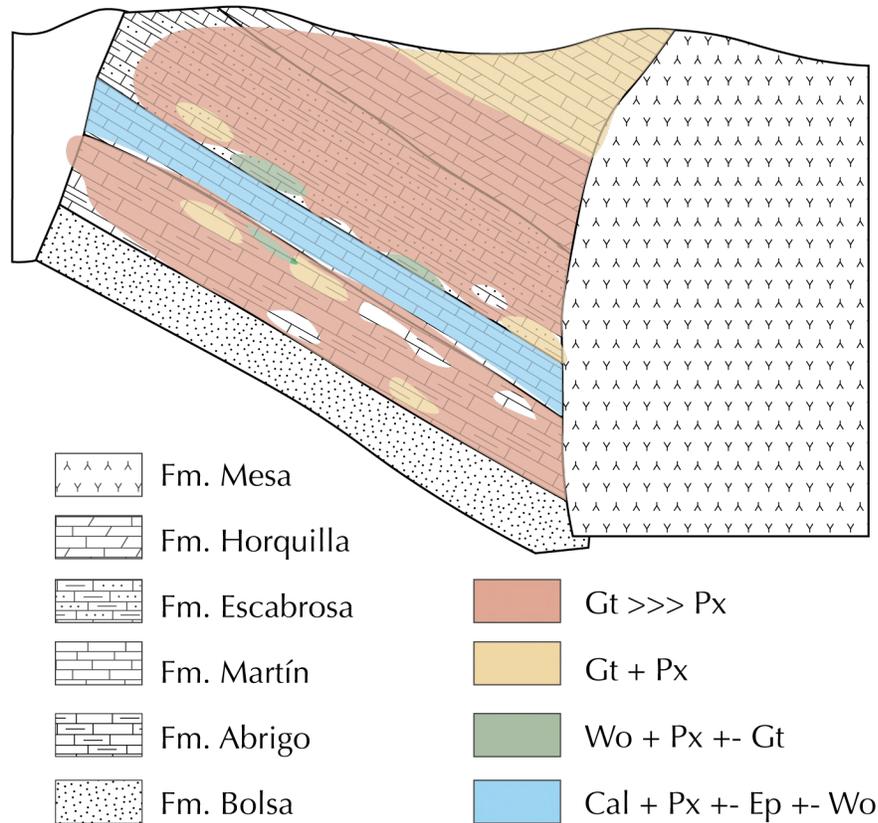


Figura 3.4 Zonamiento mineralógico en profundidad de acuerdo con Farfán-Panamá (2002).

3.3.2 Evolución del depósito

Según Meinert (1982), en el depósito tipo skarn de Beunavista Zinc durante la etapa prógrada se formaron múltiples generaciones de granates y piroxenos, caracterizados por su composición, color y textura. Respecto al granate, aumenta la concentración de hierro respecto al tiempo con cada generación y también hay un cambio de color de pardo a verde-amarillo. La última generación de granate, la más rica en andradita tiene una birrefringencia anómala distintiva en forma de bandas. Por otro lado, los piroxenos tempranos son ricos en manganeso y los tardíos son ricos en hierro, además su distribución espacial es irregular (Meinert, 1982). De acuerdo con el diagrama de T-XCO₂ para el sistema CaO-Al₂O₃-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂, las reacciones analizadas por Farfán-Panamá (2002) indican que el metamorfismo tuvo lugar entre 450° y 590° C, ca. 0.5 kb y a un rango amplio de CO₂, entre 0.92 y 0.06.

Al límite donde se acaba el metamorfismo característico del skarn y empieza la formación de mármoles se le denomina frente del mármol. En Buenavista Zinc, cerca del frente del mármol, la mineralogía del depósito tipo skarn depende del protolito sedimentario. Los nódulos de pedernal tienen anillos de wollastonita, la dolomita está reemplazada por flogopita y magnetita, los hornfels tienen vetas de granate, y el mármol puro está reemplazado por piroxeno rico en Mn y Fe. Hay pirita asociada a las últimas etapas de cristalización de los granates (Meinert, 1982).

La etapa retrógrada se caracteriza por formación de vetas y parches orbiculares de anfíbol, cuarzo y calcita que reemplazan al piroxeno y algunas veces al granate. La mayoría del anfíbol es actinolita y está asociado con pirita y calcopirita (Meinert, 1982).

La alteración posterior a la etapa retrógrada destruye parcialmente la mineralogía del skarn y se asocia con la formación de chimeneas brechosas; lo anterior produce un remplazamiento de granate, piroxeno, anfíbol por óxidos de hierro, sulfuros, carbonatos y minerales hidratados. Por su parte, los carbonatos de los protolitos son reemplazados por mantos masivos de óxidos y sulfuros (Meinert, 1982).

3.3.3 Mineralización

Respecto al depósito tipo skarn, la mineralización hipogénica de los sulfuros se encuentra rodeando a los minerales de ganga, en intersticios, en vetillas y rellenando estructuras brechadas (Meinert, 1982). La distribución de los sulfuros indica que los metales (Fe, Cu, Zn) precipitaron durante la alteración retrógrada del skarn y están asociados al brechamiento (Meinert, 1982).

Cerca de la zona rica en sulfuros, los minerales calci-silicatados se encuentran parcialmente destruidos. La calcopirita está relacionada con la alteración de anfíboles. Además, hay vetas de calcita-calcopirita-pirita o calcopirita-esfalerita-pirita que cortan a los skarns prógrados. También se puede encontrar pirita-calcopirita-esfalerita o bornita en la matriz de calcita que cementa a fragmentos alterados de skarn en las brechas (Meinert, 1982).

Pocos sulfuros están asociados al granate y al piroxeno. Entre 5 y 10% de pirita está asociada al granate en el centro del depósito y como parches irregulares cerca del frente del mármol (Meinert, 1982).

En ausencia de la mineralogía tipo skarn, la mineralización se encuentra en forma de mantos de óxidos de hierro y sulfuros estratiformes. En particular, los mantos se localizan en la Formación Abrigo y en la parte inferior de la Formación Martin, donde están en contacto con brechas, pórfidos cuarzo monzoníticos y en el contacto con la Formación Bolsa (Meinert, 1982).

En las chimeneas brechoides, la mineralización se encuentra asociada con la alteración calcita-clorita-hematita. En estas estructuras, los sulfuros se pueden agrupar en tres tipos: 1) sulfuros de cobre, calcopirita y bornita o pirita; 2) sulfuros de cobre-zinc, esfalerita, calcopirita y pirita; 3) sulfuros de Pb, galena y esfalerita, calcopirita y pirita. La calcopirita es el sulfuro más abundante a profundidad y la pirita en zonas someras del depósito (Meinert, 1982).

Los sulfuros de cobre se distribuyen en el núcleo y en el límite de las brechas, formando una clase de anillos. La distribución de los sulfuros de zinc es más errática, pero se distingue un aumento de estos minerales en zonas distales a las brechas y donde los mármoles no fueron reemplazados por skarns (Meinert, 1982). De acuerdo con el contenido de Cu en calcopirita y de Zn en esfalerita, hay un zoneamiento lateral que obedece a fallas pre-existentes NW-SE. El contenido de Cu aumenta hacia la falla Elisa, mientras que el contenido de Zn lo hace al alejarse de ella (Farfán-Panamá, 2002).

El estudio de los fluidos hidrotermales de Meinert (1982) concluyó que los fluidos responsables de la alteración retrógrada y de la precipitación de los sulfuros, se enfriaron de 400° a 250° C y posteriormente continuo la formación de óxidos de hierro, pero cesó la mineralización. Según Wodziki (1995), las características isotópicas de los fluidos indican que tienen un origen magmático.

Finalmente, Cline (2003) y Valencia-Moreno et al. (2017) estimaron que los magmas basálticos calco-alcalinos relacionados con la subducción de la Placa Farallón debajo de la Placa Norteamericana pudieron suministrar todo el cobre de los grandes depósitos observados en noreste de Sonora, o bien, que una ventana astenósferica permitió el aporte de metales provenientes del manto. Se ha propuesto que, una vez que el cobre es concentrado en la parte superior de una columna de magma, la sobrepresión de fluidos debida a subsecuentes recargas del sistema hidrotermal provoca fracturas del techo de las

rocas encajonates y la descompresión asociada induce la precipitación del cobre como sulfuros de Cu y de Cu-Fe (Cline, 2003; Harris et al., 2003; Valencia-Moreno et al., 2017).

4. Metodología

4.1 Trabajo de campo

Se organizaron dos campañas de campo con el objetivo de coleccionar muestras en los afloramientos, coleccionar muestras de barrenos y tomar datos estructurales. Para empezar en el depósito de Buenavista Zinc se estudió un transecto perpendicular al rumbo de las capas sedimentarias, donde se coleccionaron datos estructurales, así como muestras de cada litología. Igualmente, se tomaron muestras cerca de las fallas Elisa, Ricketts y Capote Pass, así como datos que posiblemente estén asociados con las fallas. Por otro lado, en Puertecitos se analizó un transecto dirección E-W que corta desde la granodiorita Cuitaca, los sedimentos paleozoicos hasta las rocas volcánicas de la Formación Henrietta.

Con ayuda de las bases de datos de barrenos proporcionada por la compañía minera Grupo México, se seleccionaron 19 barrenos de interés, los cuales se revisaron para buscar evidencias de fallas y coleccionar muestras. Dichos barrenos se ubicaron sobre el transecto de Buenavista Zinc para construir una sección geológica con el zoneamiento mineralógico a profundidad, y cerca de la falla Elisa para definir su estructura.

Las muestras para estudiar los depósitos tipo skarn se coleccionaron considerando los cambios mineralógicos que presentan este tipo de yacimientos: dónde se ubica el granate, el piroxeno, la wollastonita, la epidota y los anfíboles. Además de dónde se localizan los sulfuros de cobre, de zinc y los óxidos.

4.2 Análisis estructural

Los datos estructurales recabados en campo y en los barrenos se usaron para realizar secciones perpendiculares a la Falla Elisa. También se utilizaron para definir en general la estructura del depósito de Buenavista Zinc. Se utilizó el programa QGIS versión 3.14 con la herramienta *Geoscience-Drill tools* para visualizar los barrenos y dibujar las secciones.



Figura 4.1 Afloramiento en campo. Integrantes de la compañía minera acompañaron en todo momento a equipo de la UNAM en el trabajo de campo.

Se calculó el echado de las fallas Elisa y Ricketts midiendo gráficamente en las secciones construidas sus echados aparentes. Posteriormente, se calculó el echado real de acuerdo con la fórmula (1), donde α es el ángulo del echado aparente, β el ángulo entre el rumbo del echado aparente y el rumbo de la falla, y δ es el ángulo del echado real:

$$\tan \delta = \frac{\tan \alpha}{\sin \beta} \quad (1)$$

β se midió en el mapa geológico del área de estudio y α en las secciones construidas a partir de los barrenos estudiados.

4.3 Petrografía y minerografía

Se seleccionaron ca. 100 muestras representativas donde hubiera evidencia de las diferentes etapas de alteración, presencia de silicatos de calcio, alteración de los minerales del skarn, presencia de sulfuros o vetillas, con el objetivo de caracterizar la petrografía de las rocas de los depósitos de Buenavista Zinc y Puertecitos. En estas muestras se realizaron laminas delgadas de 30 micras de grosor; si bien, en aquellas donde había sulfuros, también se obtuvieron láminas delgadas pulidas para el estudio de los minerales opacos.

Las láminas delgadas fueron estudiadas en el Laboratorio de Petrografía de la Estación Regional del Noroeste con un microscopio petrográfico de luz transmitida y reflejada modelo Olympus BX51 equipado con cuatro objetivos y cámara fotográfica. Las abreviaturas de los minerales se tomaron de Warr (2021).

Se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) HITACHI modelo TM3030PLUS de la Estación Regional del Noroeste para analizar algunas fases minerales que no fue posible identificar con el microscopio petrográfico. En particular, nos enfocamos en las fases metálicas. Se tomaron imágenes con electrones retrodispersados, se hicieron mapas composicionales y análisis puntuales con el detector EDS (Figura 4.2).

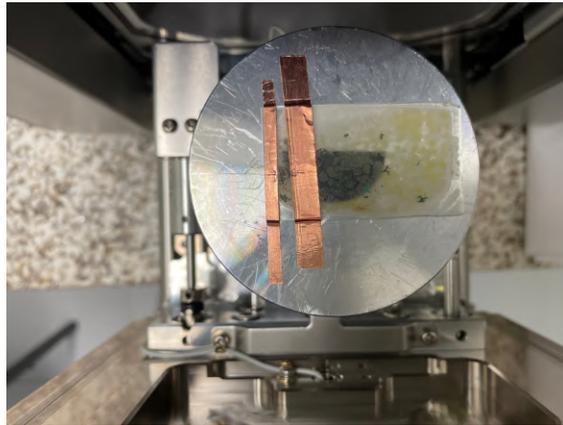


Figura 4.2 Lámina delgada analizada en SEM de la Estación Regional del Noroeste.

4.4 Geoquímica de elementos mayores y traza

Se realizaron análisis geoquímicos de roca total en las muestras del depósito tipo skarn y en las rocas ígneas con el objetivo de buscar una correlación entre las muestras del depósito tipo skarn y los diferentes cuerpos ígneos que posiblemente eran la fuente de calor y fluidos. Concretamente se buscó una relación entre las concentraciones de elementos inmóviles que ayudaran a dilucidar cual era la fuente del skarn. Por consiguiente, se seleccionaron ca. 30 muestras del skarn y de los pórfidos para análisis de elementos mayores y trazas. El volumen de roca utilizado para fines geoquímicos es proporcional al tamaño de los cristales para asegurar la homogeneidad y la representatividad de los resultados, de forma que en rocas de tamaño grueso se tomó ca. 2 kg de muestra y en muestras de grano fino se molieron ca. 300 g.

Las muestras tomadas en superficie fueron descostradas para eliminar la capa de la roca intemperizada. Por otro lado, las rocas de los barrenos no fueron descostradas. Cada muestra se molió y pulverizó en el Laboratorio de preparación de muestras de roca de la Estación Regional del Noroeste y se utilizaron dos viales para guardar cada muestra pulverizada, uno de ellos se mandó a analizar y el otro se guardó como testigo (Figura 4.3).



Figura 4.3 Muestras pulverizadas en viales, realizado en el Laboratorio de preparación de muestras de roca en la Estación Regional del Noroeste.

Las muestras fueron analizadas mediante Fluorescencia de RX para obtener el contenido de elementos mayores de roca total, ICP-MS para el de elementos trazas y tierras raras, digestión con cuatro ácidos e ICP-AES para elementos metálicos y espectroscopia IR para calcular el azufre y carbono total. Todos los análisis se realizaron en el laboratorio comercial ALS Chemex S.A. de C.V. ubicado en Hermosillo, Sonora y analizadas en ALS Vancouver, Canadá. Las condiciones analíticas exactas se muestran en el Anexo 4.

A continuación, se adjunta una relación de las muestras y los análisis que se les realizaron (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Técnicas analíticas aplicadas a las muestras. Petro → petrografía Geoquim → geoquímica SEM → Análisis con microscopio electrónico

Clave	Localidad/Barreno	Profundidad (m)	Litología	Técnicas aplicadas
BD3343	BD3343	300.25 - 301.5	Pórfido	Petro-Geoquim
BD4931	BD4931	128.80 - 130.90	Pórfido	Petro-Geoquim
BD5136	BD5136	223.45 - 225.70	Pórfido	Petro-Geoquim
BD5145	BD5145	181.05 - 183	Pórfido	Petro-Geoquim
BD5555	BD5555	549.85 - 552.65	Pórfido	Petro-Geoquim
BD5562	BD5562	341.6 - 342.85	Pórfido	Petro-Geoquim
BD5565	BD5565	412.95 - 417.85	Pórfido	Petro-Geoquim
BD5569	BD5569	243.45 - 246.5	Pórfido	Petro-Geoquim

Clave	Localidad/Barreno	Profundidad (m)	Litología	Técnicas aplicadas
BD5570	BD5570	394.10 - 396.50	Pórfido	Petro-Geoquim
BD5571	BD5571	234.85-237.05	Pórfido	Petro-Geoquim
BD5583-1	BD5583	395.25 - 396.5	Pórfido	Petro-Geoquim
BD5583-2	BD5583	400.95 - 402.6	Pórfido	Petro-Geoquim
VO-01	Buenavista Zinc		Brecha volcánica	Petro
VO-02	Buenavista Zinc		Pórfido	Petro-Geoquim
VO-03	Buenavista Zinc		Andesita	Petro
VO-04	Buenavista Zinc		Cuarcita	Petro
VO-05	Buenavista Zinc		Mármol	Petro
VO-06	Buenavista Zinc		Mármol	Petro
VO-07A	Buenavista Zinc		Skarn prógrado	Petro
VO-07B	Buenavista Zinc		Skarn prógrado	Petro
VO-08	Buenavista Zinc		Pórfido	Petro-Geoquim
VO-09	Puertecitos		Granodiorita	Petro
VO-09A	Puertecitos		Granodiorita	Petro-Geoquim-SEM
VO-09B	Puertecitos		Endoskarn	Petro-Geoquim
VO-09C	Puertecitos		Aplita	Petro-Geoquim
VO-10	Puertecitos		Hornfels	Petro
VO-11	Puertecitos		Mármol	
VO-11A	Puertecitos		Hornfels	Petro-Geoquim
VO-12	Puertecitos		Skarn prógrado	Petro
VO-13	Puertecitos		Pórfido	Petro-Geoquim
VO-14	Puertecitos		Lutita	Petro
VO-15	Puertecitos		Skarn prógrado	Petro
VO-16	Puertecitos		Skarn prógrado	Petro
VO-16A	Puertecitos		Skarn prógrado	Petro-SEM
VO-16B	Puertecitos		Skarn prógrado	Geoquim
VO-17	Puertecitos		Brecha volcánica	Petro
VO-18	Puertecitos		Toba dacítica	Petro
VO-19	Buenavista Zinc		Dacita	Petro
VO-20	Buenavista Zinc		Dacita	
VO-21	Buenavista Zinc		Brecha volcánica	Petro
VO-22	Buenavista Zinc		Pórfido	Petro
VO-23	Buenavista Zinc		Lutita carbonatada	Petro
VO-24	Buenavista Zinc		Skarn prógrado	Petro
VO-25	Buenavista Zinc		Pórfido	Petro-Geoquim
VO-26	Buenavista Zinc		Roca de falla	
VO-27	Buenavista Zinc		Mármol	Petro-Geoquim
VO-28	Buenavista Zinc		Skarn retrógrado	Petro-Geoquim

Clave	Localidad/Barreno	Profundidad (m)	Litología	Técnicas aplicadas
VO-29	Buenavista Zinc		Skarn prógrado	Petro-Geoquim-SEM
VO-30	Buenavista Zinc		Hornfels	Petro
VO-31A	Buenavista Zinc		Hornfels	Petro
VO-31B	Buenavista Zinc		Skarn prógrado	Petro-SEM
VO-33	Buenavista Zinc		Skarn prógrado	Petro-Geoquim-SEM
VO-34	Buenavista Zinc		Skarn prógrado	Petro-Geoquim
VO-35	Buenavista Zinc		Mármol	Petro-Geoquim
VO-36	Buenavista Zinc		Skarn prógrado	Petro-Geoquim
VO-37	Buenavista Zinc		Skarn retrógrado	Petro
VO-38	Buenavista Zinc		Skarn retrógrado	Petro
VO-39	Buenavista Zinc		Andesita	Petro
VO-40	Buenavista Zinc		Skarn prógrado	Petro-Geoquim-SEM
VO-41	BD4558	368-371	Pórfido	Petro
VO-42	BD4558	382-385	Brecha mineralizada	Petro
VO-43	BD4558	390-394	Brecha mineralizada	Petro
VO-44	BD4558	401-404	Brecha mineralizada	Petro
VO-45	BD4558	427-229	Mármol	Petro
VO-46	BD5112	275	Pórfido	Petro
VO-47	BD4983	590-600	Pórfido	Petro
VO-48	BD4990	79-84	Dacita	Petro
VO-49	BD4983	480-488	Pórfido	Petro-Geoquim
VO-50	BD4990	8	Dacita	Petro
VO-51	BD4990	9	Dacita	Petro
VO-52	BD4990	14-18	Dacita	Petro
VO-53	Buenavista Zinc		Toba dacítica	Petro
VO-54	Buenavista Zinc		Micrita arcillosa	Geoquim
VO-55	BD4706	646	Micrita arcillosa	Petro-Geoquim
VO-56	BD4706	672	Skarn prógrado	Petro-SEM
VO-57	BD4706	685-690	Mármol	Geoquim
VO-58	BD4706	691-694	Mármol	Petro
VO-59	BD5109	53-55	Andesita	Petro-Geoquim
VO-60	BD5109	63-65	Andesita	Petro-Geoquim
VO-61	BD5109	122	Skarn prógrado	Petro-Geoquim
VO-62	BD5109	161	Skarn prógrado	Geoquim
VO-63	BD5109	190	Skarn prógrado	Petro-Geoquim
VO-64	BD5158	81-83	Skarn prógrado	Geoquim
VO-65	BD5158	180	Skarn retrógrado	Petro
VO-66	BD5158	229	Micrita arcillosa	Geoquim
VO-67	BD5158	315	Skarn prógrado	Petro-Geoquim-SEM

Clave	Localidad/Barreno	Profundidad (m)	Litología	Técnicas aplicadas
VO-68	BD5158	316	Skarn prógrado	Petro-SEM
VO-69	BD5158	317	Mármol	Geoquim
VO-70	BD5158	350	Skarn retrógrado	Geoquim
VO-71	BD5158	368	Skarn retrógrado	Geoquim
VO-72	BD5143	59	Skarn retrógrado	Petro
VO-73	BD5143	49	Skarn prógrado	Petro-Geoquim
VO-74	BD5143	80	Skarn prógrado	Petro
VO-75	Buenavista Zinc		Dique diabasa	Petro-Geoquim
VO-76	BD5143	87	Skarn prógrado	
VO-77	BD5143	98	Skarn prógrado	Geoquim
VO-78	BD5143	162	Skarn retrógrado	Petro-Geoquim
VO-79	BD5143	199	Skarn prógrado	Geoquim
VO-80	BD5143	267	Skarn retrógrado	Petro-Geoquim-SEM

5. Resultados

En este capítulo se presentan, en primer lugar, los resultados de la geología estructural del depósito de Buenavista Zinc, para establecer la geometría espacial de las rocas que conforman el depósito tipo skarn. En segundo lugar, se describe la petrografía y el zoneamiento mineral y metálico del skarn de Buenavista Zinc y del skarn de Puertecitos. Finalmente, se presentan los resultados geoquímicos de 50 rocas de los dos skarns y de los pórfidos del área de estudio.

5.1 Estructura del área Buenavista Zinc

Se realizó un mapa de la cuenca paleozoica donde se aloja el skarn de Buenavista Zinc apoyándose en trabajo de campo y la literatura disponible. También se construyeron varias secciones geológicas con la información colectada en algunos barrenos seleccionados y con la información de las últimas campañas de barrenación proporcionadas por Grupo México. Al norte, el depósito de Buenavista Zinc está delimitado por la falla inversa Elisa con dirección NW-SE (Figura 5.1). Al norte de esta falla aflora la Formación Henrietta. Al sur, el depósito de Buenavista Zinc está delimitado por la falla Capote Pass (Figura 5.1). De rumbo casi E-W, la falla Capote Pass es una falla normal con echado hacia el sur que pone en contacto el granito Cananea y la secuencia sedimentaria paleozoica al norte y la Formación Henrietta al sur (Figura 5.1 y 5.2D). Al sureste de Buenavista Zinc, se infería anteriormente que la falla Capote Pass estaba cubierta por rocas volcánicas. Sin embargo, el descapote del área durante los últimos años ha permitido a la secuencia sedimentaria paleozoica aflorar (Figura 5.1). La secuencia paleozoica continua debajo de la Formación Mesa hacia el este como lo indican los barrenos de la compañía minera que han perforado la secuencia paleozoica debajo de las rocas volcánicas (Figura 5.1 y 5.3).

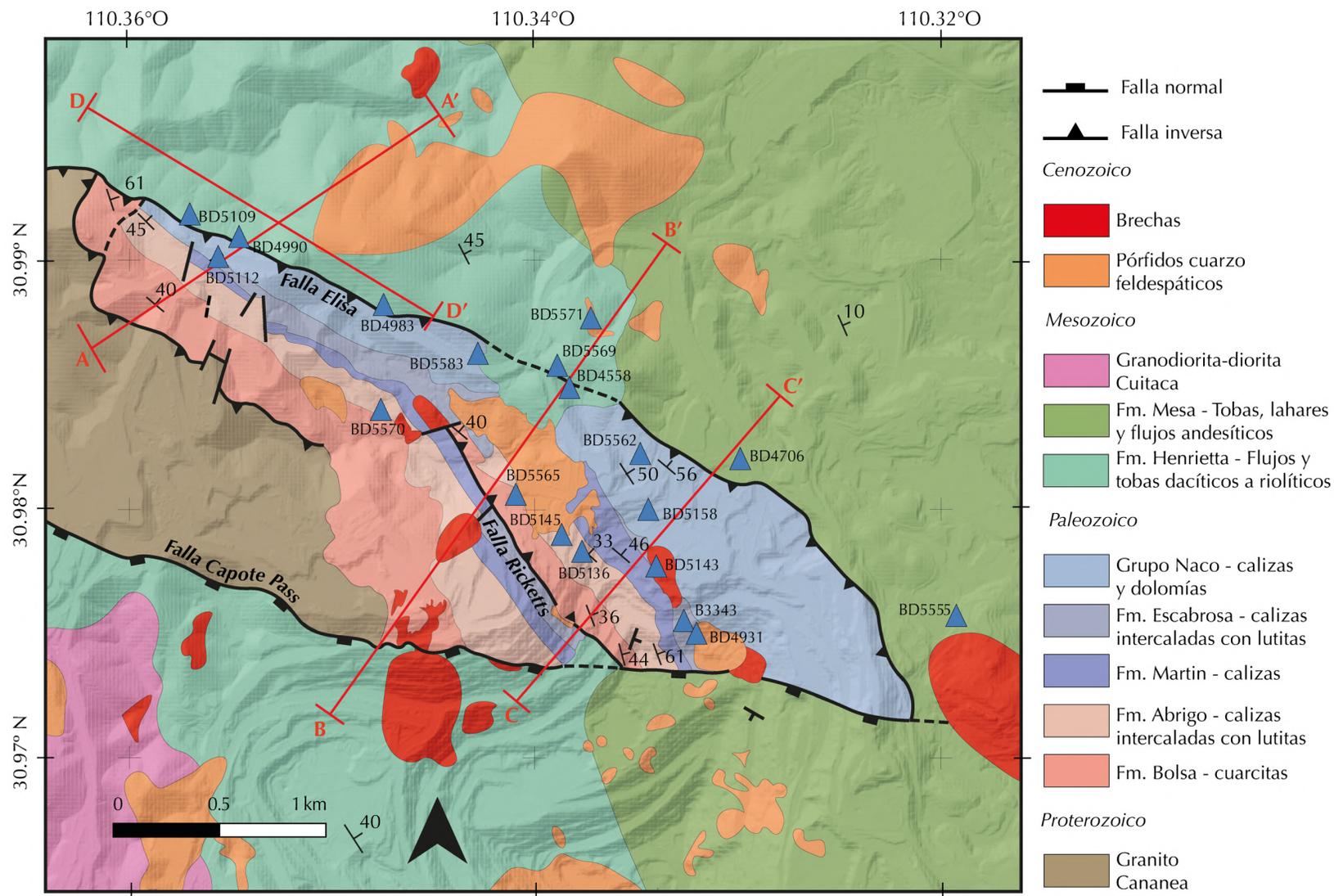


Figura 5.1. Mapa litológico del yacimiento de Buenavista Zinc actualizado con los datos de este estudio. Con triángulos azules se indica la localización de los barrenos revisados en este estudio. Las líneas rojas indican las secciones geológicas construidas con la información de los barrenos indicados y con la base de datos de la compañía minera. Mapa modificado de Meinert (1982) y Bushnell (1988).

La falla Elisa se expresa en campo como una zona de intensa deformación frágil con salvanda de falla (Figura 5.2A) en el contacto entre las rocas volcánicas al norte y la secuencia paleozoica de la cuenca al sur. Es una falla inversa de alto ángulo con un rumbo WNW-ESE (Figura 5.1). El echado fue deducido a partir de la observación de los barrenos y de todas las secciones (Figura 5.3). Tiene una inclinación cercana a la vertical con un ángulo de 85° hacia el SW. En los barrenos, la falla Elisa se encuentra como una zona frágil de 20 a 30 m de ancho desarrollada entre las rocas volcánicas y las sedimentarias y caracterizada por un brechamiento y reducción de tamaño de grano. También se encontraron cuerpos magmáticos sin rasgos de deformación que cortan la falla Elisa y, por tanto, la deformación que generó la falla es anterior a los cuerpos intrusivos del área de Buenavista Zinc.

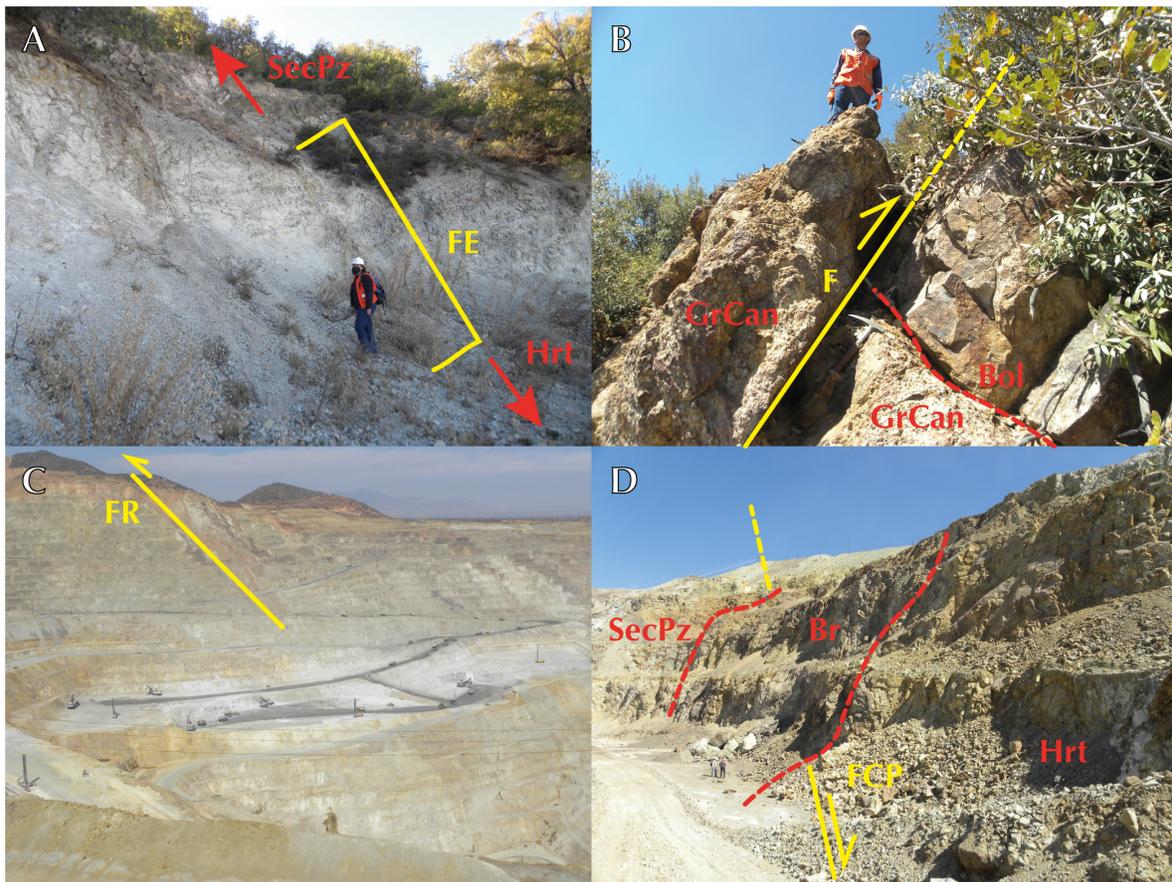


Figura 5.2 Fallas en el área de estudio a escala de afloramiento. A) Zona de falla Elisa (FE) con salvanda de falla. Al sur aflora la secuencia carbonatada paleozoica (SecPz) y al norte aflora las rocas volcanosedimentaria de la formación Henrietta (Hrt). B) Cabalgamiento de Granito Cananea (GrCan) sobre Cuarcita Bolsa (Bol), así como la discordancia de la Cuarcita Bolsa sobre el Granito Cananea. C) Vista panorámica del tajo, donde se observa la falla Ricketts (FR). Dicha falla es inversa y pone en contacto a la cuarcita Bolsa en el este (derecha en la fotografía) con la formación Escabrosa al oeste

(izquierda en la fotografía). D) Falla Capote Pass (FCP) cortada por una brecha mineralizada (Br). Al noreste aflora la secuencia sedimentaria paleozoica (SecPz) y al suroeste en el mismo nivel afloran las rocas volcánicas de la formación Henrietta (Hrt).

Al noroeste el depósito de Buenavista Zinc se encuentra una falla inversa de alto ángulo, de rumbo NW60SE con un echado de 66° hacia el SW, a lo largo de la cual el granito Cananea se encuentra sobre la Formación Bolsa (Figura 5.2B). En otras palabras, este cabalgamiento sobrepone el basamento cristalino sobre las rocas sedimentarias que lo cubren estratigráficamente.

En el depósito de Buenavista Zinc la secuencia sedimentaria paleozoica presenta un rumbo WNW-WSE en la parte noroeste del depósito y NW-SE en su parte sureste, (Figura 5.1) y sus echados varían entre 30° y 60° hacia el NE. En las secciones A-A' y D-D' (Figura 5.3 y 5.4) se muestra que debajo de la Formación Henrietta se encuentra la secuencia paleozoica a diferentes profundidades. El cambio de rumbo de la secuencia ocurre aproximadamente a nivel de la falla inversa Ricketts (Figura 5.1 y 5.2C). Por su carácter inverso la falla Ricketts repite en la parte central del depósito de Buenavista Zinc la totalidad de la secuencia paleozoica, desde la base (Formación Bolsa) hasta la cima (Formación Naco) (Figura 5.3). La secuencia paleozoica en la parte sureste del depósito se encontraba cubierta por la Formación Mesa anteriormente (Figura 5.1). El rumbo y echado de la secuencia paleozoica sigue siendo consistente al oeste, (B-B' y C-C' en Figura 5.3). Por el tipo de litología y escasez de afloramientos, es difícil identificar las formaciones Escabrosa y Naco en superficie, sin embargo, en los barrenos se observan estas formaciones en la zona NE del depósito, hasta 200 m de profundidad (sección C-C', Figura 5.3).

Los pórfidos y las brechas cenozoicas que afloran en el distrito cortan a las fallas principales de acuerdo con la información de los barrenos (Figura 5.3). El área cubierta por el pórfido que aflora casi en el centro de Buenavista Zinc es menor de lo que se reportaba en trabajos previos (Meinert, 1982). Abajo de la secuencia sedimentaria, los barrenos BD5112 y BD4983 (Figura 5.3 sección A-A', Figura 5.4 sección D-D') cortan un cuerpo ígneo de grano fino en muestra de mano y holocristalino en lámina delgada con una textura distinta a los intrusivos que afloran en superficie.

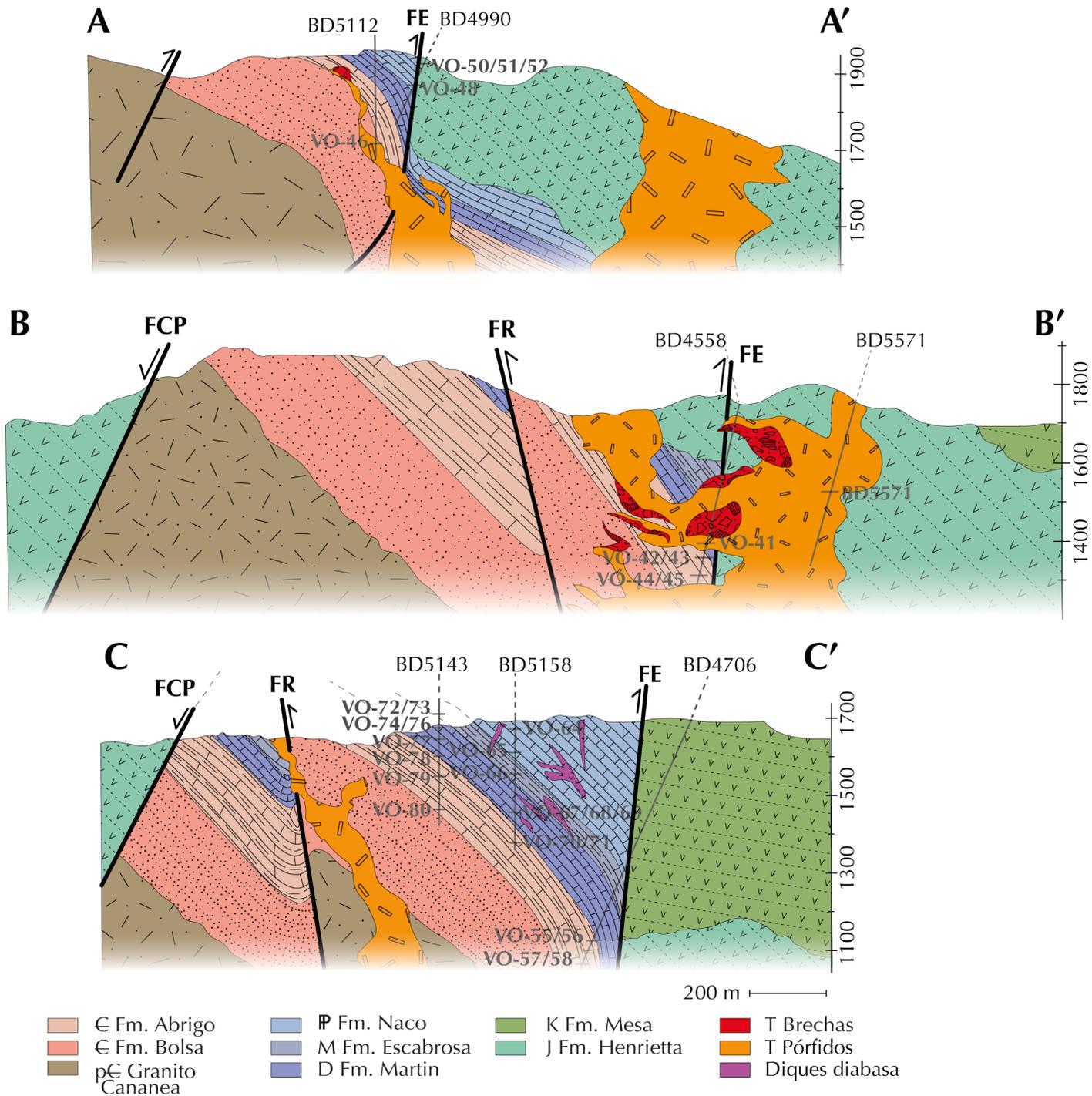


Figura 5.3 Secciones geológicas del depósito Buenavista Zinc. Se marcan los barrenos que se revisaron en este estudio. Barrenos de la compañía minera utilizados en la construcción de las secciones se muestran en Anexo 1. Misma escala vertical y horizontal, se indica altura en msnm. FE→falla Elisa FCP→falla Capote Pass FR→falla Rickets pC→Precámbrico C→Cámbrico D→Devónico M→Mississípico IP→Pennsylvánico J→Jurásico K→Cretácico T→Cenozoico

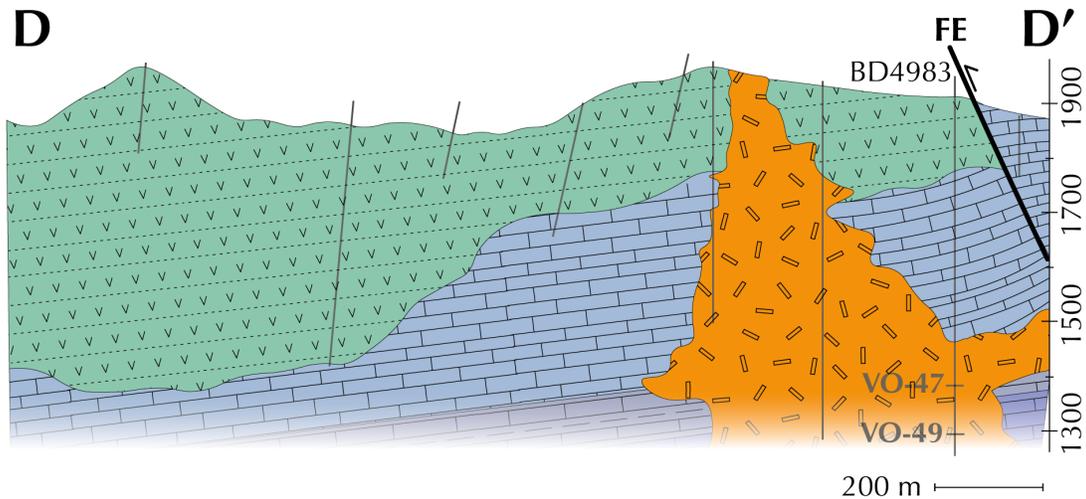


Figura 5.4 Reconstrucción del paleorelieve debajo de la Fm. Henrietta en corte D-D' subparalelo a la falla Elisa. Orientación de transecto indicado en la Figura 5.2.

5.2 Skarn de Buenavista Zinc

El estudio petrográfico fue fundamental para estudiar las paragénesis de las rocas afectadas por metamorfismo de contacto y por hidrotermalismo. Dicho estudio permitió determinar la paragénesis del depósito. Para este estudio se analizaron 72 láminas delgadas con luz transmitida y 15 láminas con luz reflejada. Además, se analizaron 9 láminas por microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés). La descripción de cada lámina delgada se encuentra en el Anexo 2.

A continuación, se presenta una descripción petrográfica detallada de cada formación estudiada en Buenavista Zinc, a partir de las muestras colectadas en superficie y en barrenos a profundidad.

5.2.1 Petrografía de unidades asociadas al depósito

La **Formación Bolsa** sirve para identificar la base de la secuencia sedimentaria paleozoica. En afloramiento se observan cuarcitas de grano medio, estratificadas, con rumbo NW-SE y echado hacia el NE. Los estratos miden aproximadamente 1m de grosor y se observan variaciones en el grado de alteración que se manifiestan por un color más verde en muestras de mano (Figura 5.5A).

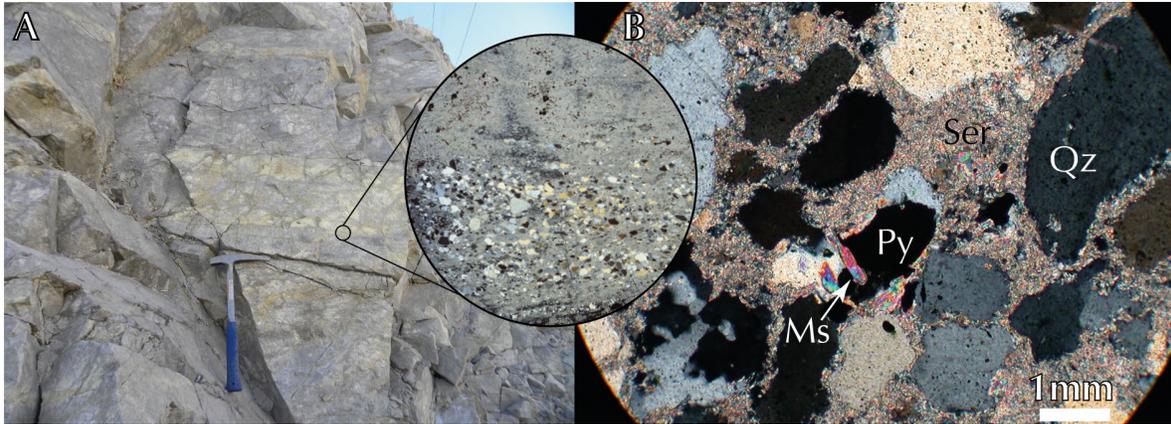


Figura 5.5 Cuarcitas de la Formación Bolsa. A) Foto de un afloramiento típico con estratos de espesor métrico y estratos con alteración preferencial de color verde. El círculo muestra el escaneo de una lámina delgada (muestra VO-04), el cual indica que el cambio de color se debe a una mayor alteración sericítica. También se observa la orientación preferencial de granos. B) Fotomicrografía de la muestra VO-04 con XPL. Textura en la zona con mayor tamaño de grano. Nótese que la pirita (Py) está en equilibrio con la sericita (Ser) de la matriz. Cristales de muscovita (Ms) crecieron en contacto con la pirita. En la esquina inferior izquierda se observa cuarzo (Qz) policristalino con formación de subgranos y migración de bordes.

En lámina delgada, la Formación Bolsa presenta una textura granoblástica formada por clastos angulosos de cuarzo y feldespato de grano medio, con orientación preferencial, bordes en desequilibrio y extinción ondulante (Figura 5.5B). La zona más alterada se manifiesta con por mayor cantidad de sericita, cristales de cuarzo más pequeños y la presencia de micas blancas (Figura 5.5A). También contiene cristales diseminados de forma tabular que fueron remplazados por minerales opacos y titanita con bordes irregulares. También hay presencia de vetillas de cuarzo de grano medio de unos milímetros de grosor. La **Formación Abrigo** está constituida por calizas de entre 20 y 50 cm de espesor, intercalados con estratos de lutitas, con un espesor máximo de 10 cm (Figura 5.6A). En muestra de mano se observa abundante contenido de sulfuros, principalmente pirita cúbica de máximo 10 mm de diámetro. También, en el techo de la Formación Abrigo se distingue un horizonte de magnetita masiva de un par de metros de ancho con vetas de pirita y cuarzo y halos de hematita, que adquieren una tonalidad rojiza característica (Figura 5.6B).

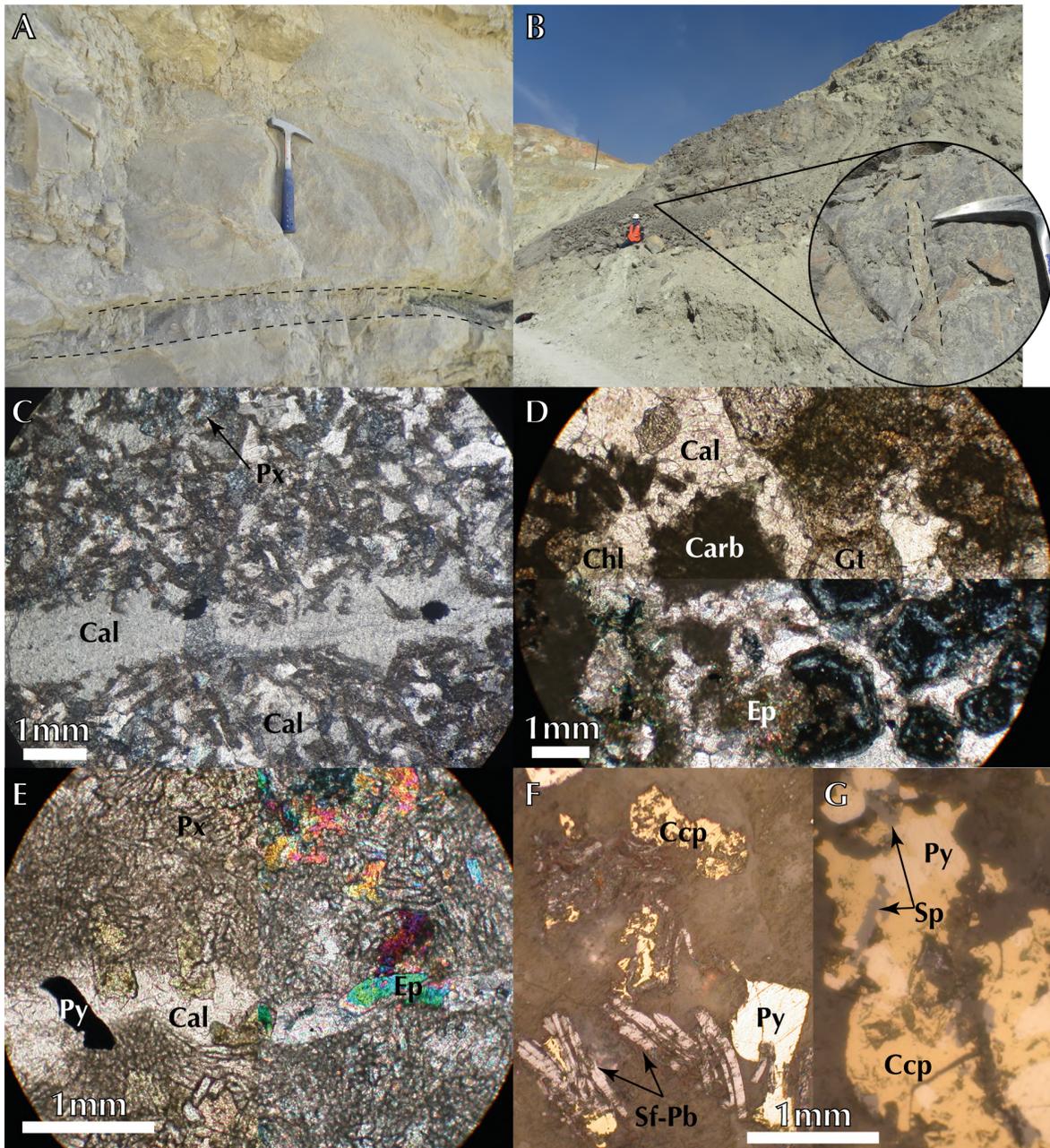


Figura 5.6 Rocas de la Formación Abrigo. A) Foto de afloramiento con estratificación típica. Se resalta con línea punteada la intercalación de lutitas. B) Horizonte de magnetita. Se ubica en la cima de la Formación Abrigo. La alteración a hematita causa el color rojizo. El círculo muestra un acercamiento a las vetas de pirita y cuarzo que cortan al horizonte de magnetita. C) Fotomicrografía con XPL de la muestra VO-05. Mármol con piroxeno (Px) y veta de calcita (Cal) con sulfuros. D) Fotomicrografía con PL (arriba) y XPL (debajo) de muestra VO-29. Cristales de granate (Gt) con birrefringencia anómala reaccionando a epidota (Ep) dentro de la matriz de calcita (Cal) y carbonatos criptocristalinos (Carb) con bordes reaccionando a clorita (Chl). E) Fotomicrografía en PL (izquierda) y XPL (derecha) de la muestra VO-29. Se observa una zona con una matriz de piroxeno (Px) reaccionando a epidota (Ep) y una veta de calcita (Cal) y pirita (Py). F) Fotomicrografías con luz reflejada de la muestra VO-29. Se observan cristales de una sulfosal de plomo (Sf-Pb) con hábito tabular, puede ser boulangerita o bournonita, en contacto con calcopirita (Ccp). G) Fotomicrografía con luz reflejada de muestra VO-29. Se observa el intercrecimiento de pirita (Py), calcopirita (Ccp) y esfalerita (Sp).

De acuerdo con las láminas delgadas, hacia el sur, la formación Abrigo está conformada por mármoles con piroxeno, wollastonita y óxidos de hierro cortados por vetillas de calcita y sulfuros (Figura 5.6C). Se observa calcita de grano medio, subhedrales y cristales de piroxeno anhedrales, más pequeños y diseminados; así como cristales accesorios de wollastonita de grano fino con hábito tabular. Si bien, hacia el norte de la Formación Abrigo se observan lentes de calcita subhedral con granate euhedral y con birrefringencia anómala (Figura 5.6D) en una matriz de piroxeno de grano fino (Figura 5.6E). Todo ello reemplazado por epidota, clorita y carbonatos criptocristalinos (Figura 5.6D y 5.6E). También hay cristales más pequeños diseminados de pirita, calcopirita, una sulfosal de Pb y esfalerita en una matriz de arcillas (Figura 5.6F y 5.6G). Por último, todo es cortado por dos generaciones de vetas: i) vetas de calcita, epidota, pirita y calcopirita ii) vetas de calcita.

La **Formación Martín** se distingue en el campo como un mármol de grano grueso, en estratos de alrededor de 1 m de grosor, con poca mineralización, y con lentes de color verde de centímetros de extensión (Figura 5.7A). El contacto entre la Formación Martín y la Formación Escabrosa no es claro en superficie, aunque en algunos puntos se distingue el techo de la Formación Martín por el aumento en la cantidad de sulfuros asociados a la Formación Escabrosa o por la presencia de intercalaciones con lutitas, características de la Formación Escabrosa.

En lámina delgada, los mármoles de la Formación Martín están conformados por calcita subhedral con contactos rectos y puntos triples y granates euhedrales con reemplazamiento de su núcleo por calcita (Figura 5.7B). Además, algunas láminas contienen piroxeno y wollastonita reemplazados parcialmente por epidota, lo que otorga un aspecto verdoso en muestra de mano (Figura 5.7C). Estas rocas también presentan cristales diseminados pequeños de pirita y calcopirita con inclusiones de esfalerita. Las vetillas están conformadas por wollastonita, cristales euhedrales de pirita, subhedrales de calcopirita, esfalerita y en menor cantidad galena (Figura 5.7D).

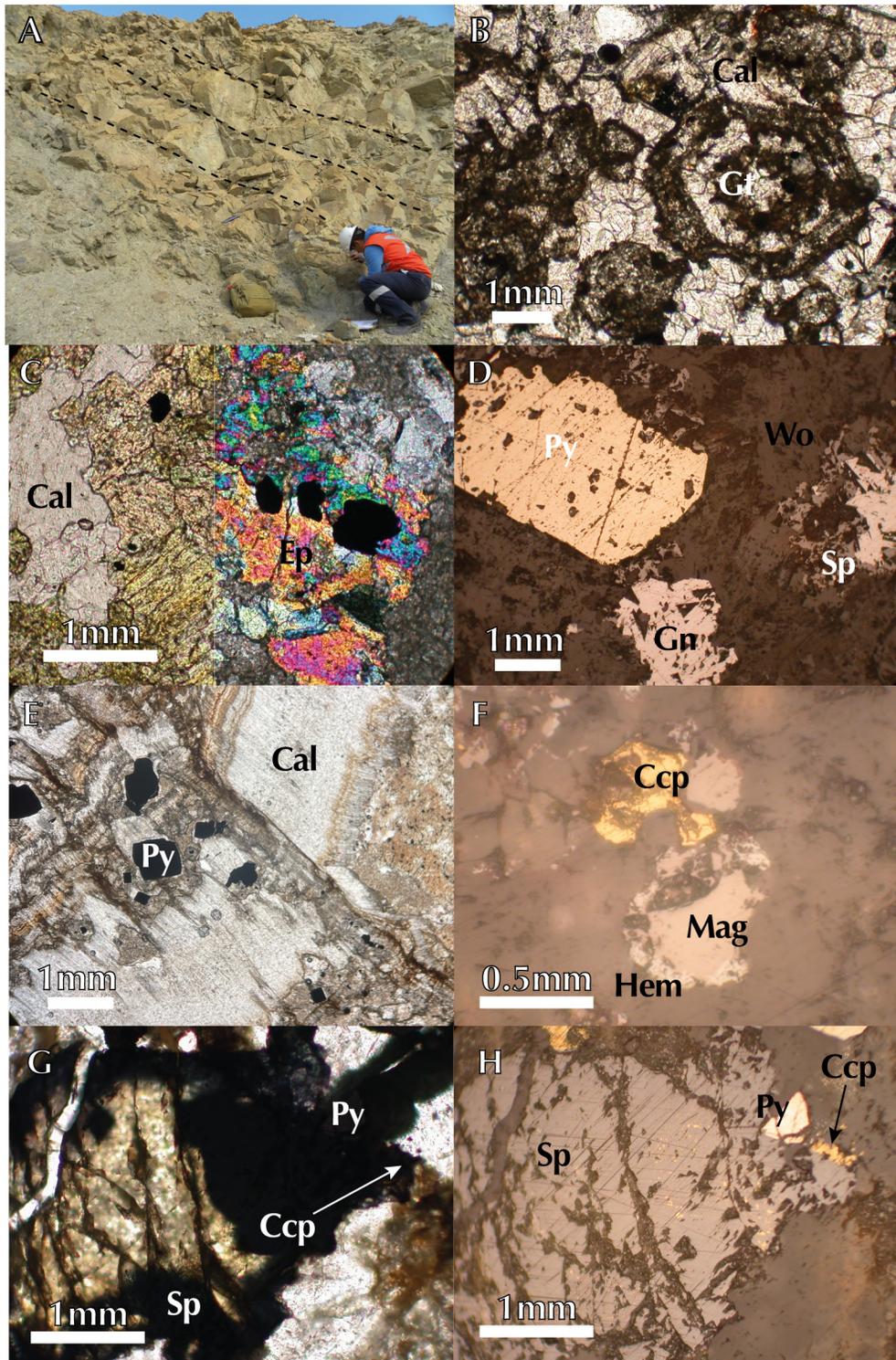


Figura 5.7 Rocas de la Formación Martín. A) Foto de un afloramiento donde se indica con línea punteada los planos de estratificación. B) Fotomicrografía de la muestra VO-72 con PL. Matriz de calcita (Cal) y cristales de granate (Gt) que fueron reemplazados por calcita (Cal). C) Fotomicrografía muestra VO-07 Se observan cristales de calcita (Cal), epidota (Ep). D) Fotomicrografía de la muestra VO-34 con luz reflejada. Veta con matriz de wollastonita (Wo) con cristales de pirita (Py), galena (Gn) y esfalerita (Sp). Hay alteración posterior a hematita en los bordes de los sulfuros. E) Fotomicrografía de la muestra VO-67 con PL. Veta de calcita (Cal) con habito fibroso que corta a veta rica en sulfuros. F) Fotomicrografía muestra VO-68 con luz reflejada.

Cristales diseminados de magnetita con corona de hematita. G) Fotomicrografía muestra VO-68 con PL. Cristal de esfalerita con zona translúcida y zona opaca. Pirita y calcopirita se observan como cristales opacos. H) Fotomicrografía muestra VO-68 con luz reflejada. Dentro cristal de esfalerita se observan inclusiones de calcopirita.

En el barreno BD5158 una zona con altas concentraciones de Zn se ubicó dentro de la Fm. Martín a 300 m de profundidad. En el límite de esta zona rica en Zn hay rocas de grano fino de color verde oscuro conformadas por una asociación de Cal+Chl+Ser (Figura 5.7E). Hay dos generaciones de vetas. La primera generación de vetas tiene de 2 a 3 cm de grosor, y están constituidas por Cal+Ap+Py+Sp, con escasa esfalerita. La segunda generación de vetas está conformada por calcita con textura fibrosa y no contienen minerales metálicos (Figura 5.7E). En la zona con mayor concentración de zinc la asociación mineral presente es Cal+Py+Ccp+Sp+Mag. Destaca la presencia de magnetita que se distribuye en forma de lentes reemplazada por hematita (Figura 5.7F). La esfalerita es de color miel en muestra de mano y el sulfuro más abundante es la pirita (Figura 5.7G y H).

La **Formación Escabrosa** fue difícil de identificar en campo, ya que como ocurre en la Formación Abrigo, está compuesta por carbonatos arcillosos. En campo se observa después de la Formación Martín un aumento en la cantidad de sulfuros diseminados y una alteración a óxidos de hierro asociada con la Formación Escabrosa.

El **Grupo Naco** está conformado por la Formación Horquilla y la Formación Naco. Juntas conforman el segmento más potente de la secuencia paleozoica y hospedan el mayor desarrollo del depósito tipo skarn (Meinert, 1982). El Grupo Naco está conformado por calizas y dolomías masivas que reaccionaron para formar el skarn. Las rocas de la Formación Naco son granofelsitas calci-silicatadas con diferentes proporciones de granate marrón claro y piroxeno de color verde oscuro. También se observan vetas de calcita y parches de hematita formada por alteración de pirita.

En la Formación Naco varía el tamaño de los cristales de granate: desde cristales euhedrales pequeños en una matriz de calcita y cuarzo (Figura 5.8A), hasta cristales anhedrales de grano grueso que conforman más del 90% de la roca (Figura 5.8E). Destaca la ausencia de piroxenos. Se observan unas texturas porfidoblásticas con una matriz de Qz+Cal (Figura 5.8A), el cuarzo tiene evidencias de deformación como extinción ondulante y migración de

bordes; también texturas granoblásticas; texturas de reemplazamiento de los silicatos cálcicos y sulfuros por arcillas y óxidos de hierro rojizos (Figura 5.8B).

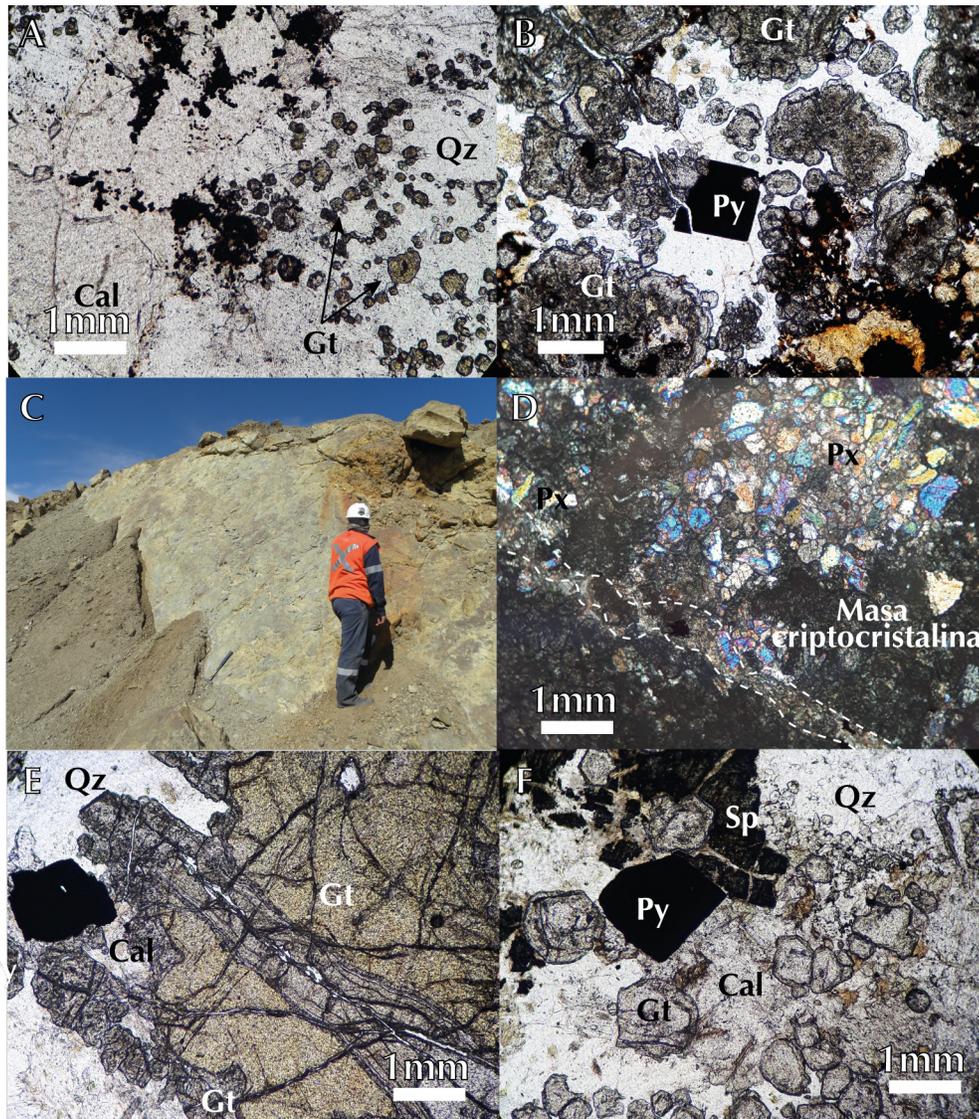


Figura 5.8 Rocas de Grupo Naco. A) Fotomicrografía de la muestra VO-24 con PL. Matriz de calcita (Cal) y cuarzo (Qz) con cristales euhedrales de granate (Gt). B) Fotomicrografía de la muestra VO-33 con PL. Matriz de cuarzo y cristales de granate (Gt) subhedrales asociado con cristales euhedrales de pirita (Py). C) Foto de afloramiento donde se colectó la muestra VO-40. Se observa un plano de falla. D) Textura granoblástica formada por piroxeno (Px) reaccionando a una masa criptocristalina de carbonatos a la derecha. También se observa una veta con sulfuros que corta a los cristales de piroxeno con línea punteada. E) Cristales de grano grueso de granate verde (Gt) con sobrecrecimiento de granate gris. Hay cuarzo (Qz) y calcita (Cal) de forma intersticial asociados con pirita (Py). F) Matriz de cuarzo (Qz) y calcita (Cal) con esfalerita (Sp), pirita (Py) y cristales de granate euhedrales (Gt) con birrefringencia anómala.

Algunas muestras también presentaron dos dominios diferentes: el primero está conformado por cristales de piroxeno de grano fino con calcita intersticial (Figura 5.8D), mientras que el otro dominio se caracteriza por cristales de granate de grano grueso que muestran

zoneamiento caracterizado por variaciones de color (Figura 5.8E), los cristales de granate presentan un color verde-amarillento en el núcleo y un color gris en los bordes (Figura 5.8E). También se observaron texturas de desequilibrio como epidota reaccionando con el piroxeno y el granate. La roca calci-silicatada está cortada por vetas de calcita, cuarzo piritita, esfalerita y hematita (Figura 5.8F).

Cerca del contacto entre la Fm. Mesa y las rocas carbonatadas del Grupo Naco se encuentra una litología con una textura diferente a las presentadas anteriormente: son rocas de grano fino y color verde oscuro en muestra de mano. En campo no hubo evidencias que ayudaran a definir su protolito y se le denominó *hornfels calci-silicatado*.

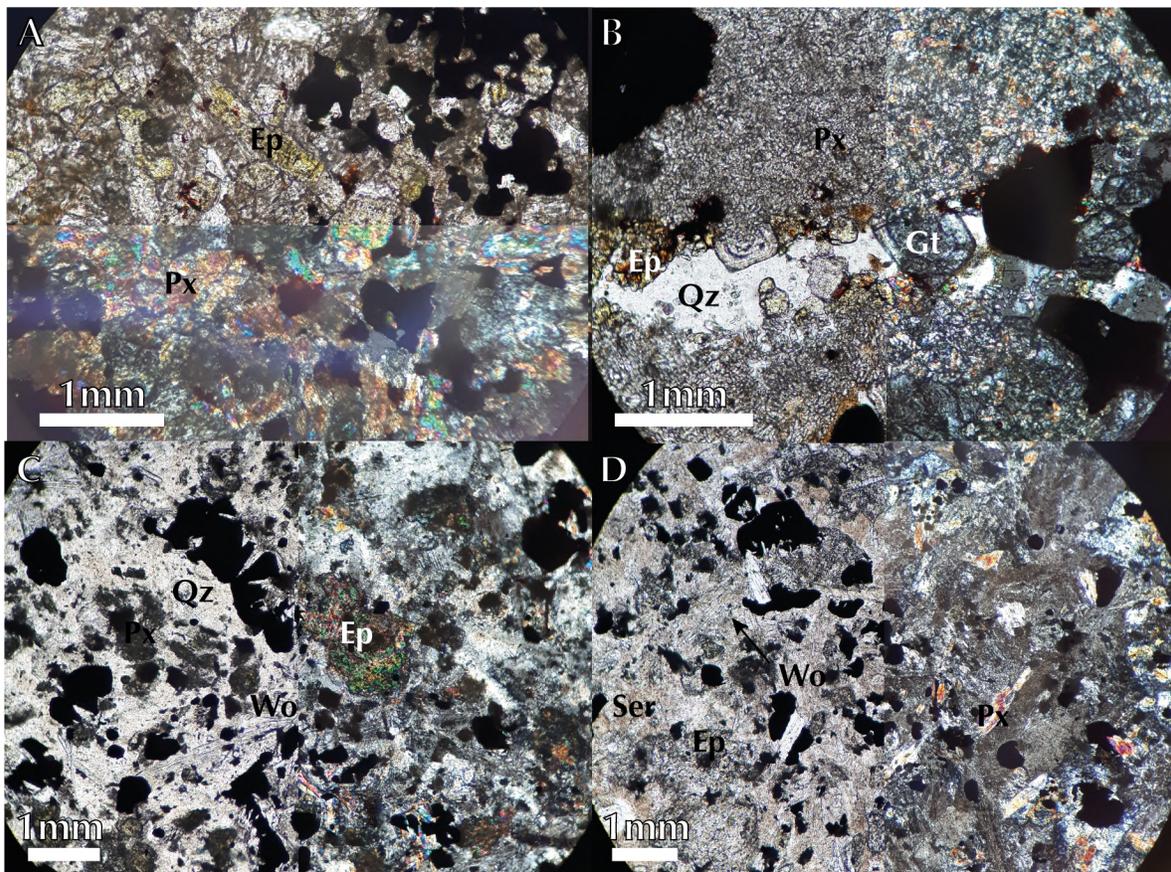


Figura 5.9 Rocas tipo *hornfels calci-silicatado*. A) Fotomicrografía de la muestra VO-31B con PL (arriba) y XPL (abajo). Se presentan cristales anhedrales de piroxenos (Px) reemplazados parcialmente por epidota (Ep) y sulfuros intersticiales. B) Fotomicrografía de la muestra VO-36 con PL (izquierda) y XPL (derecha). Se observa una matriz de piroxeno (Px) y sulfuros cortada por una veta de cuarzo (Qz), granate (Gt) y epidota (Ep). C) Fotomicrografía de la muestra VO-37 con PL (izquierda) y XPL (derecha). Textura porfídica con matriz de cuarzo (Qz) y sericita con cristales de wollastonita fibrosos y radiales. Porfidoclastos de piroxeno reemplazados por epidota. D) Fotomicrografía muestra VO-38 con PL y XPL. Cristales de sericita, wollastonita y cristales de piroxeno reemplazados parcialmente por epidota. Sulfuros diseminados.

En lámina delgada los *hornfels* presentan una textura granoblástica con piroxeno y sulfuros diseminados (Figura 5.9A), cortada por vetillas de unos milímetros de ancho de cuarzo, granate y sulfuros (Figura 5.9B). El piroxeno y el granate están reemplazados por epidota y los sulfuros están reemplazados por hematita. También hay *hornfels* que en lámina delgada mostraron una textura porfidoblástica que está compuesta por una matriz de plagioclasa reemplazada por sericita, wollastonita y epidota (Figura 5.9C y D), y porfidoblastos de piroxeno reemplazados por epidota. Además, hay muchos sulfuros diseminados.

La textura y el color de los **pórfidos del área de Buenavista Zinc** los hace distintivos en campo. Los pórfidos tienen una textura porfídica con una matriz afanítica y cristales de feldespato y cuarzo redondeado en proporción y tamaño variable (Figura 5.10A,B,C). Su color varía de rosa a gris o blanco (Figura 5.10A,B,C).

En lámina delgada los pórfidos de Buenavista Zinc presentan porfidoclastos de feldespato y cuarzo ocasionalmente redondeados, en una matriz de cuarzo y sericita (Figura 5.10D y E). Las variaciones entre cada cuerpo porfídico consisten en la proporción entre sericita y cuarzo de la matriz, desde una masa criptocristalina (Figura 5.10E) hasta el desarrollo de cristales más grandes de muscovita y cuarzo (Figura 5.10F). Hay presencia de cristales tabulares máficos en algunos pórfidos reemplazados por esmectita y biotita (Figura 5.10D) o por clorita (Figura 5.10F) y microcristales de minerales opacos. Algunas particularidades encontradas son coronas de reacción en los cuarzos (Figura 5.10D), xenolitos de rocas sedimentarias (Figura 5.10G), coronas de reacción en los minerales metálicos, y presencia de minerales accesorios como actinolita, calcita, apatito y turmalina. Finalmente, los pórfidos están cortados por vetillas con diferente mineralogía: hay vetillas de cuarzo, vetillas de cuarzo con sulfuros, vetillas de cuarzo, calcita, y sulfuros (Figura 5.10E) o vetillas de calcita, muscovita y sulfuros.

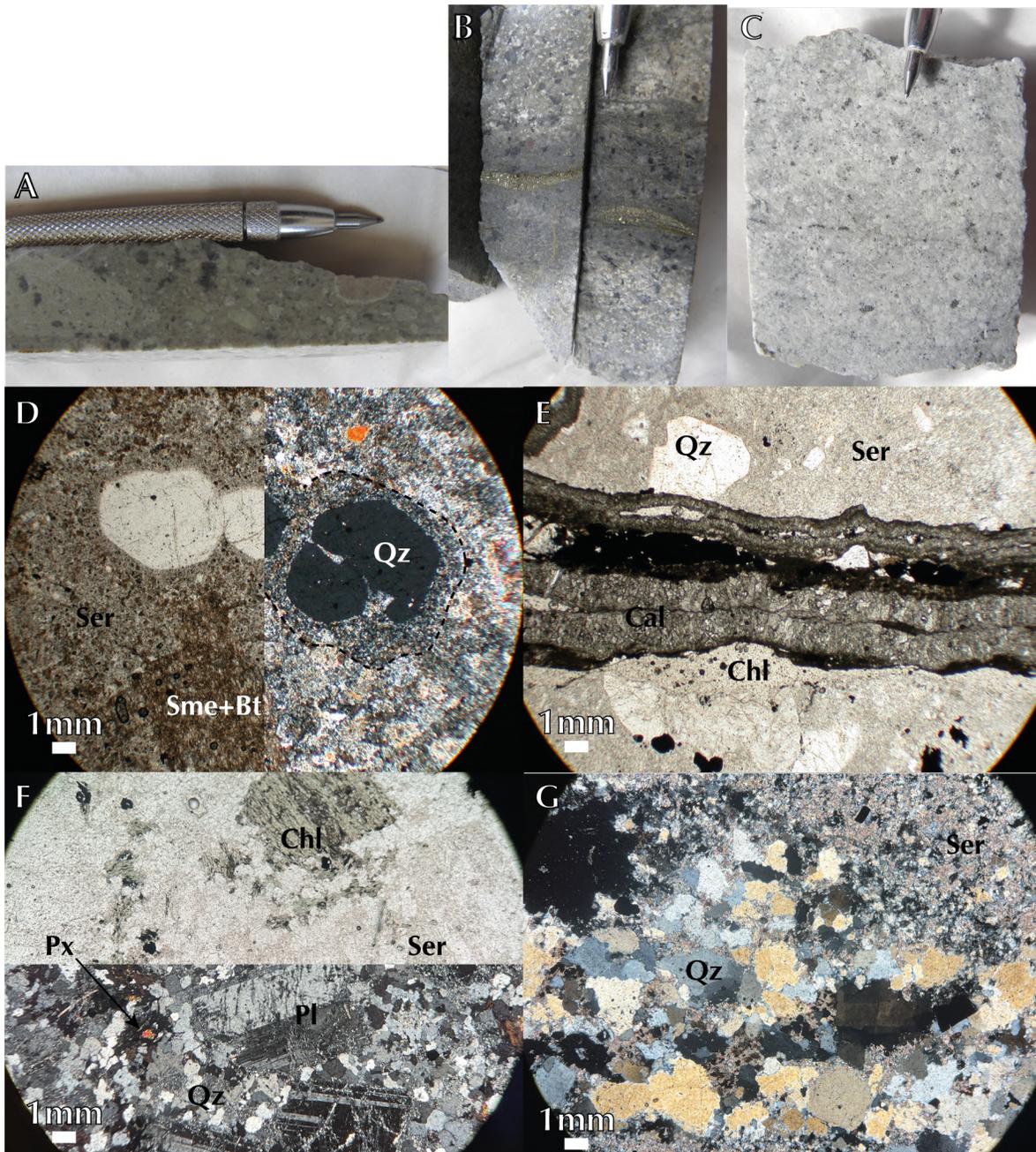


Figura 5.10 Pórfidos del área de Buenavista Zinc. A) Muestra de mano BD5569. Pórfido con cristales de cuarzo redondeado, feldspatos blancos y rosados con borde de reacción y minerales máficos. B) Muestra de mano BD5562. Pórfido con cristales de feldspatos y minerales máficos. Veta de pirita con halo de reacción que oscurece a la roca alrededor. C) Muestra de mano BD4931. Pórfido con cristales de feldspato blancos y grises, cuarzo y escasos minerales máficos. Veta de sulfuros sin halo de reacción. D) Fotomicrografía de la muestra BD5569 con PL (izquierda) y XPL (derecha). Matriz de sericita (Ser) y cristales de cuarzo (Qz) redondeado que presentan coronas de reacción resaltada con línea punteada. Se observan pseudomorfos de minerales máficos rellenos por esmectita y biotita (Sme+Bt). E) Fotomicrografía de la muestra BD5571 con PL. Roca con textura porfídica con una matriz de sericita (Ser) y cristales de cuarzo (Qz). Veta de calcita (Cal) y sulfuros que corta al pórfido. F) Fotomicrografía de la muestra BD5570 con PL (arriba) y XPL (abajo). Roca con textura porfídica, matriz de sericita (Ser) y cuarzo (Qz) con porfidoblasto de plagioclasa (Pl). La alteración a sericita se ubica intersticial y en fracturas. Cristales de piroxeno (Px) reemplazados por clorita (Chl). G) Fotomicrografía muestra

BD5136 con XPL. Roca con textura porfídica con alteración sericítica (Ser) y xenolito de cuarcita. El xenolito tiene cristales de cuarzo(Qz) con extinción ondulante y textura de tablero de ajedrez.

De acuerdo con las observaciones petrográficas se pudo establecer la siguiente secuencia paragenética (Tabla 5.1), donde las diferentes asociaciones minerales del depósito de Buenavista Zinc permiten diferenciar: el pre-skarn, con calcita y cuarzo; el skarn prógrado caracterizado por granate, piroxeno, wollastonita y pirita; el skarn retrógrado formado por epidota, clorita, además la cristalización tardía de vesuvianita, magnetita, esfalerita y galena; y por último, la alteración posterior al skarn conformada por vetillas que cortan al depósito tipo skarn conformadas por calcita, cuarzo, sericita, vesuvianita, bornita, digenita, calcopirita, esfalerita, galena y hematita.

Tabla 5.1 Secuencia paragenética de minerales del depósito de Buenavista Zinc.

Mineral	Pre-skarn	Skarn prógrado	Skarn retrógrado	Alteración posterior
Calcita	██████████			██████████
Cuarzo	██████████			██████████
Piroxeno		██████████		
Granate		██████████		
Wollastonita		██████████		
Epidota			██████████	
Clorita			██████████	
Sericita				██████████
Vesuvianita				██████████
Calcopirita			██████████	
Pirita		██████████		
Bornita/digenita				██████████
Esfalerita			██████████	
Galena			██████████	
Hematita				██████████
Magnetita			██████████	

5.2.2 Zoneamiento mineralógico del depósito

En superficie, el zoneamiento del skarn prógrado en el depósito de Buenavista Zinc se distribuye de la siguiente manera: de oeste a este el contenido de granate aumenta, el contenido de piroxeno disminuye y el contenido de wollastonita disminuye (Figura 5.11). Como resultado, el mejor desarrollo del skarn prógrado se ubica dentro del Grupo Naco, como fue descrito por Meinert (1982). El desarrollo de actinolita, epidota y clorita, como minerales indicadores de la etapa retrógrada se ve como una lengua orientada N-S, en la parte central del depósito (Figura 5.11).

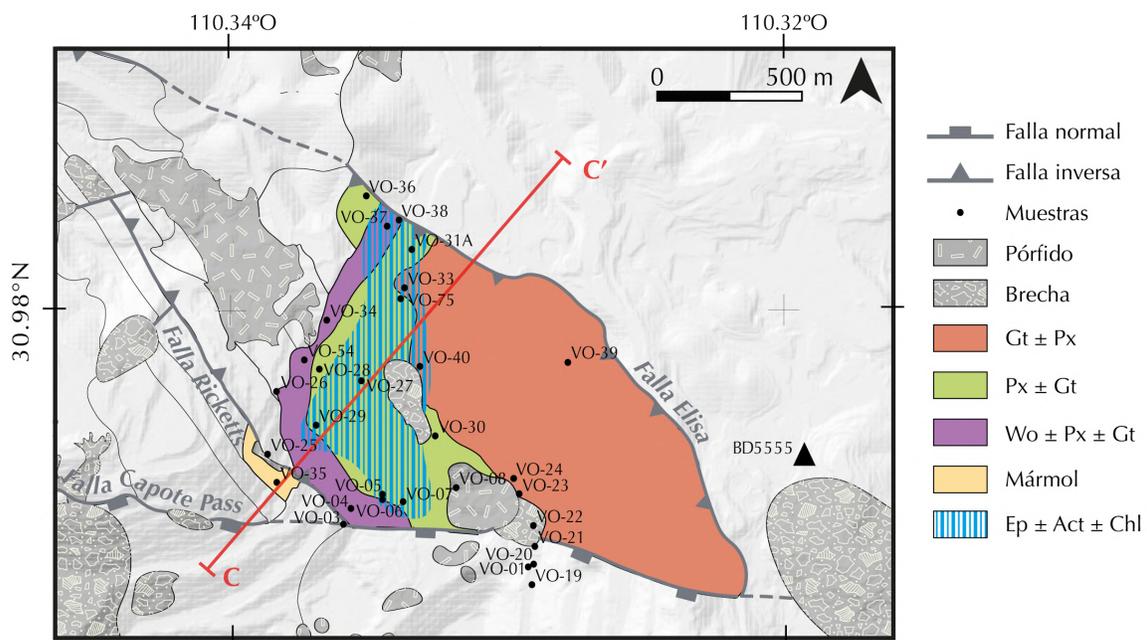


Figura 5.11 – Mapa con zoneamiento mineralógico del skarn actualizado. Círculos negros indican la localización de las muestras colectadas en superficie. Triángulos negros indican ubicación de dos barrenos de interés y mencionados en el texto. Línea roja indica la sección utilizada para el modelo de distribución vertical.

En particular, la zona con piroxeno o con una mayor proporción de piroxeno respecto al granate se localiza en la parte central del depósito de Buenavista Zinc, con una orientación general N-S (Figura 5.11). La distribución de piroxeno coincide mayoritariamente con la Formación Abrigo. A su vez, el desarrollo más abundante de piroxeno se encuentra en el norte, en el contacto con la falla Elisa. En esta región hay *hornfels* compuestos hasta por 90% de piroxeno. En el límite sur, las rocas muestran un desarrollo incipiente de piroxeno. La wollastonita se distribuye alrededor de la zona con piroxeno (Figura 5.11), representando

la parte más distal del skarn. En campo se observó que al oeste de la falla Ricketts las rocas están marmolizadas (Figura 5.11) y sin desarrollo de minerales asociados al skarn progrado. Se eligió la sección C-C' para estudiar la distribución del depósito tipo skarn a profundidad (Figura 5.1). Lo que se observa en la sección es que la distribución mineralógica del depósito tipo skarn sigue la estructura sedimentaria (Figura 5.12). En particular de base a techo de la secuencia sedimentaria aumenta la cantidad de granate, disminuye la cantidad de piroxeno y la wollastonita se distribuye únicamente en la base. Por tanto, en el Grupo Naco se ubica el mayor desarrollo de granate y en la formación Abrigo se localiza la mayor cantidad de piroxeno (Figura 5.12). Asimismo, se observa que la cantidad de granate disminuye a profundidad y la cantidad de piroxeno aumenta (Figura 5.12), y dicha tendencia también se observa en la secuencia paleozoica debajo de la Formación Mesa. Por último, las fases del skarn retrógrado aumentan hacia la superficie.

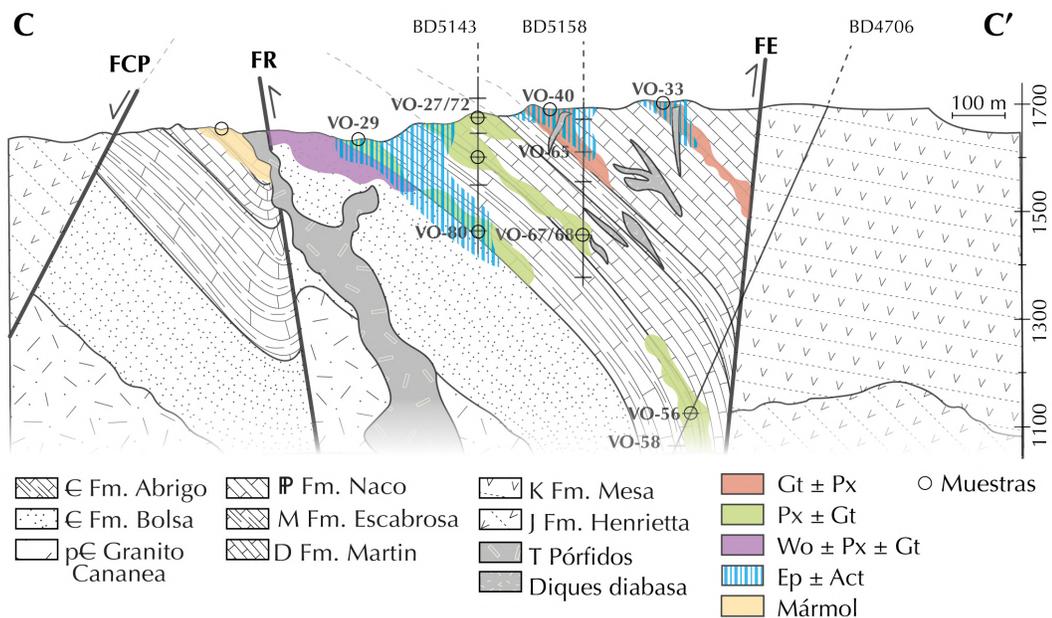


Figura 5.12 – Sección geológica con distribución del skarn a profundidad con orientación SW-NE. Las líneas verticales e inclinadas que cortan la sección son los barrenos muestreados. En la leyenda se indican los periodos a los cuales pertenecen cada formación. FCP → Falla Capote Pass, FR → Falla Ricketts, FE → Falla Elisa

Además, en el barrenos BD5109 ubicado en el límite noroeste de la secuencia paleozoica y en el barrenos BD5555 al este del depósito (Figura 5.1) se encontró que la proporción de granate aumenta hacia la cima y el piroxeno disminuye en la misma dirección.

5.2.3 Distribución de la mineralización

En general, la mineralización en Buenavista Zinc se distribuye en tres áreas: al oeste aumenta la cantidad de calcopirita, en el centro se ubica la magnetita y al este aumenta la cantidad de esfalerita. La hematita se localiza en una franja N-S a partir de la Falla Elisa sobre la zona de esfalerita (Figura 5.13).

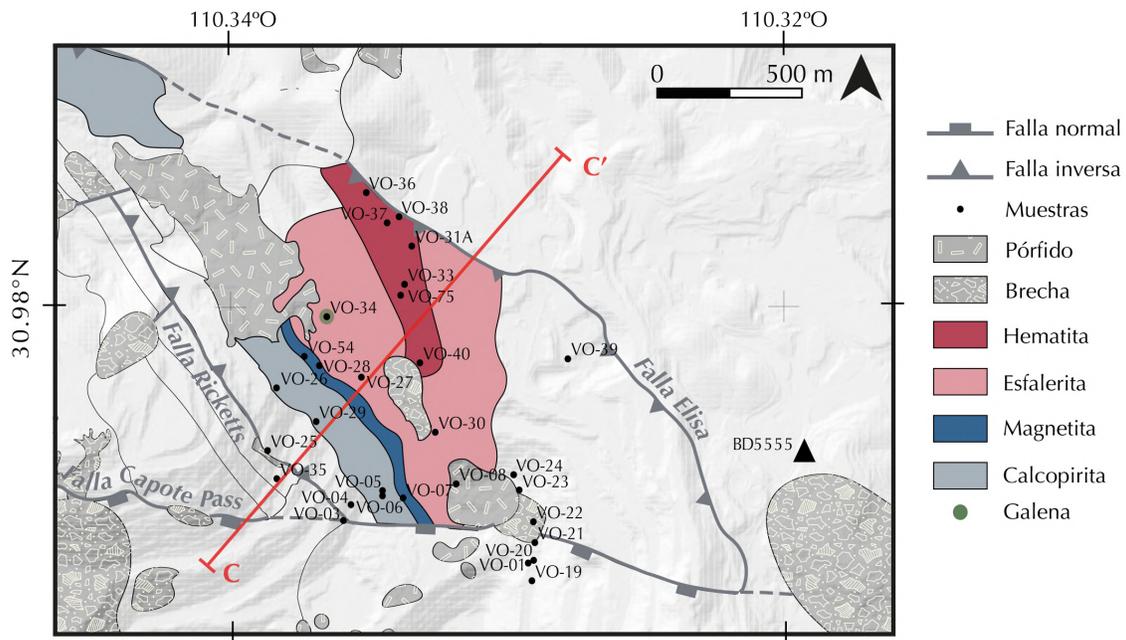


Figura 5.13 Mapa del zoneamiento de los minerales metálicos. Se consideran metales con interés económico. La sección C-C' se utiliza para reconstruir el zoneamiento vertical.

En particular, la magnetita se presenta en un horizonte masivo de varios metros de espesor entre la Formación Abrigo y la Formación Martín (Figura 5.13), siguiendo el rumbo de la estratificación. Además, este horizonte contiene vetas de pirita y cuarzo (Figura 14A). Al oeste del horizonte de magnetita se observaron vetillas de calcopirita, en menor proporción esfalerita diseminada y cristales de sulfosales de plomo (Figura 5.13 y 5.16 D, E, F) asociadas con la epidota y clorita en las rocas skarnificadas de la Formación Abrigo. Por otro lado, hacia el este del horizonte de magnetita la esfalerita aumenta progresivamente (Figura 5.13 y 5.14C) y los sulfuros de cobre disminuyen (Figura 5.13). En el centro del depósito aparece la hematita en vetas y diseminada. En las zonas más cercanas a la falla Elisa la magnetita desaparece y solo se identifica hematita (Figura 5.13). Además, hay vetillas de wollastonita,

pirita, esfalerita y galena con alteración posterior a hematita en mármoles dentro de la Formación Martín (Figura 5.13).

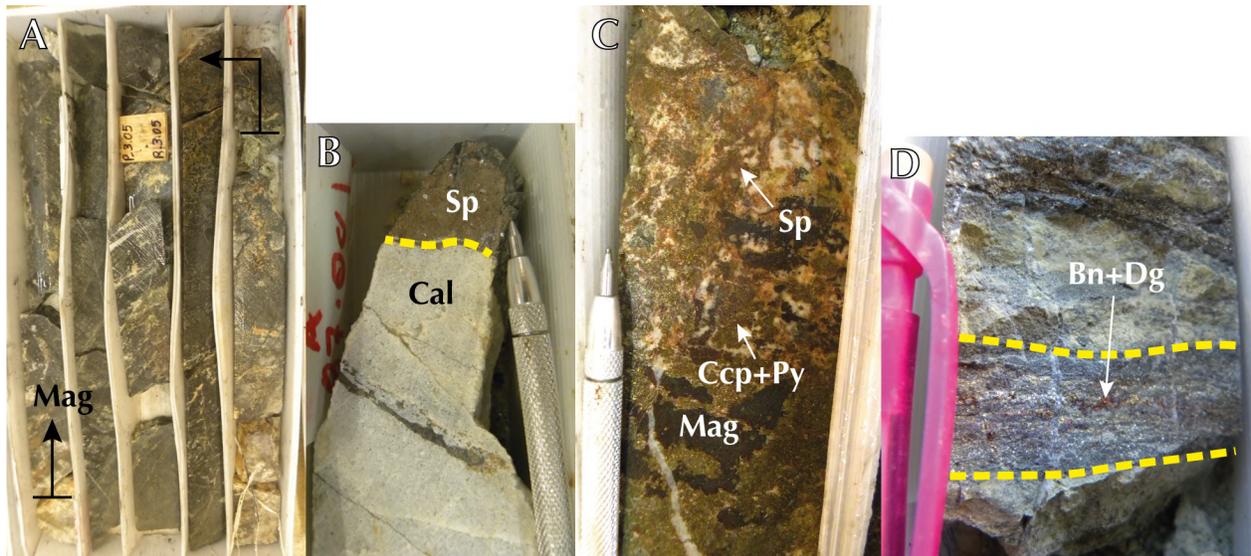


Figura 5.14 Fotografías de mineralización en barrenos. A) Horizonte de magnetita masiva con un grosor de ~2.5 m, en barreno BD5158 a 324 m de profundidad. Con flechas negras se señala el inicio y final del horizonte. B) Horizonte de esfalerita masiva en barreno BD5143 0 m de profundidad. En línea punteada amarilla se señala contacto. C) Zona con altos niveles de zinc, roca con esfalerita color caramelo, pirita y calcopirita diseminada y lentes de magnetita en barreno BD5158 a 310 m de profundidad. D) Veta con bornita y digenita en barreno BD4706 a 650 m de profundidad. Con línea punteada se señalan bordes de la veta.

En la sección C-C' se observa la distribución vertical de la mineralización (Figura 5.15). De la base a la cima de la secuencia sedimentaria aumenta la esfalerita y disminuye la calcopirita, además la magnetita se concentra en la parte central, en el contacto entra la Formación Abrigo y la Formación Martín. Visto de otra manera, la esfalerita se localiza en la parte somera y la calcopirita, digenita y bornita a mayor profundidad (Figura 5.15). La hematita se distribuye en la zona noreste del depósito, cercana a la superficie y en las formaciones superiores estratigráficamente según la sección (Figura 5.15).

Los ensayos químicos proporcionados por la compañía minera complementaron las evidencias de este estudio y mostraron un aumento de zinc en la Formación Martín. Este comportamiento se asocia con un horizonte de esfalerita masiva que anteriormente llegaba hasta la superficie, según el registro de barrenación (Figura 5.14B).

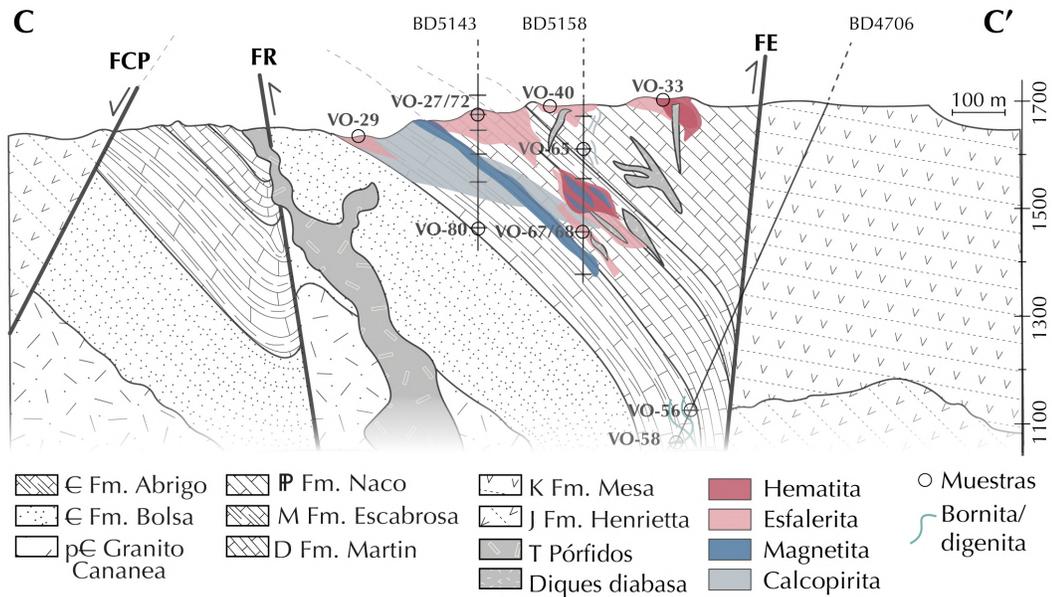


Figura 5.15 – Sección geológica C-C' con distribución vertical de mineralización orientada SW-NE. Se indican barrenos y muestras utilizados para la reconstrucción. FCP → Falla Capote Pass FR → Falla Ricketts FE → Falla Elisa.

En lámina delgada se encontró que en la zona donde domina la cantidad de esfalerita, esta fase se asocia con calcopirita, pirita y magnetita con coronas de reacción de hematita (Figura 5.16 G, H, I). La esfalerita se distribuye de forma diseminada y contiene inclusiones de calcopirita. Por otro lado, la calcopirita se distribuye principalmente en vetas. Las muestras tomadas a mayor profundidad (aproximadamente 600 m) contienen bornita y digenita que también se distribuyen en vetas (Figura 5.14D).

El estudio de la mineralización de Buenavista Zinc muestra que los minerales metálicos están asociados con la etapa retrógrada del skarn y con una etapa de alteración posterior al skarn. Las evidencias de este último evento son las vetas ricas en sulfuros que cortan al skarn.

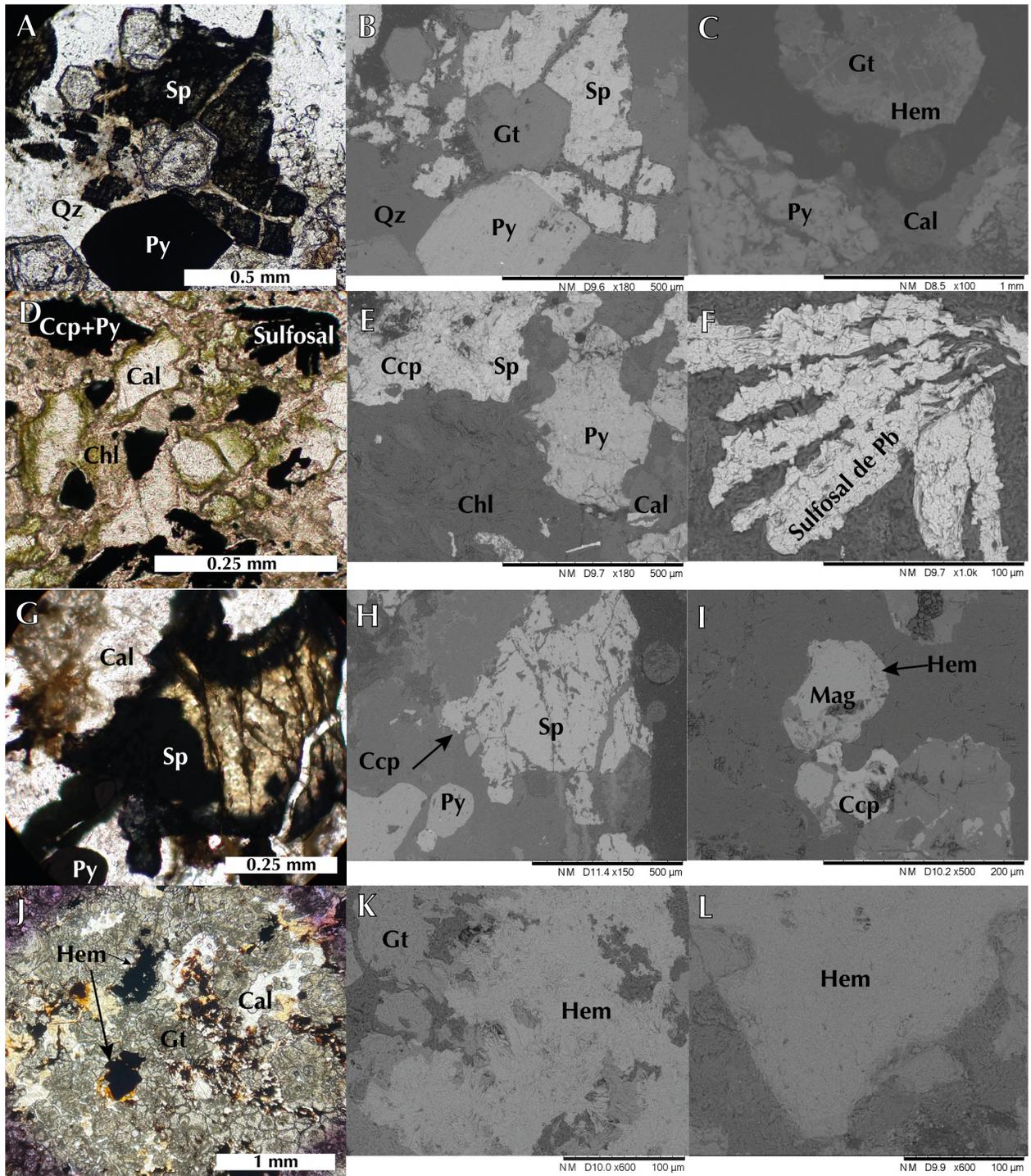


Figura 5.16 Imágenes con microscopio electrónico de barrido (SEM) de los minerales metálicos de Buenavista Zinc. Imágenes de columna de la izquierda tomadas de microscopio petrográfico con PL. Imágenes de columna central y derecha tomadas con SEM, imágenes composicionales obtenidas con electrones retrodispersados. A, B, C corresponden a muestra VO-40 de la Formación Naco. D, E, F corresponden a muestra VO-29 de la Formación Abrigo. G, H, I corresponden a muestra VO-68 de la Formación Martín. J, K, L corresponden a muestra VO-33 de la Formación Naco. Qz→cuarzo, Chl→clorita, Cal→calcita, Gt→granate, Py→pirita, Sp→esfalerita, Hem→hematita, Ccp→calcopirita, Mag→magnetita

5.3 Skarn de Puertecitos

El skarn de Puertecitos es de gran interés en este estudio porque se encuentra en contacto con la granodiorita Cuitaca (Figura 5.17). Este depósito ofrece la oportunidad de analizar la relación entre el depósito tipo skarn y su posible fuente de calor y fluidos, la granodiorita Cuitaca, de buscar evidencias del desarrollo de endoskarn en Cuitaca, así como identificar similitudes y diferencias con el skarn de Buenavista Zinc. Al este del skarn se encuentra la Formación Henrietta, conformada por flujos y tobas volcánicas de edad Jurásica. Hay pórfidos y brechas que cortan a la secuencia paleozoica y a la Formación Henrietta en el área (Figura 5.17).

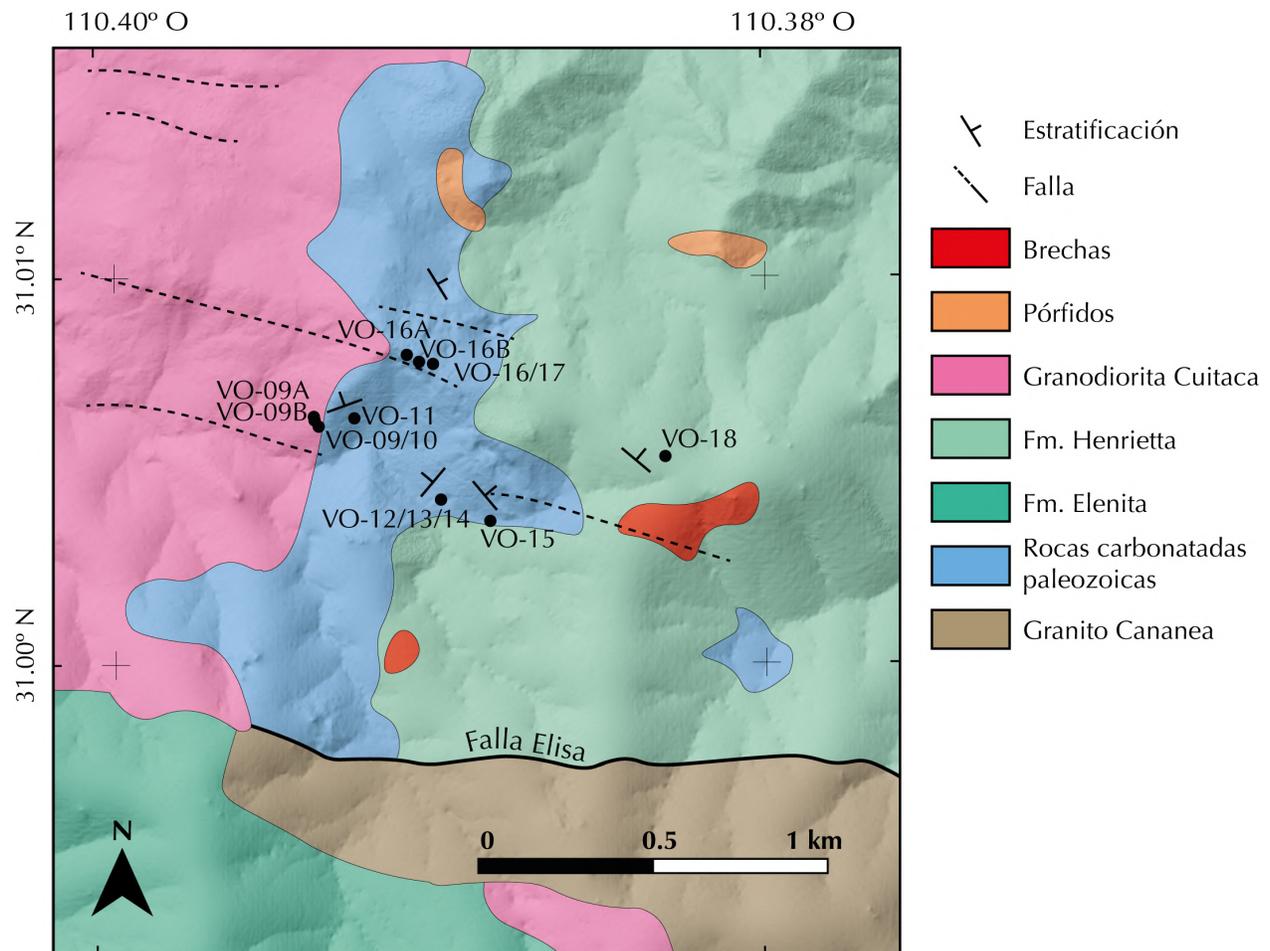


Figura 5.17 Mapa geológico del área de Puertecitos. Los puntos negros indican la localización de las muestras colectadas en este depósito. Los lineamientos observado en la topografía junto con la ubicación de rocas de falla se utilizaron para la inferencia de las fallas mostradas en este mapa.

Para este estudio se analizaron 16 láminas delgadas con luz transmitida y 2 láminas con luz reflejada y SEM. A continuación, se presentan los resultados petrográficos, el zoneamiento del skarn y de la mineralización del depósito.

5.3.1 Petrografía del depósito

La **granodiorita Cuitaca** presenta variaciones mineralógicas acercándose hacia el contacto con los metasedimentos, en particular disminuye la cantidad de minerales máficos y aumenta la presencia de minerales de color verde claro. A 30 m de distancia del contacto, en muestra de mano la roca tiene una textura fanerítica, equigranular, mesocrática, con cristales de cuarzo, feldespato y minerales máficos identificados como anfíboles (Figura 5.18A). Diez metros más cerca del contacto la roca presenta cristales verdes claro de piroxeno y cristales blancos, fibrosos y radiales de wollastonita (Figura 5.18C). Además, hay diques leucocráticos que intrusionan en el contacto entre la granodiorita Cuitaca y los metasedimentos (Figura 5.18E).

En lámina delgada la granodiorita Cuitaca tiene una textura holocristalina y equigranular de grano grueso (Figura 5.18B). Contiene cristales de plagioclasa subhedrales zoneados, feldespato potásico anhedral con sericitación, cristales de cuarzo anhedral, anfíbol subhedral y minerales opacos asociados con el anfíbol. Como minerales accesorios se identificó allanita y apatito. También hay texturas de desequilibrio como mirmequitas de feldespato y cuarzo, anfíbol reemplazado por biotita y opacos con coronas de titanita. Una veta de cuarzo, clorita y minerales metálicos corta a la roca (Figura 5.18B).

Acercándose al contacto con los metasedimentos, la granodiorita Cuitaca presenta un desarrollo de endoskarn caracterizado por cúmulos de cristales de clinopiroxenos y cuarzo, algunos piroxenos tienen reemplazamiento parcial por epidota y también hay titanita en contacto con los piroxenos. En esta zona de contacto, los feldespatos presentan una mayor alteración sericita (Figura 5.18D).

Los diques leucocráticos que intrusionan en el contacto entre la granodiorita Cuitaca y los metasedimentos están constituidos por feldespato potásico y cuarzo, y como fases accesorias titanita y plagioclasas. Los diques muestran una textura holocristalina equigranular de grano grueso (Figura 5.18F) y texturas de desequilibrio como pertitas en

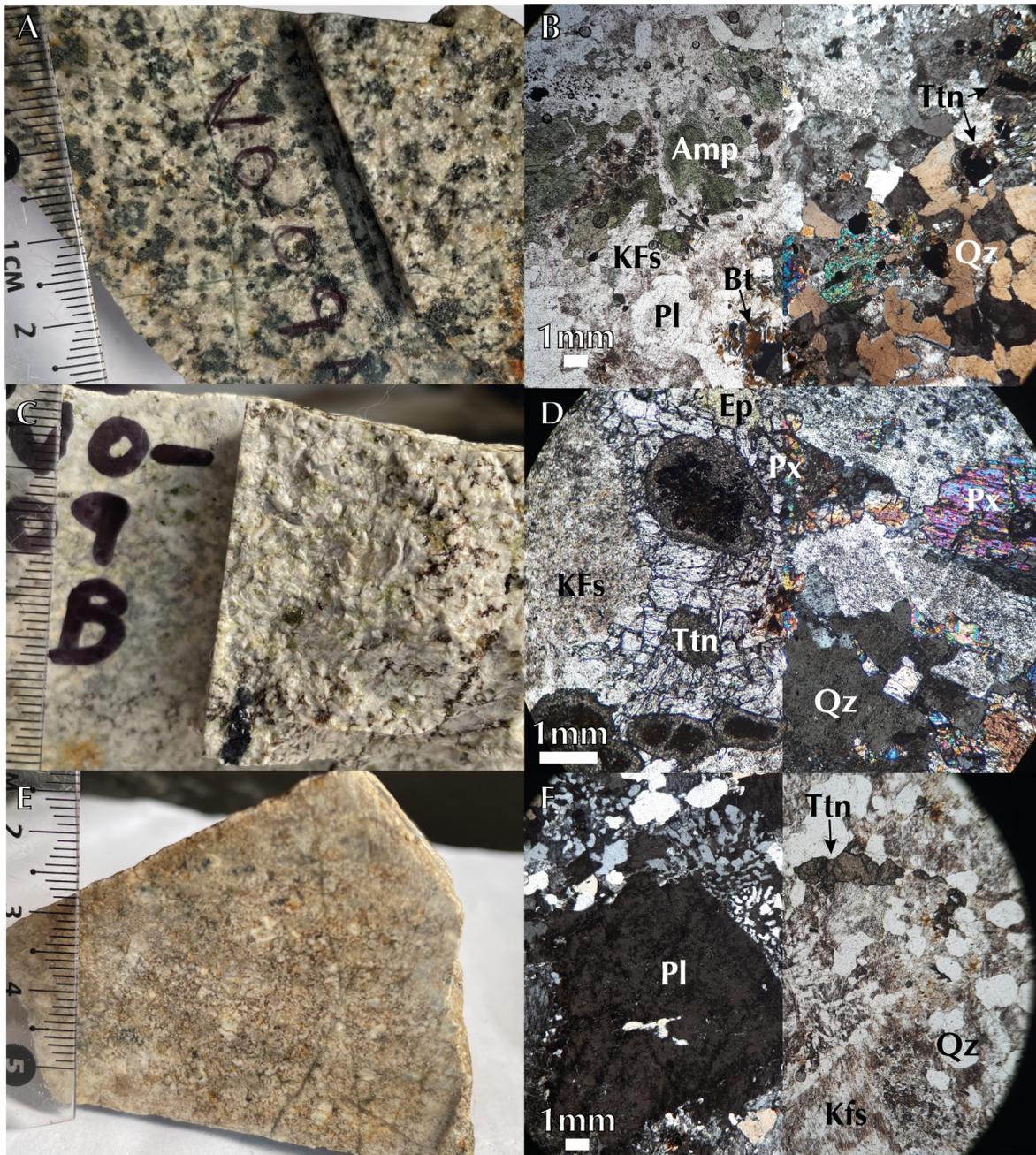


Figura 5.18 Muestra de la granodiorita Cuitaca. A) Muestra de mano VO-09A, granodiorita Cuitaca. Textura fanerítica de grano grueso equigranular con cristales de feldespato, cuarzo y anfíboles. B) Fotomicrografía muestra VO-09A. Cristales de plagioclasa y feldespato potásico subhedrales con ligera alteración sericítica, cristales de cuarzo anhedral, cristales de anfíbol asociados con opacos y cristales opacos con coronas de titanita. C) Muestra de mano VO-09B, granodiorita con alteración de endoskarn. Textura fanerítica de grano medio. Cristales de plagioclasa y feldespato, piroxeno verde claro y wollastonita. D) Fotomicrografía muestra VO-09B. Feldespatos con mayor alteración sericítica que en la muestra VO-09A. Piroxenos subhedrales reaccionando a epidota, opacos con coronas de titanita y cuarzo subhedral. E) Muestra de mano VO-09C, dique leucocrático ubicado en el contacto entre Cuitaca y metasedimentos. Cristales de cuarzo y feldespato, no hay presencia de máficos. F) Fotomicrografía muestra VO-09C. Cristales de plagioclasa, feldespato potásico y titanita como mineral accesorio. Mirmequitas de cuarzo y feldespato.

feldespatos y mirmequitas de cuarzo y feldespato alrededor de cristales de plagioclasa (Figura 5.18F).

En el contacto de la granodiorita Cuitaca con los sedimentos se observan bloques de metasedimentos dentro de la granodiorita (Figura 5.19A). El contacto en lámina delgada es abrupto, la granodiorita contiene cristales de piroxenos anhedrales, cristales de titanita anhedrales y se observan relictos de anfíbol (Figura 5.19C). La roca metasedimentaria está compuesta principalmente por cristales de cuarzo y cristales euhedrales de piroxenos con una textura granoblástica de grano fino, además hay vetas de óxidos cortan a ambas litologías (Figura 5.19D).

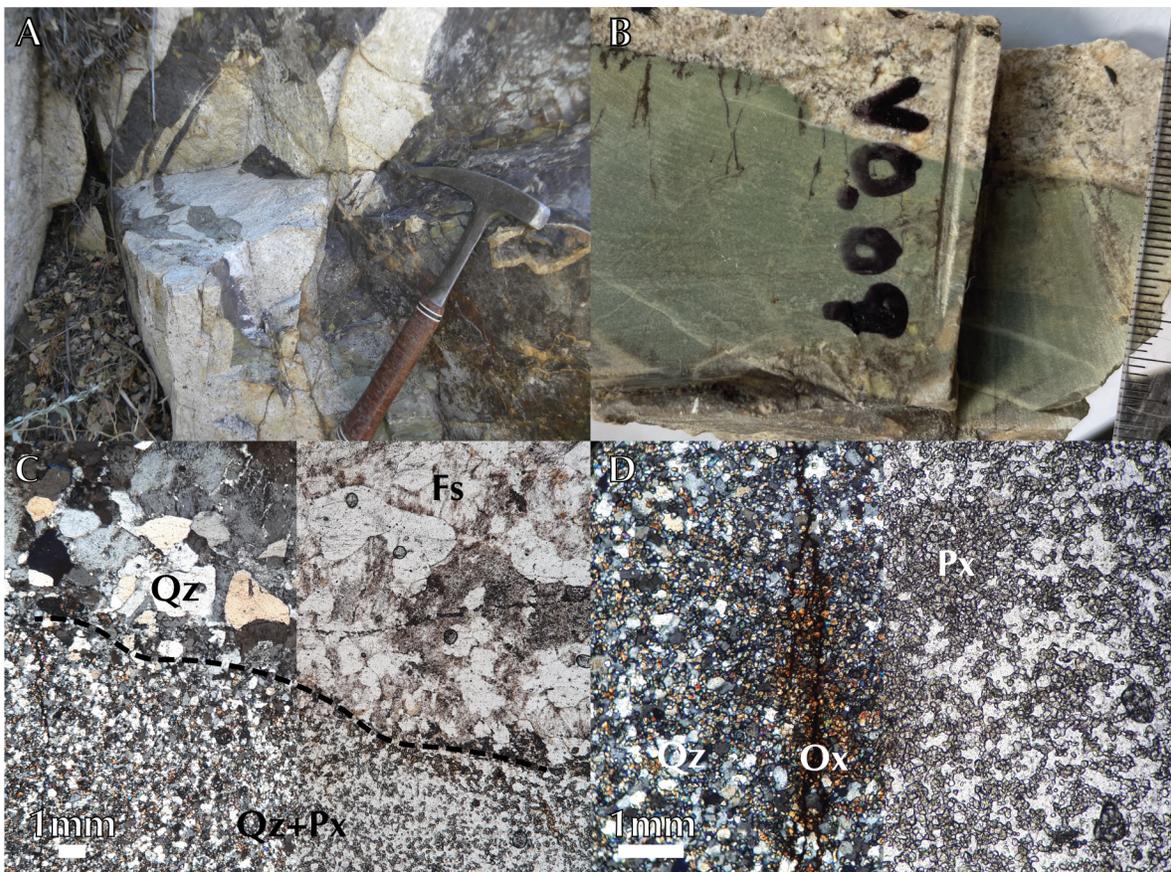


Figura 5.19 Rocas de zona de contacto entre granodiorita Cuitaca y metasedimentos. A) Contacto entre granodiorita Cuitaca y metasedimentos. Bloques de aproximadamente 20 cm de metasedimentos se encuentran dentro del plutón. B) Muestra de mano del contacto VO-09. En la parte superior roca ígnea y en la parte inferior roca sedimentaria. C) Fotomicrografía muestra VO-09. El contacto es abrupto, la roca ígnea es fanerítica de grano medio con cristales de cuarzo anhedrales y feldespato subhedral y la metasedimentaria es granoblástica de grano fino, conformada por cuarzo y piroxeno. Línea punteada indica contacto. D) Fotomicrografía de metasedimento cerca del contacto. Veta con óxidos corta a la roca de grano fino compuesta por cuarzo y piroxenos granulares euhedrales.

Las **rocas metasedimentarias paleozoicas** muestran variaciones texturales y mineralógicas. Cerca del contacto con la granodiorita Cuitaca los metasedimentos tienen una textura de *hornfels*, son de color verde botella y preservan la estratificación primaria de su protolito (Figura 5.20A). En lámina delgada se observan lentes de piroxeno de grano medio y una matriz de cuarzo y piroxeno de grano fino (Figura 5.20B). Hay vetas de cuarzo, piroxeno y feldespato que cortan al *hornfels*. Asimismo, hay cristales de epidota reemplazando parcialmente al piroxeno.

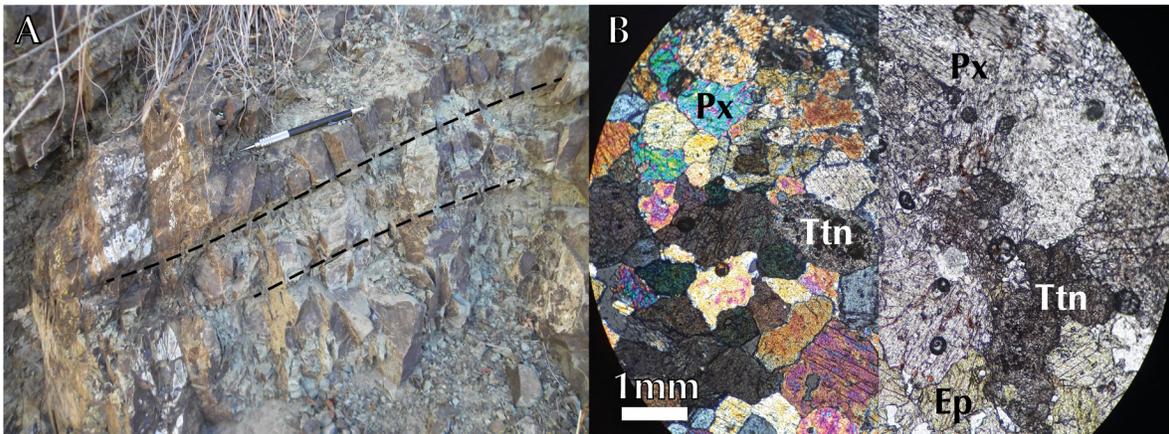


Figura 5.20 Metasedimentos paleozoicos con desarrollo de *hornfels*. A) Afloramiento de hornfels de piroxeno, cerca del contacto con la granodiorita Cuitaca. En línea punteada se señala la estratificación primaria. B) Fotomicrografía de muestra VO-10. Granoblastita de piroxeno con titanita como mineral accesorio. La alteración a epidota en la parte inferior derecha.

A escala de afloramiento se observó la estratificación primaria y capas con desarrollo preferencial de minerales calcos-silicatados expresado por una dureza mayor y un color verde (Figura 5.21A). Estas rocas metasedimentarias muestran un aumento en el tamaño de grano de fino a medio. Además, algunas rocas en muestra de mano tienen una matriz de cuarzo y calcita con cristales euhedrales de granate (Figura 5.21C). En lámina delgada estas rocas tienen una textura porfidoblástica con una matriz de cuarzo y calcita de grano grueso, porfidoblastos de granate euhedrales con anisotropía anómala y cristales de grano fino de piroxeno en la matriz (Figura 5.21B). También contienen cristales de esfalerita intersticiales, clorita y malaquita reemplazando al granate (Figura 5.21B,D).

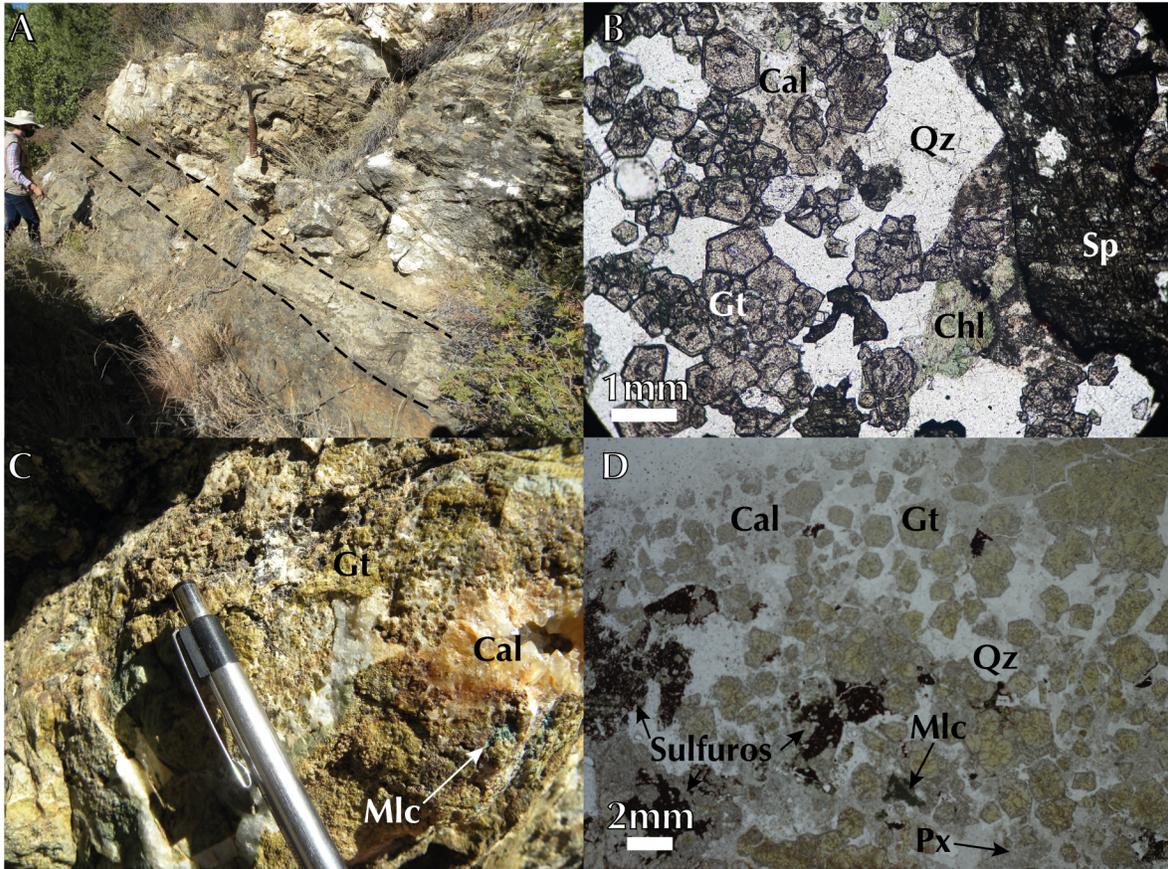


Figura 5.21 Metasedimentos paleozoicos con desarrollo de skarn en capas preferenciales. A) Capas metasedimentarias con alteración preferencial tipo skarn en capas de color verde oscuro, las capas más claras superiores están marmolizadas. Con línea punteada se indica rumbo de estratificación. B) Fotomicrografía de muestra VO-11. Textura porfidoblástica con matriz de cuarzo y calcita, cristales euhedrales de granate. Clorita como reacción del granate y esfalerita de lado derecho y parte inferior. C) Muestra de mano VO-16A con matriz de Qz y Cal y cristales euhedrales de granate. Esquina inferior derecha con alteración de cobre, posiblemente malaquita. D) Fotomicrografía de muestra VO-16A con textura porfidoblástica. Matriz de Cal y Qz con porfidoblastos de granate verde euhedral. Los sulfuros y malaquitas se distribuyen en los bordes.

Además, hay rocas metasedimentarias con una textura fanerítica conformada mayormente por granate de grano grueso. Estas rocas contienen granate masivo de color verde oscuro casi pardo y son extremadamente duras en muestra de mano (Figura 5.22A). La mineralización de cobre está presente, relleno de intersticios entre el granate. En lámina delgada se observan granates zonados con birrefringencia anómala y núcleos isotrópicos, cuarzo, clorita y minerales metálicos intersticiales (Figura 5.22B).



Figura 5.22 Rocas de skarn de Puertecitos. A) Afloramiento de VO-12. Agregado de granates verde oscuro de grano grueso. B) Fotomicrografía de muestra V0-12. Textura granoblástica conformada por granate con zoneamiento y birrefringencia anómala. Intersticios rellenos de cuarzo y clorita. C) Afloramiento de muestra VO-15 en entrada de mina abandonada. Afloramiento con evidencias de estratificación primaria. Granofelsita verde claro, con alta dureza, grano medio-fino en muestra de mano. D) Fotomicrografía muestra VO-15. Roca con textura granoblástica, parches remanentes de piroxeno y granate. Carbonatos reemplazan a silicatos cálcicos. Vetas de calcita al extremo derecho que cortan a la roca. E) Afloramiento de brecha, muestra VO-17. Brecha rojiza con fragmentos angulosos de skarn de máximo 20 cm de diámetro dentro de una matriz afanítica rojiza. F) Fotomicrografía de muestra VO-17. Brecha con fragmentos de skarn angulosos en matriz rojiza compuesta por óxidos y granos de cuarzo. Roca silicificada con vetas de cuarzo cortando a la roca.

Las rocas metasedimentarias ubicadas más al sur del depósito, en muestra de mano presentan un color verde claro y una textura porfidoblástica con porfidoblóstos de grano medio y una matriz de grano fino (Figura 5.22C). En lámina delgada esta roca tiene una mineralogía diferente a todas las muestras anteriores, ya que está conformada por una matriz de piroxeno con algunos cúmulos de granate (Figura 5.22D). Esta muestra presenta los silicatos cálcicos reemplazados por una masa carbonatada parda y tiene vetas de calcita que cortan a la roca.

Por último, las rocas metasedimentarias están cortadas por brechas con mucha oxidación (Figura 5.22E). Estas brechas contienen fragmentos angulosos de los metasedimentos calco-silicatados en una matriz fina rojiza que en lámina delgada está compuesta por una masa criptocristalina rojiza y cuarzo (Figura 5.22F).

De acuerdo con las observaciones petrográficas se pudo establecer la siguiente secuencia paragenética para las rocas del depósito tipo skarn de Puertecitos (Tabla 2): el pre-skarn en el protolito ígneo, es decir, la granodiorita Cuitaca, con plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo, anfíbol, allanita, biotita; el skarn prógrado en el protolito ígneo está formado por piroxeno, titanita, sericita, wollastonita y cuarzo; el skarn prógrado ubicado en los metasedimentos paleozoicos está conformado por granate, piroxeno, cuarzo y calcita; el skarn retrógrado contiene epidota, clorita, calcita, pirita y magnetita; y finalmente, la alteración posterior al skarn está conformada por titanita, malaquita, calcopirita, pirita, esfalerita, galena, tetraedrita y óxidos de manganeso.

En general en el skarn de Puertecitos se observó un fuerte desarrollo del skarn prógrado en ciertas capas de los sedimentos calcáreos. Tanto la granodiorita Cuitaca como los metasedimentos tienen evidencias de la etapa prógrada y retrógrada del skarn pero esta última etapa es más débil que en Buenavista Zinc. De tal manera que la mineralogía prógrada está muy bien preservada. Por último, hay evidencia de un evento magmático posterior a la formación del skarn por los pórfidos y brechas que cortan al skarn y que contienen fragmentos angulosos del skarn.

Tabla 5.2 Secuencia paragenética de minerales del depósito de Puertecitos.

Mineral	Pre-skarn	Skarn prógrado	Skarn retrogrado	Alteración posterior
Plagioclasa	██████████			
Feldespatos K	██████████			
Anfibol	██████████			
Allanita	██████████			
Biotita	██████████			
Titanita	██████████			██████████
Cuarzo	████████████████████			
Calcita		████████████████████		
Piroxeno		████████████████		
Granate		████████████████		
Wollastonita		████████████████		
Epidota			████████████████	
Clorita		████████████████	████████████████	
Sericita		████████████████		
Malaquita				████████████████
Calcopirita				████████████████
Pirita			████████████████	
Esfalerita				████████████████
Galena				████████████████
Ilmenita	██████████			
Magnetita			████████████████	
Tetraedrita				████████████████
Óxidos de Mn				████████████████

5.3.2 Zoneamiento mineralógico del depósito

El skarn se desarrolla a lo largo y ancho de los sedimentos paleozoicos que afloran en el área de Puertecitos. También se desarrolla dentro de la granodiorita Cuitaca en una franja delgada en el borde que está en contacto con los sedimentos (Figura 5.23). Dicha franja corresponde con el endoskarn y el skarn desarrollado en los sedimentos corresponde al exoskarn.

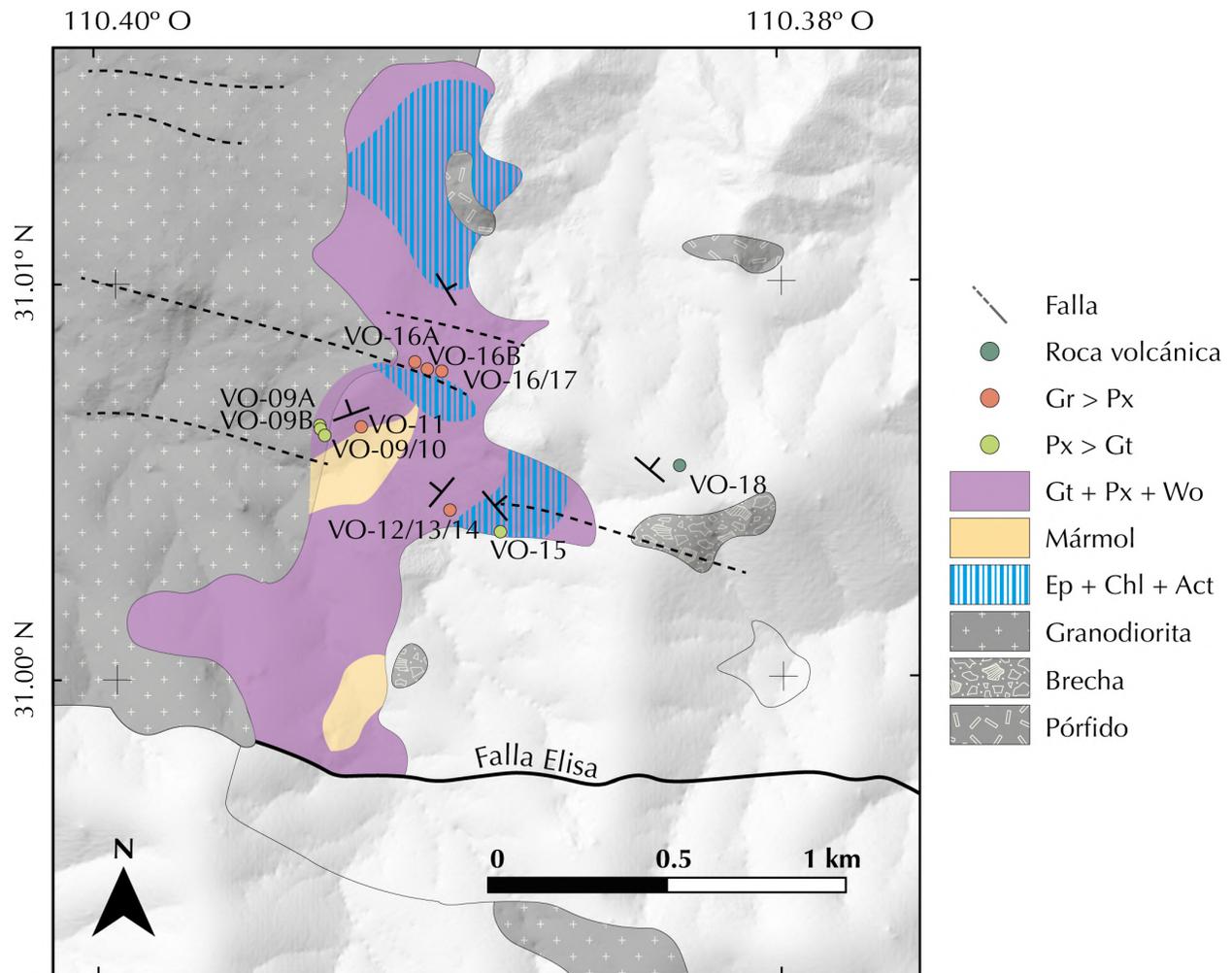


Figura 5.23 Mapa con zoneamiento de minerales asociados al skarn. Los datos utilizados para este mapa son de este estudio y los proporcionados por la compañía minera Grupo México.

En campo se observa un desarrollo preferencial del skarn en ciertas capas de los sedimentos. Por otro lado, las capas que no desarrollan skarn están conformadas por mármoles. Dicha característica indica que hay un control composicional del desarrollo mineralógico del skarn.

En la granodiorita Cuitaca existe una zona angosta con desarrollo de endoskarn cerca del contacto con los sedimentos. Tiene una textura fanerítica heredada de la granodiorita Cuitaca. Se caracteriza por la presencia de piroxeno, wollastonita y epidota (5.18C,D). Los sedimentos que están en contacto con Cuitaca desarrollaron una textura de hornfels y están compuestos principalmente por piroxeno (Figura 5.20).

De acuerdo con observaciones de este estudio y la base de datos proporcionada por la compañía minera, la zona con granate y en menor proporción o con ausencia de piroxeno se distribuye del centro al norte del depósito, de forma alargada (Figura 5.23). La zona donde domina el piroxeno se distribuye rodeando a la zona de granate, en la parte central del depósito (Figura 5.23) de acuerdo con la mineralogía observada. El resto del depósito tiene la mineralogía asociada clásicamente con el skarn prógrado (granate, piroxeno o wollastonita) (Figura 5.23), pero sin diferenciar la distribución de cada mineral (base de datos de Grupo México). El skarn retrógrado se distribuye del centro hacia el norte de los metasedimentos. Se caracteriza por alteración de granates y piroxenos a epidota y óxidos de hierro. La alteración retrógrada disminuye de la zona centro-este hacia el norte (Figura 5.23).

5.3.3 Distribución de la mineralización

La mineralización del skarn de Puertecitos se concentra principalmente en el centro y sur del depósito principalmente (Figura 5.24). Se caracteriza por la presencia de óxidos de hierro y manganeso, sulfuros de cobre y, en menor medida, sulfuros de zinc y plomo. Las regiones donde hay mayor concentración de sulfuros y óxidos coincide con las zonas de se infiere que hay fallas (Figura 5.24).

Los óxidos de hierro y manganeso son los que ocupan una mayor área de distribución. Hay tres zonas con óxidos: una en la parte central, otra en el centro-este junto a una brecha y una última en la región sur (Figura 5.24). Solamente en algunos puntos, los datos proporcionados por la compañía minera especifican si los óxidos de hierro son hematita o magnetita. Tanto los óxidos de hierro como los óxidos de manganeso muestran un traslape con una brecha ubicada al este del depósito.

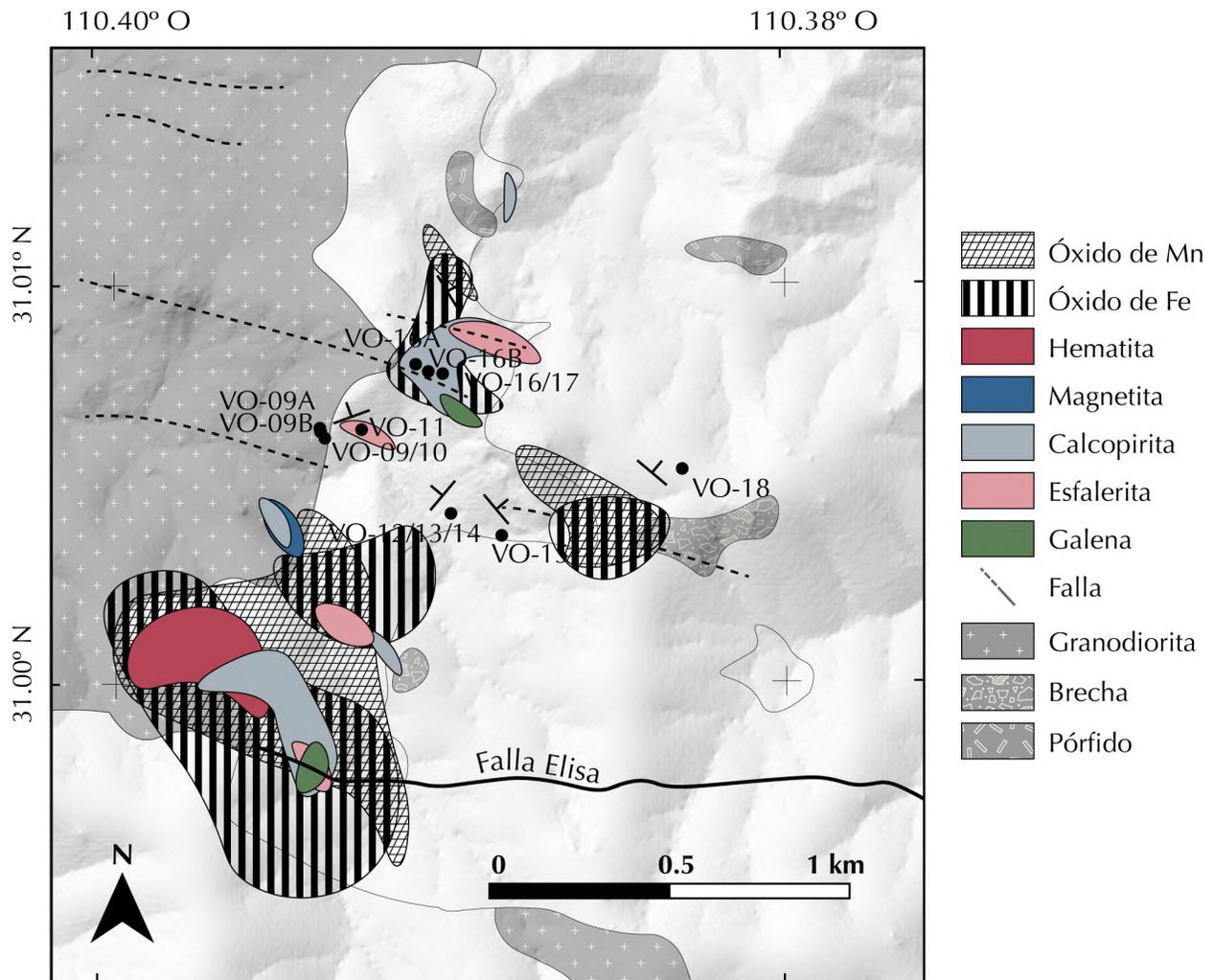


Figura 5.24 Mapa con distribución de los minerales metálicos de interés económico y geológico. Distribución construida con los datos de este estudio y los datos proporcionados por Grupo México.

En el protolito ígneo, es decir, la granodiorita Cuitaca se encontró ilmenita asociada con los anfíboles magmáticos y grafito rodeando los óxidos (Figura 5.25A,B). Una veta emplazada posteriormente dentro de la granodiorita presenta cristales de menor tamaño de óxidos de hierro, los cuales pueden ser ilmenita o hematita asociados con cuarzo (5.25C). Además, hay la ilmenita magmática tiene coronas de titanita (Figura 5.25D,E,F).

En la zona central del exoskarn hay presencia de calcopirita asociada con bornita, esfalerita y galena. El mismo patrón se encuentra en el límite sur del depósito, cerca del contacto con el Granito Cananea (Figura 5.25). En particular, se observó el intercrecimiento de calcopirita con esfalerita y tetraedrita (Figura 5.25) y la esfalerita también se encuentra rodeando los cristales de granate (Figura 5.25B). Los sulfuros están asociados con carbonatos de cobre

como la malaquita y la azurita (Figura 5.25G) y se distribuyen por todo el depósito tipo skarn.

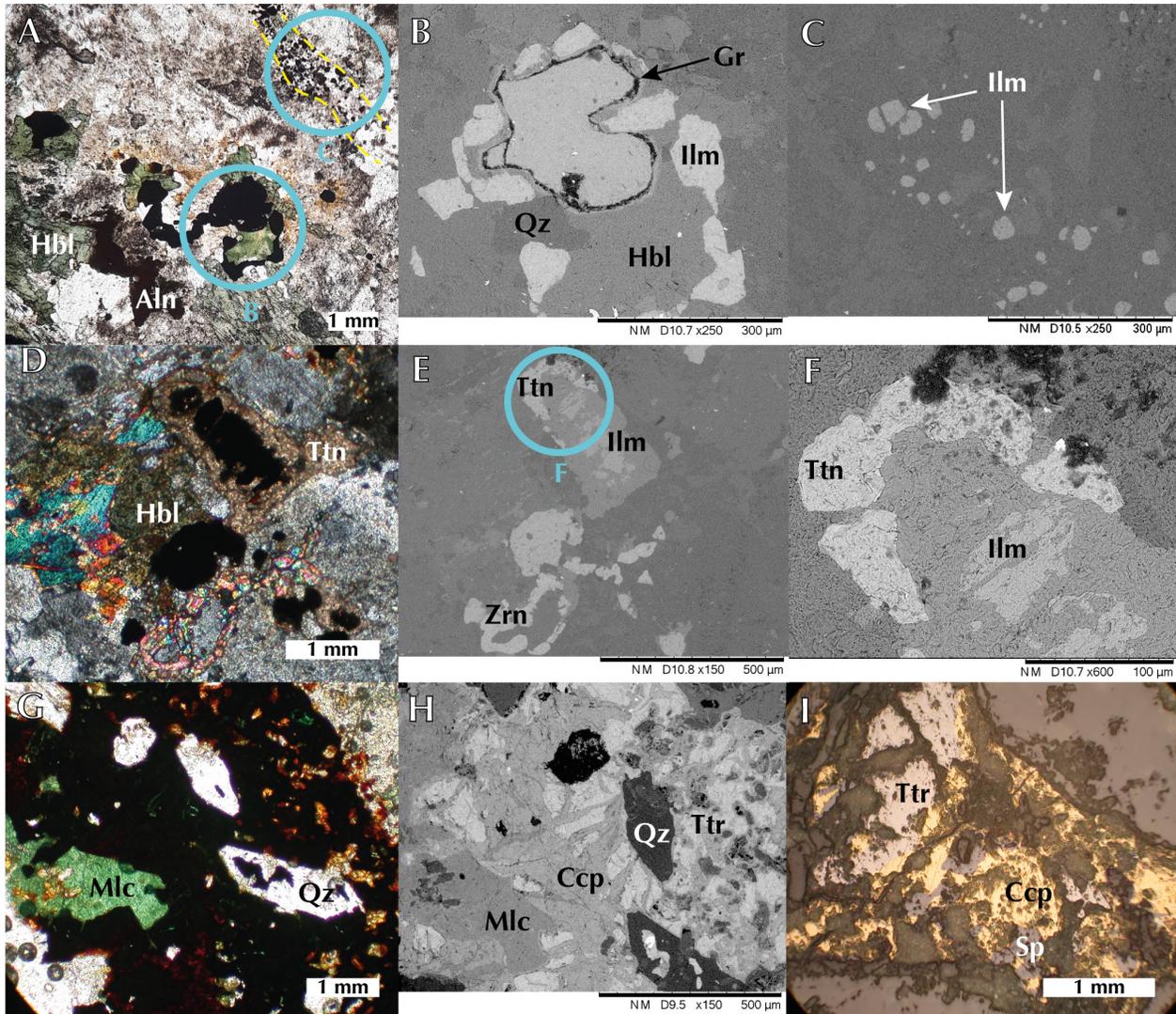


Figura 5.25 Imágenes de mineralización obtenidas con SEM en el depósito de Puertecitos. Imágenes A, B, C, D, E, F de la muestra VO-09A, G, H, I de la muestra VO-16. A) Fotomicrografía indicando en azul las áreas donde se realizaron análisis con microscopio electrónico de barrido. Líneas amarillas discontinuas indican veta de donde se hizo el análisis de la imagen C. B) Imagen de electrones retrodispersados de los minerales opacos asociados con los anfíboles. Las tonalidades de gris indican composiciones distintas. C) Imagen con electrones retrodispersados de los minerales opacos de la veta. D) Fotomicrografía con nícoles cruzados, coronas de titanita rodean minerales opacos. E y F) Imagen con electrones retrodispersados de la misma área de la fotomicrografía D. G) Fotomicrografía de la zona con sulfuros y carbonatos de cobre. H) Imagen con electrones retrodispersados de la misma área. I) Fotomicrografía con luz reflejada de la misma área. **Hbl**=hornblenda **Aln**=allanita **Qz**=cuarzo **Ilm**=ilmenita **Ttn**=titanita **Zrn**=zircón **Mlc**=malaquita **Ccp**=calcopirita **Ttr**=tetraedrita **Sp**=esfalerita **Gr**=grafito

5.4 Geoquímica

Se realizaron 50 análisis geoquímicos en rocas carbonatadas, pórfidos y skarns de Buenavista Zinc y Puertecitos para determinar su contenido de elementos mayores, elementos trazas y tierras raras. Debido a la alteración hidrotermal y por la composición química de las rocas carbonatadas, se obtuvieron altas pérdidas por calcinación (LOI por siglas en inglés). A continuación, se presentan los resultados de las rocas carbonatadas, pórfidos y skarns de Buenavista Zinc y Puertecitos separados por su porcentaje de pérdida por calcinación. Los análisis geoquímicos se encuentran en el Anexo 3.

5.4.1 Elementos mayores

En términos de elementos mayores se observa que las rocas carbonatadas de Buenavista Zinc y Puertecitos tienen un contenido de sílice bajo (>50% en peso), menor que los pórfidos (entre el 60% y 80% en peso) (Figura 5.26). Las muestras con alto LOI carbonatadas e ígneas tienen valores de sílice con el mismo comportamiento de las muestras con bajo LOI (Figura 5.26). Las muestras de Puertecitos provenientes del exoskarn tienen los valores de sílice más altos (entre 45% y 50% en peso) dentro de las rocas carbonatadas (Figura 5.26).

Las rocas carbonatadas de Buenavista Zinc y Puertecitos muestran un rango más amplio en el contenido de titanio (entre 0% y 1.5% en peso) respecto a los pórfidos (entre 0.2% y 1% en peso); las rocas carbonatadas contienen hasta 40% en peso de hierro, mientras que los pórfidos contienen hasta 12% en peso; también el contenido de magnesio es mayor en las rocas carbonatadas (< 25% en peso) respecto a los pórfidos de Buenavista Zinc (<5% en peso) (Figura 5.26). Asimismo, el contenido de aluminio es menor en las rocas carbonatadas (hasta 16% en peso) que en los pórfidos (entre 10% y 16% en peso) (Figura 5.26). Por otra parte, el contenido de fósforo en las rocas carbonatadas de Buenavista Zinc está entre 0% y 0.8% en peso, mientras en los pórfidos es de <0.3% en peso; de igual manera, el contenido de calcio varía entre 5% y 50% en peso en las rocas carbonatadas y en los pórfidos es <5% en peso (Figura 5.26). El contenido de potasio es mayor en los pórfidos e intrusivos (entre 2% y 14% en peso) que en las muestras carbonatadas (<2% en peso).

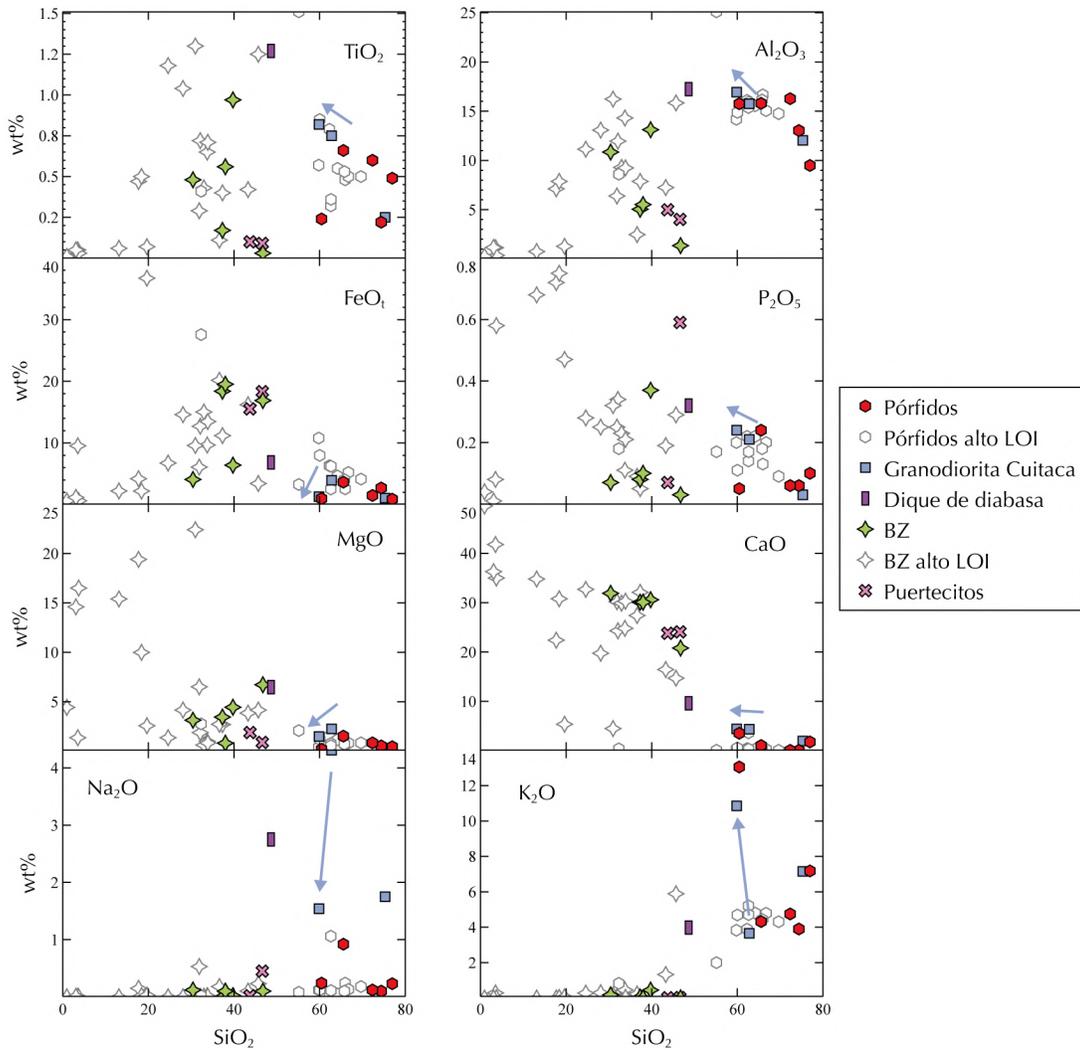


Figura 5.26 Diagramas de variación de elementos mayores contra SiO_2 de Buenavista Zinc y Puertecitos. Las muestras con pérdida por calcinación (LOI) > al 4% están representadas con bordes grises sin colorear. Las muestras con pérdida por calcinación < al 4% tienen figuras con bordes negros y relleno de color. Las flechas azules indican el cambio composicional de las muestras de la granodiorita Cuitaca por skarnificación, indicando el endoskarn.

Por último, el contenido de sodio no varía en las rocas carbonatadas y los pórfidos (<1% en peso), pero es notablemente mayor en las muestras de Cuitaca (entre 1% y 2% en peso) (Figura 5.26).

El efecto de las altas pérdidas de calcinación se nota únicamente en el MgO, donde las muestras carbonatadas con alto LOI tienen valores más altos respecto a las muestras con bajo LOI (Figura 5.26).

El efecto de la skarnificación se señala con las flechas azules para las muestras de la granodiorita Cuitaca (Figura 5.26). La roca que pertenece al endoskarn tiene valores más altos respecto a la muestra de la granodiorita sana: 0.82% vs. 0.75% en peso de TiO_2 en el

endoskarn y la granodiorita respectivamente; 16.94% vs 15.76% en peso de Al_2O_3 , respectivamente; 0.24% vs. 0.21% en peso de P_2O_5 respectivamente (Figura 5.26). El valor de K_2O aumenta drásticamente de 3.66% en la granodiorita respecto al endoskarn que contiene 10.85% en peso, mientras que el Na_2O disminuye drásticamente 4.31% en la granodiorita a 1.54% en el endoskarn (Figura 5.26). El valor de CaO permanece casi igual ca. 4.4% en peso en ambas litologías y el MgO y FeO_t disminuyen respectivamente de 2.26% a 1.48% en peso y de 3.95% a 1.3% en peso, de la granodiorita al endoskarn (Figura 5.26).

También se muestran tres análisis de la granodiorita Cuitaca, colectadas cerca del contacto con el skarn de Puertecitos. Las muestras de Cuitaca tienen valores más altos de calcio (entre 1.9% y 4.4% en peso) comparado con los pórfidos (entre 0.06% y 3.53% en peso) (Figura 5.26). El mismo comportamiento se observa en el sodio, la granodiorita Cuitaca contiene entre 1.5% y 4.3% en peso y los pórfidos contienen entre 0.1% y 0.92% en peso (Figura 5.26). En los óxidos restantes, no se observan diferencias respecto a los pórfidos.

Las rocas ígneas, es decir, los pórfidos, la granodiorita Cuitaca y un dique de diabasa que cortaba al depósito tipos skarn de Buenavista Zinc, se clasificaron por su composición química de acuerdo con De la Roche et al. (1980) (Figura 5.27). La mayoría de los pórfidos caen entre los campos de granodiorita y granito (Figura 5.27A). Las muestras de Cuitaca tienen una distribución dispersa. Se ubican en el campo de la sienodiorita, monzodiorita y granito (Figura 5.27A). El efecto de la alteración se refleja en un corrimiento de los pórfidos hacia la derecha en el eje X (Figura 5.27A). Por otro lado, el dique se ubica en el campo del gabro alcalino (Figura 5.27A).

En el diagrama AFM las muestras de los pórfidos y de Cuitaca se ubican en el campo calcialcalino (Figura 5.27B). Resalta que las muestras con alto LOI tienen un enriquecimiento en hierro que las recorre hacia arriba, al campo toleítico (Figura 5.27B).

En el diagrama del índice de Shand se observa que la pérdida de los elementos más móviles, el sodio y el potasio, genera que los pórfidos se ubiquen en el campo peraluminoso (Figura 5.27C). Respecto al magnesio, todas las rocas se ubican en el campo de rocas diferenciadas (Figura 5.27C).

De acuerdo con el diagrama de Le Maitre et al. (1989) los pórfidos de Buenavista Zinc se encuentran en el campo de alto potasio y en el campo de las shoshonitas (Figura 5.27D). Un pórfido y una muestra de Cuitaca tienen valores altos anómalos de potasio (Figura 5.27C).

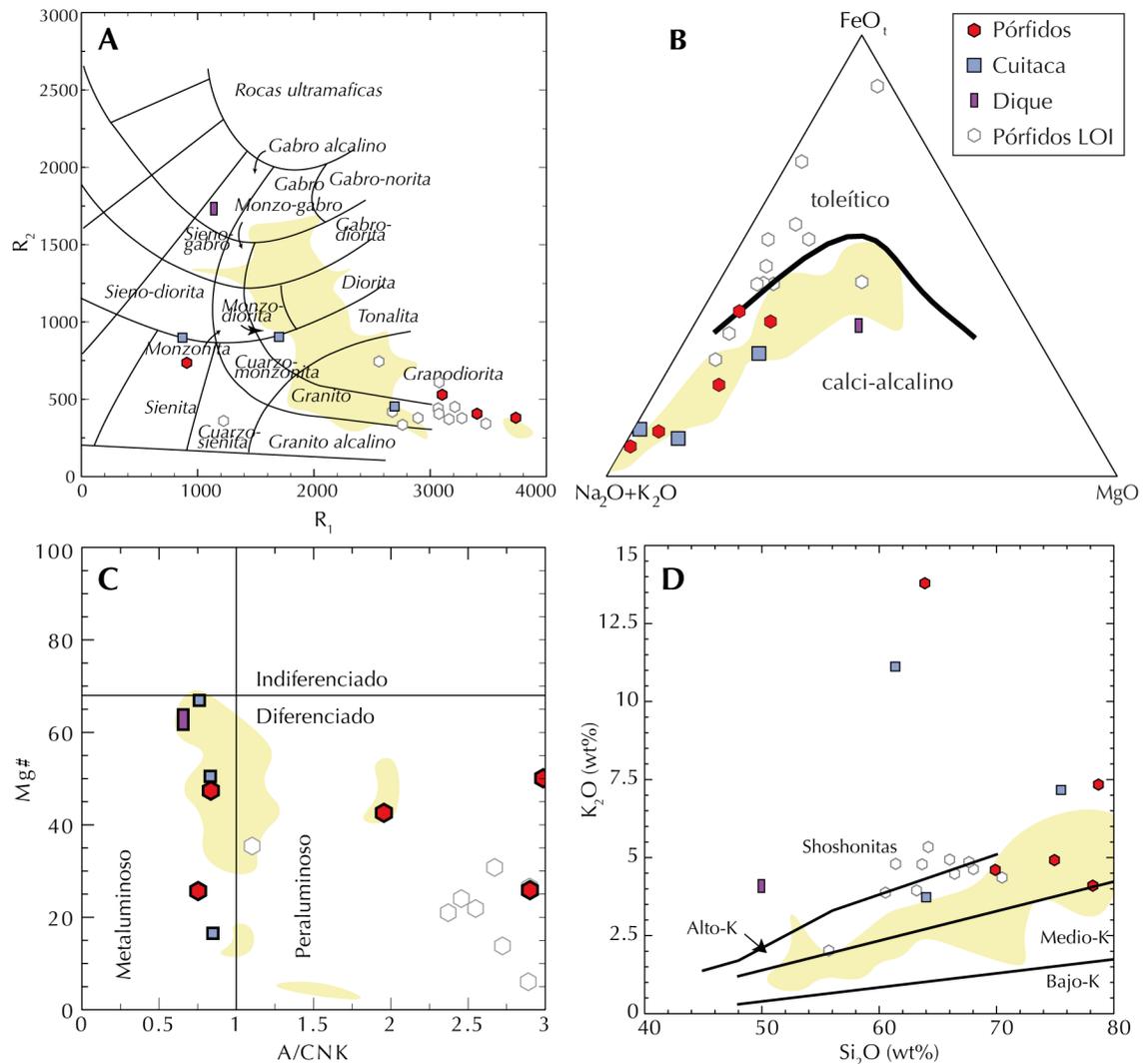


Figura 5.27 Diagramas de clasificación para las rocas ígneas del área de estudio. Se comparan con los intrusivos asociados a pórfidos de cobre de Arizona, indicados con los campos amarillos. A) Diagrama de clasificación química R_1R_2 de De La Roche et al. (1980). $R_1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$ y $R_2=6Ca+2Mg+Al$, usando milicaciones. B) Diagrama AFM para clasificar magmas toleíticos y calci-alcalinos de Irving y Baragar (1971). FeO_1 calculado con la relación $FeO_1=0.8998*Fe_2O_3$ C) Diagrama de A/CNK contra $Mg\#$. Índice de Shand (1927) para diferenciar campos metaluminoso y peraluminoso, límite en $Mg\#$ para magmas indiferenciados y diferenciados de acuerdo con Gill (2010). D) Diagrama de discriminación respecto a K_2O y SiO_2 de Le Maitre et al. (1989).

5.4.2 Elementos trazas

En los diagramas de variación de elementos traza se observan valores similares entre los carbonatos y los pórfidos en estroncio, pues contienen <400 ppm ambos grupos (Figura 5.28). De igual manera, en el iterbio los valores de los pórfidos y las rocas carbonatadas se ubican entre 0 y 7.5 ppm (Figura 5.28).

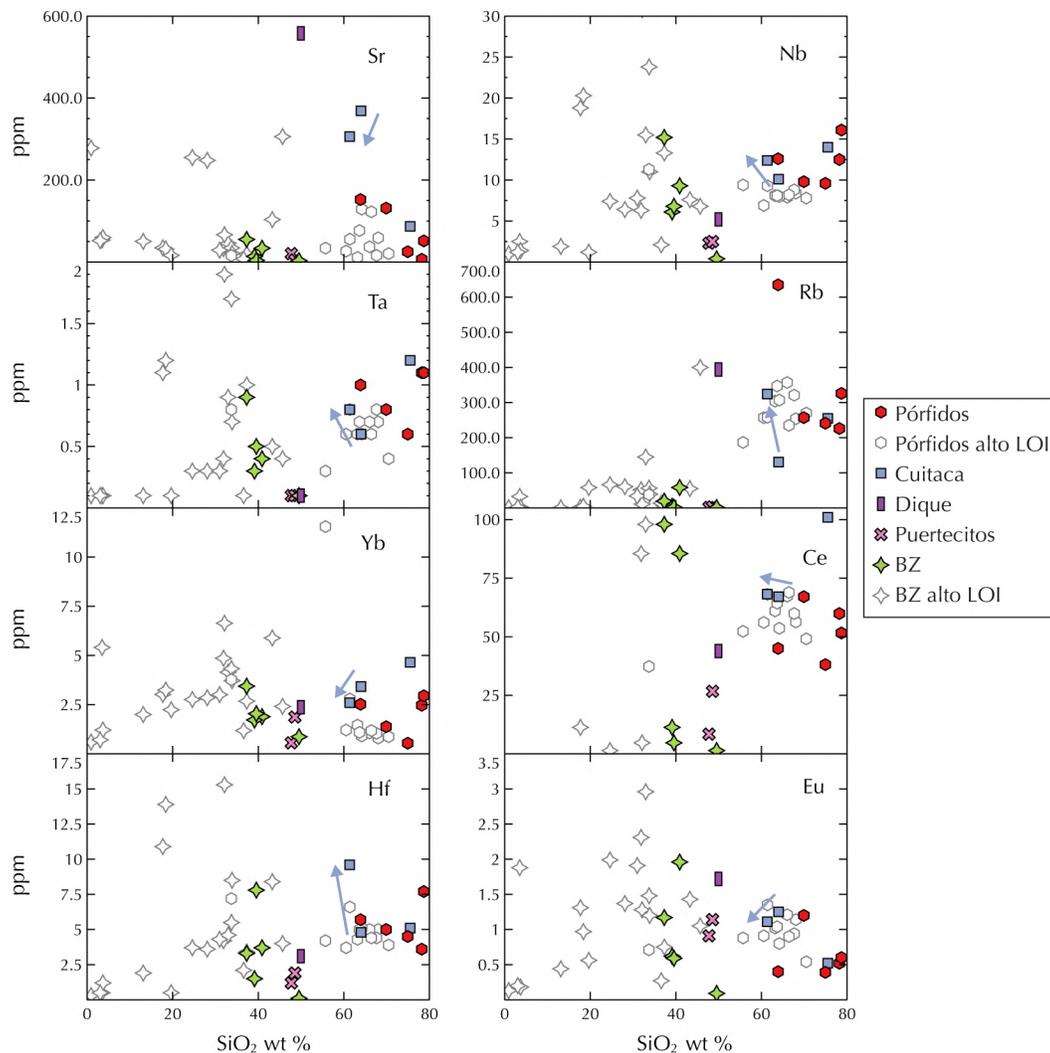


Figura 5.28 Diagramas de variación de elementos trazas contra SiO₂. Muestras con LOI (por sus siglas en inglés *Loss Of Ignition*) > 4% se indican con bordes grises. Muestras con LOI < 4% aparecen con relleno de colores. Flechas azules indican cambio composicional de muestras de granodiorita Cuitaca por skarnificación, indica endoskarn.

En algunos elementos trazas los pórfidos muestran variaciones más restringidas respecto a las rocas carbonatadas, en concreto, el contenido de niobio varía entre 0.4 y 23 ppm en las rocas carbonatadas y entre 6 y 16 ppm en los pórfidos (Figura 5.28); las rocas carbonatadas tienen valores entre 0.1 y 1.9 ppm de tántalo, mientras que los pórfidos tienen valores entre

0.6 y 1.2 ppm (Figura 5.28); el contenido de iterbio varía entre 0.56 y 6.64 ppm en las rocas carbonatadas, mientras varía entre 0.54 y 4.65 ppm en los pórfidos (Figura 5.28); el hafnio también muestra un rango de valores mayor para las rocas carbonatadas, entre 0.5 y 15.3 ppm, y de 3.6 a 7.7 ppm en los pórfidos (Figura 5.28); y finalmente, los valores de europio varían entre 0.09 y 2.96 ppm y entre 0.3 y 1.2 ppm para las rocas carbonatadas y los pórfidos, respectivamente (Figura 5.28). Hay un comportamiento diferente en el rubidio, donde los carbonatos están empobrecidos (<200 ppm) respecto a los pórfidos (entre 200 y 635 ppm) (Figura 5.28). Por otro lado, parece que no hay traslape del contenido de cerio entre las rocas carbonatadas y los pórfidos, pues los valores de los pórfidos varían entre 37 y 100 ppm, y en las rocas carbonatadas hay valores por arriba y por debajo de ese rango (Figura 5.28).

En las muestras de Cuitaca se observó un empobrecimiento de estroncio, iterbio y europio en la muestra con endoskarn respecto a la roca ígnea sin alteración. Por el contrario, los valores de tántalo, niobio, rubidio y hafnio aumentaron. Y además, el valor de cerio se mantuvo casi igual en ambas muestras (Figura 5.28).

En el diagrama multielemental normalizado al manto primitivo se observa en las muestras de pórfidos e intrusivos de Buenavista Zinc un patrón con una pendiente negativa debido al enriquecimiento en elementos LILE (*Large-Ion Lithophile Elements*) respecto a elementos HFSE (*High Field Strength Elements*), así como la presencia de anomalías positivas en K y Pb, y anomalías negativas de Nb, Ta y Ti respecto al manto primitivo (Figura 5.29). La mayoría de los pórfidos están enriquecidos en Fe y empobrecidos en Sr, Pb y tierras raras pesadas respecto a las muestras de Cuitaca (Figura 5.29).

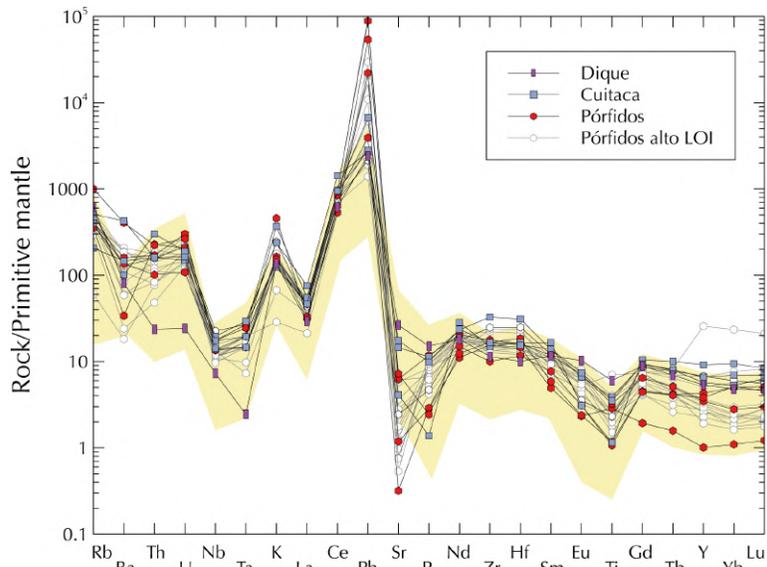


Figura 5.29 Diagrama multielemental de elementos trazas normalizados con valores del manto primitivo de Sun y McDonough (1989). El patrón amarillo corresponde a los intrusivos asociados a pórfidos de cobre de Arizona.

5.4.3 Tierras raras

En el diagrama de las tierras raras normalizado a condrita se observa en las rocas carbonatadas de Buenavista Zinc un patrón plano debido al enriquecimiento en tierras raras ligeras respecto a pesadas con anomalía negativa en europio (Figura 5.30 izq.). Algunas rocas de Buenavista Zinc y de Puertecitos presentan un patrón cóncavo por el empobrecimiento de tierras raras ligeras en la parte izquierda del diagrama, así como un patrón plano con pendiente negativa hacia las tierras raras pesadas (Figura 5.30 izq.). Las muestras carbonatadas tienen patrones similares a los patrones de los pórfidos del área (Figura 5.30 izq.). En cambio, las muestras con alto LOI muestran concentraciones de tierras raras variables por debajo y por arriba de los pórfidos (Figura 5.34 izq.).

Los patrones de Cuitaca están más enriquecidos en tierras raras que los pórfidos (Figura 5.30 der.). Las muestras de Cuitaca y algunos pórfidos tienen una fuerte anomalía negativa en europio, mientras otras muestras de pórfidos tienen una anomalía negativa muy débil. El dique tiene una anomalía ligeramente positiva. Algunos pórfidos, principalmente los que tienen alto LOI presentan un empobrecimiento en tierras raras pesadas (Figura 5.30 der.).

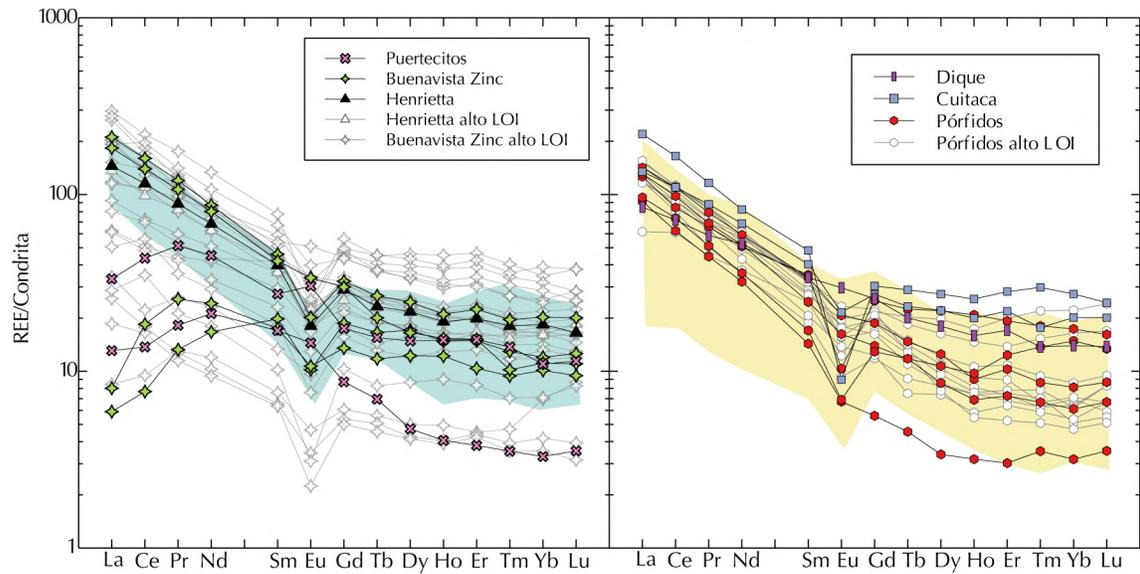


Figura 5.30 Diagramas de tierras raras normalizadas con la condrita de Sun y McDonough (1995). En el diagrama de la **izquierda** se muestra en color azul el patrón de las rocas intrusivas del área de estudio, es decir pórfidos y muestras de la granodiorita Cuitaca. En diagrama de la **derecha** se muestran los patrones individuales de las rocas intrusivas de este estudio y en amarillo el patrón de los intrusivos de Arizona asociados a pórfidos.

6. Discusión

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, surgen algunas reflexiones sobre la relación temporal entre los eventos tectónicos, magmáticos y metasomáticos. En este capítulo se discute la cronología de los eventos tectónicos, los factores que controlan el zoneamiento mineralógico de los depósitos de Buenavista Zinc y Puertecitos, así como la cronología relativa de todos los eventos geológicos del área de estudio.

6.1 Estructuras asociadas a la compresión Laramide

La etapa compresiva en el noreste de Sonora y sureste de Arizona ha sido asociada clásicamente con la Orogenia Laramide (Davis, 1979; Calmus et al., 2011; Del Rio-Salas, et al., 2017). Ésta se caracteriza por la presencia de fallas inversas de alto ángulo que involucran el basamento proterozoico y que sugieren un acortamiento de la corteza relativamente pequeño (Davis, 1979). En el área de estudio se identificó este tipo de falla en tres localizaciones que se presentan a continuación.

6.1.1 Cabalgamiento del Granito Cananea sobre la Cuarcita Bolsa

En el noroeste del tajo de Buenavista del Cobre, el granito Cananea de edad proterozoica (Anderson y Silver, 1977) cabalga a la Formación Bolsa edad cámbrica (Meinert, 1982) (Figura 5.3B). Este rasgo indica un evento compresivo. El cabalgamiento tiene un rumbo NW-SE similar a la falla Ricketts (Figura 5.1), que se ubica en la zona central de la secuencia paleozoica y tiene un echado hacia el SW, al contrario de la falla Ricketts que tiene echado al NE. Estos rasgos sugieren que son fallas del mismo evento de deformación.

6.1.2 La falla inversa Ricketts

La falla Ricketts se ubica en el centro del depósito de Buenavista Zinc. Tiene un rumbo NNW-SSE y un echado de 76° hacia el NE (Figura 5.1 y 5.3B). El bloque ubicado al SSW de la falla Ricketts es por lo tanto el bloque de piso y el bloque ubicado al NNE del plano de falla corresponde con el bloque de techo (Figura 5.1). Esta falla pone en contacto a la Formación Escabrosa de edad misisípica al SSW con la Formación Bolsa de edad cámbrica al NNE, por lo cual la falla Ricketts es una falla inversa. Además, esta falla controla un ligero

cambio en el rumbo de las capas paleozoicas, pasando de un rumbo N60W al NW de la secuencia paleozoica y cerca de la falla Elisa a un rumbo N30W al SE de la secuencia paleozoica (Figura 5.1).

De acuerdo con la cartografía del área de estudio, la falla Ricketts está cortada al sur por la falla Capote Pass y al norte por la falla Elisa, lo cual indica que la falla Ricketts es más antigua que las dos antes mencionadas. Además, en el centro de la secuencia paleozoica los cuerpos porfídicos cortan a la falla Ricketts (Figura 5.3 C-C'), lo que indica que el fallamiento es anterior al emplazamiento de los pórfidos. Igualmente, la falla Ricketts no corta hacia el norte a la Formación Henrietta (edad Jurásica) ni hacia el sur a la Formación Mesa (edad Cretácica), lo que sugiere que esta falla es más antigua que la Formación Henrietta.

Debido a que en el bloque de piso de la falla Ricketts (i.e. Formación Escabrosa) se encontraron evidencias en la superficie de skarnificación (minerales calco-silicatados como granate o piroxeno), mientras que en la Formación Escabrosa al oeste de la falla se observaron evidencias de marmolización (recristalización sin presencia de granate o piroxeno) (Figura 5.11), por consiguiente el zoneamiento mineralógico indica que no está cortado por la falla Ricketts, y sugiere que la falla fue anterior a la formación del skarn y abre la posibilidad de que haya skarnificación en el bloque de piso de la falla Ricketts.

6.1.3 La falla inversa Elisa

La falla Elisa pone en contacto, al sur, a las rocas metasedimentarias del Paleozoico (i.e. Grupo Naco, Carbonífero) sobre las rocas volcánicas de la Formación Henrietta (Jurásico), al norte de la falla (Figura 5.1). Los barrenos ubicados al norte la falla Elisa, pero cuya inclinación es hacia el SW, cortan a la secuencia paleozoica después de las rocas volcánicas de la Formación Henrietta, en puntos que proyectados hacia la superficie están al sur de la falla Elisa, lo que indica que el echado de la falla Elisa es hacia el S. Dichos puntos son muy cercanos a la traza de la falla en superficie indicando que es una falla de alto ángulo (Figura 5.3 A-A', B-B'). Además, en estos barrenos el contacto entre las rocas volcánicas y metacarbonatadas presenta un intenso fracturamiento y brechamiento a lo largo de unos 20m de espesor, lo cual se interpreta como la zona de falla a profundidad. En suma, con un

plano de falla buzando hacia el S, el bloque de techo es el bloque sur donde aflora la secuencia calcárea paleozoica, mientras que el bloque de piso es el bloque al norte de la falla donde aflora la Formación Henrietta (Figura 5.2), se interpreta que la falla Elisa es una falla inversa (Figura 5.4).

Por otro lado, el trazo de la falla Elisa coincide con el contacto entre las rocas volcánicas cretácicas de la Formación Mesa (edad mínima de 67.4 ± 3.4 Ma, Meinert, 1982) y la secuencia metasedimentaria paleozoica (Figura 5.1). Esto sugiere que la falla Elisa también corta a la Formación Mesa, y por lo tanto, es contemporánea o posterior a la deposición de la Formación Mesa en el Cretácico tardío. En cambio, los pórfidos del distrito de Cananea con edades comprendidas entre 54.2 ± 2 y 59 ± 2 Ma (edades de K-Ar en biotita y sericita hidrotermal, Wodziki, 1995), que cortan a la falla Elisa, no presentan evidencias de deformación (Figura 5.3A), lo que apoya concluir que la falla fue anterior a la intrusión de los pórfidos y que, probablemente, el magma utilizó este plano de debilidad, entre otros, para emplazarse.

Hacia el NW en el área de Puertecitos, la falla Elisa es truncada por la granodiorita Cuitaca (Figura 5.17) y no se observa una continuación del plano de falla hacia el oeste, dentro del intrusivo. Eso sugiere que la falla Elisa es anterior al emplazamiento de la granodiorita Cuitaca (64 ± 3 Ma, Anderson y Silver, 1977). Todo ello implica que el movimiento que generó a la falla Elisa ocurrió en un lapso inferior a 3.5 Ma, entre la deposición de la Formación Mesa (67.4 ± 3.4 Ma) y la intrusión de la granodiorita Cuitaca (64 ± 3 Ma), y por consiguiente, a nivel regional, se puede relacionar con la Orogenia Laramide por un magmatismo y una tectónica contemporáneos.

En resumen, se propone la siguiente secuencia de eventos geológicos a nivel local (Figura 6.1): **1**) deposición de la Formación Mesa (69 ± 0.2 Ma a 67.4 ± 3.4 Ma), **2**) evento compresivo caracterizado por las fallas inversas del distrito (falla Elisa, falla Ricketts y cabalgamiento Granito Cananea-Bolsa), **3**) emplazamiento del cuerpo intrusivo Cuitaca (64 ± 3 Ma) y **4**) emplazamiento tardío de cuerpos porfídicos (54.2 ± 2 a 59 ± 2 Ma) (Figura 6.1). Sin embargo, queda pendiente hacer un recorrido en el área sur de Puertecitos para comprobar si la granodiorita Cuitaca no presenta o no evidencias de deformación frágil o dúctil asociadas con el sistema de la falla Elisa.

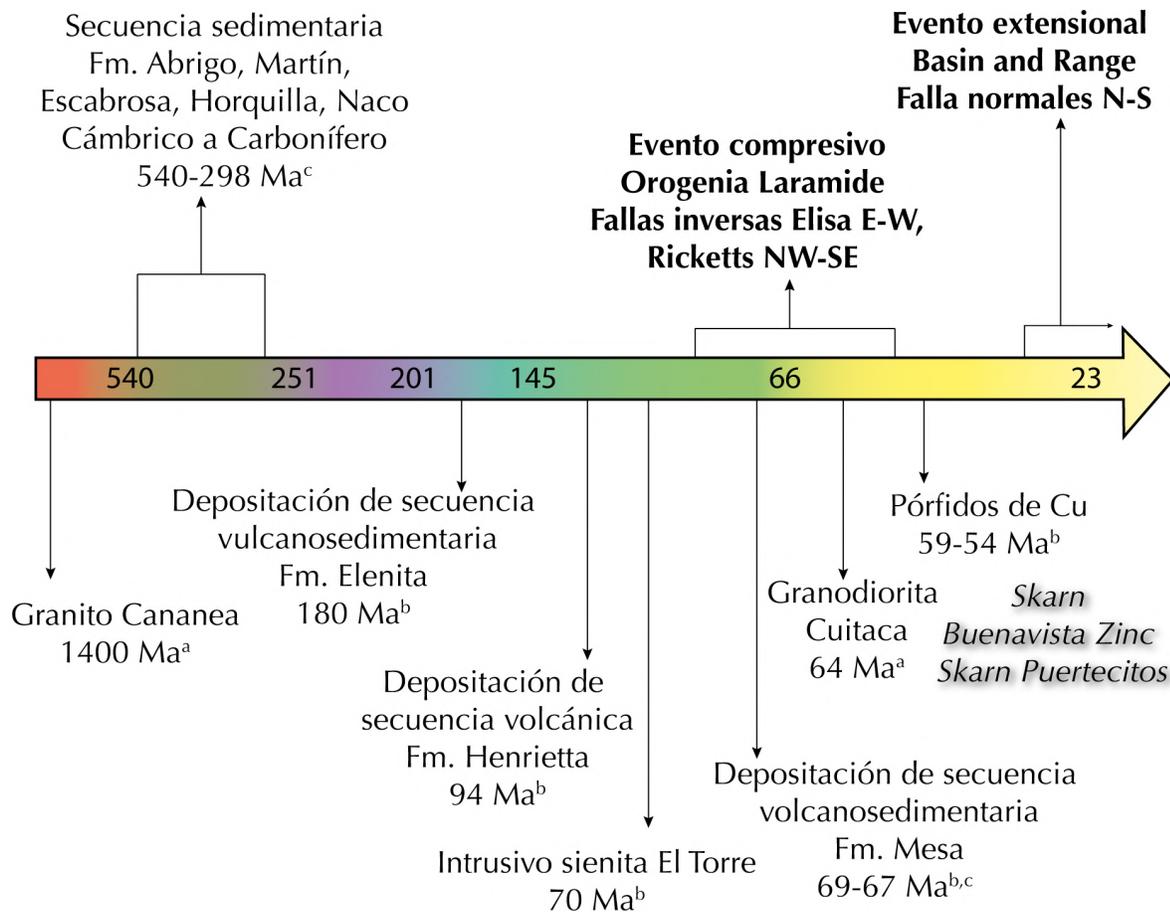


Figura 6.1 Cronología de los principales eventos geológicos del área de estudio. En negritas se indican eventos de deformación. La escala de tiempo no es proporcional. Los depósitos tipo skarn se encuentran asociados a la granodiorita y los pórfidos. Referencias bibliográficas: ^aAnderson y Silver (1977), ^bWodziki (1995), ^cMeinert (1982)

Para concluir, las relaciones de campo en conjunto con el estudio de barrenos y los estudios geocronológicos previos permiten caracterizar la falla Elisa como una falla inversa que estuvo activa entre 67 y 64 Ma, lo cual confirma que el área fue sometida a una compresión durante el Cretácico contemporánea con la Orogenia Laramide (Calmus et al. 2011). Esta interpretación podría tener repercusiones sobre la geometría del depósito y su exploración en el futuro.

6.2 Extensión *Basin and Range* del Oligoceno tardío-Mioceno

6.2.1 La falla normal Capote Pass

El límite sur de la secuencia paleozoica corresponde a la falla Capote Pass la cual tiene un rumbo E-W similar a la falla Elisa (Figura 5.2). Dicha falla pone en contacto el basamento

proterozoico al norte y la secuencia paleozoica con las rocas volcánicas de la Formación Henrietta (Jurásico) y la Formación Mesa (Cretácico) al sur. Desde los estudios realizados por Meinert (1980), el avance del tajo en la mina ha dejado al descubierto el límite entre la secuencia paleozoica y la Formación Henrietta cada vez más al sur (comparar las figuras 3.1 y 5.1), mostrando que la falla Capote Pass es una falla normal con un echado hacia el sur. Con esta geometría, la secuencia paleozoica descubierta recientemente en el tajo pertenece al bloque de piso de la falla Capote Pass (Figura 5.1).

La edad de la falla Capote Pass está sujeta a discusión. En estudios anteriores la falla Capote Pass se había asociado junto con la falla Elisa y la falla Tinaja Creek al mismo evento de deformación debido a que sus rumbos son similares (Valentine, 1936; Meinert, 1982; Wodziki, 1995). Así que se interpretaba este sistema de fallas como previo a la deposición de la Formación Mesa ya la intrusión de la granodiorita Cuitaca. El echado hacia el S y que la falla pone en contacto rocas paleozoicas del bloque de piso con rocas cretácicas del bloque de techo sugieren que la falla Capote Pass es una falla normal (Figura 5.3) posterior al magmatismo, contemporánea con el evento regional extensional *Basin and Range* que ocurrió durante el Oligoceno tardío y el Mioceno (Figura 6.1). Si bien el rumbo E-W de la falla Capote Pass no es compatible con el rumbo N-S o NNW-SSE de las estructuras asociadas a este evento extensional en la región, una posibilidad para que el rumbo N80W de la falla Capote Pass sea compatible con la dirección de extensión regional N70E es que presente una componente lateral derecha. Sin embargo, la operación minera en esta parte del yacimiento de Buenavista Zinc no ha permitido la búsqueda de indicadores cinemáticos a lo largo de la traza de la falla.

6.3 Control del zoneamiento mineralógico en el skarn de Buenavista Zinc

El zoneamiento mineralógico de los skarns se ha estudiado ampliamente desde la década de los 1980's (Meinert, 1987; Chang y Meinert, 2004; Meinert et al., 2005; Meinert, 2020). Un skarn es una roca conformada por granate y piroxeno principalmente y es el resultado de procesos metamórficos y metasomáticos (Meinert et al., 2005). Así, el emplazamiento de un intrusivo genera metamorfismo de contacto y también puede exsolver un fluido hidrotermal que dé lugar a un skarn metasomático (Meinert, 2020) (Figura 2.3). Cuando

domina el metamorfismo, la mineralogía resultante está controlada por la composición del protolito. Las calizas dan lugar a mármoles, las areniscas ricas en cuarzo a cuarcitas, las lutitas a *hornfels* (Meinert, 2020). Las litologías con composiciones intermedias como las calizas arcillosas se transforman en rocas con una composición más variada (Zarayskiy et al., 1987). Por ejemplo, una caliza arcillosa se puede metamorfizar en un mármol con wollastonita y una lutita calcárea resulta en un hornfels calco-silicatado (Figura 2.3). Por otro lado, cuando domina el metasomatismo, la mineralogía está controlada principalmente por la composición del fluido hidrotermal (Meinert, 2020) (Figura 2.3). Un skarn metasomático originado por un plutón típicamente presenta la asociación granate > piroxeno alrededor del plutón, piroxeno > granate en una región más distal con respecto al plutón y wollastonita en el límite del skarn con los mármoles (Meinert, 2020). Además, la proporción de granate y piroxeno es un reflejo del estado de oxidación del sistema, ya que el granate contiene Fe^{3+} (ambiente oxidante) y el piroxeno contiene Fe^{2+} (ambiente reductor) (Chang y Meinert, 2004) (Figura 2.4). Los skarns de zinc se caracterizan por un zoneamiento químico, presente en distintas fases, desde magnesio proximal a la fuente de calor y fluidos, hierro a distancias intermedias hasta manganeso en las zonas más distales del skarn (Einaudi et al., 1981) (Figura 2.6).

6.3.1 Zoneamiento mineralógico y la falla Elisa

De acuerdo con trabajos previos realizados por Meinert (1982), Wodziki (1995) y Farfán-Panamá (2002), el zoneamiento mineralógico del depósito tipo skarn está controlado, en parte, por la falla Elisa. Ellos observaron que las rocas con mayor contenido en granate se localizaban cerca de la falla, las rocas ricas en piroxenos se encontraron en la parte central del depósito y las rocas con wollastonita en una posición más distal respecto a la falla Elisa. Sin embargo, en esta Tesis de Maestría se encontraron rocas con piroxeno dominante y con wollastonita cerca de la falla (Figura 5.11) y muestras con abundante granate lejos de la falla Elisa (Figura 5.11). Por lo tanto, la abundancia de minerales índice identificados en las muestras estudiadas en esta tesis no es congruente con la interpretación previa que consideraba que la falla Elisa es el centro del zoneamiento mineralógico del skarn y la fuente principal de fluidos hidrotermales.

6.3.2 Ausencia de endoskarn en los pórfidos

De manera general, la presencia de un endoskarn (i.e., minerales calco-silicatados en el protolito ígneo) indica un intercambio de fluidos entre el cuerpo magmático y la roca encajonante. En el depósito de Buenavista Zinc hay varios cuerpos porfídicos y brechas mineralizadas que cortan a la secuencia paleozoica (Figura 5.11, 5.12) que podrían representar una fuente potencial de fluidos y de calor responsables de la skarnificación y formación del depósito. Sin embargo, la ausencia de minerales calco-silicatados en estos cuerpos porfídicos (Figura 5.12) indica que no hubo un intercambio de fluidos entre dichas rocas y las rocas encajonantes carbonatadas, o al menos, este intercambio no fue lo suficientemente intenso para generar un endoskarn. El hecho de que el zoneamiento mineralógico del yacimiento tipo skarn de Buenavista Zinc no se distribuya de manera concéntrica alrededor de estos cuerpos porfídicos, también sugiere que no fueron la fuente de calor que desarrolló al depósito tipo skarn.

6.3.3. Control estratigráfico de la geometría del skarn

La reconstrucción del zoneamiento mineralógico realizada a detalle en este trabajo y basada en Meinert (1982), Wodziki (1995) y Farfán-Panamá (2002) muestra que los minerales asociados al depósito tipo skarn están distribuidos de acuerdo con la estratigrafía de las rocas paleozoicas (Figura 5.11 y 5.12). La cartografía indica que la zona con más granate se ubica en el Grupo Naco (Figura 5.11), después, esta zona es rodeada por una región con piroxeno y granate, donde la cantidad de granate decrece y la de piroxeno aumenta hacia su periferia, y por último, alrededor de la zona con piroxeno, el skarn está delimitado por una zona con wollastonita predominantemente. Al oeste de la falla Ricketts, la Formación Escabrosa está marmolizada, lo cual ayudó a identificar el frente del mármol, el cual delimita el skarn de la zona donde las rocas sólo sufrieron un cambio isoquímico provocado por la fuente de calor (Figura 5.11).

En la sección C-C' se aprecia que el zoneamiento mineralógico de los minerales calco-silicatados tiene la misma orientación que las capas (Figura 5.12). En particular, el piroxeno predomina en las capas inferiores de la secuencia paleozoica (i.e., formaciones Abrigo, Martín y Escabrosa). En la Formación Abrigo, se formaron mármoles con crecimiento

incipiente de piroxeno y wollastonita, así como rocas con una matriz de piroxenos y regiones dominadas por calcita y cristales de granate euhedrales (Figura 5.6). Esto sugiere que las rocas de la Formación Abrigo pudieron haber sufrido un cambio debido al transporte local de elementos entre la micrita arcillosa y las micritas. Además, la presencia predominante de piroxeno respecto al granate puede indicar que los fluidos eran reductores y ricos en sílice, lo cual permitió la cristalización de piroxenos y no de granates (Meinert, 2020). Alternativamente, esta relación entre ambos minerales puede reflejar un ambiente reductor propicio para la formación de piroxenos (Chang y Meinert, 2008).

En la Formación Martín, la skarnificación es muy limitada, ya que está conformada por micritas y dolomías marmolizadas con un desarrollo incipiente de piroxeno, escasa wollastonita y, la presencia en algunas zonas de relictos de granate (Figura 5.7). Esta formación aloja horizontes de esfalerita masiva, y tiene las leyes más altas de zinc según los ensayos proporcionados por la mina. Ya que la Formación Martín se encuentra entre las Formaciones Naco (predomina el granate) y la Formación Abrigo (predomina el piroxeno), la ausencia de minerales silicatados cálcicos no se debe a un alejamiento de la fuente de calor o de los fluidos, sino probablemente a la composición del protolito (Meinert et al., 2005). En otras palabras, el protolito contenía poco silicio y aluminio por lo que únicamente permitió la formación incipiente en algunos puntos de granate o piroxeno.

En el Grupo Naco, se encuentra la zona con la mayor abundancia de granate con textura masiva y de grano grueso. En esta litología el skarn resultante presenta varias generaciones de granate y contiene una menor proporción de piroxeno con respecto al granate (Figura 5.9 y 5.10). La abundancia de granates indica que los fluidos tenían una composición rica en sílice y calcio o bien que sufrieron un cambio en el estado de oxidación y se volvieron más oxidantes (Chang y Meinert, 2008). La ausencia del protolito inalterado del Grupo Naco sugiere que el skarn correspondiente al Grupo Naco es predominantemente metasomático.

6.3.4 La fuente del calor y de los fluidos

De acuerdo con el zoneamiento mineralógico del depósito tipo skarn de Buenavista Zinc, el contenido de granate en el Grupo Naco y orientado hacia el noreste puede indicar una fuente ígnea ubicada estructuralmente arriba del Grupo Naco, es decir al noreste del skarn.

La fuente de calor y fluidos podría corresponder a rocas ígneas que ya fueron erosionadas o que no afloran porque se ubican debajo de la Formación Mesa.

Por otra parte, que el skarn de Buenavista Zinc esté asociado a un yacimiento de tipo pórfido de cobre hace posible que los múltiples cuerpos porfídicos y las brechas que intrusionan al skarn (Figura 5.1) puedan ser considerados como la fuente del calor, cuya energía proviene del sistema a nivel regional asociado al arco magmático que origino el clúster de pórfidos de cobre de Arizona-Sonora.

En ausencia de rocas encajonantes del Cretácico temprano, como las del grupo Bisbee, es difícil constreñir la edad de la skarnificación, la cual podría ser teóricamente asociada a una fuente de calor de edad entre el Triásico y el Cretácico tardío. Sin embargo, el contexto geológico local sugiere que el skarn se formó durante el magmatismo del Cretácico tardío (Figura 6.1).

6.4 Naturaleza del skarn de Puertecitos

6.4.1 Desarrollo espacial del zoneamiento mineralógico

El zoneamiento mineralógico de los minerales calco-silicatados de depósito tipo skarn de Puertecitos se distribuye de la siguiente manera: dentro de la granodiorita Cuitaca se observan cúmulos de piroxeno, cuarzo y wollastonita; en el contacto con la granodiorita se forman hornfels de piroxeno; hacia el este se encuentran los skarn de granate; y más al sureste abunda otra vez el piroxeno. Este patrón E-W sugiere que el piroxeno se encuentra más cerca de la fuente y el granate más lejos de la misma, al contrario del zoneamiento mineralógico clásico en los skarns con una fuente plutónica (Meinert et al., 2005). Sin embargo, falta más trabajo de campo para constreñir con más precisión la zona más rica en piroxeno y la zona con mayor granate, con el objetivo de entender cómo se desarrolló la alteración tipo skarn. El contacto de la granodiorita Cuitaca y el skarn representa una oportunidad para estudiar la interacción que hubo entre ambas litologías, para detallar los intercambios de masa y calor que se llevaron a cabo, así como para entender la fuente de los fluidos mineralizantes del depósito (Figura 5.19).

6.4.2 Endoskarn de la granodiorita Cuitaca

En la granodiorita Cuitaca, el endoskarn (Figura 5.20C y D) ubicado cerca del contacto con los metasedimentos, se caracteriza por cúmulos de clinopiroxeno, cuarzo y titanita, así como por la presencia de epidota y wollastonita. Esto sugiere que el intrusivo es la fuente de calor y de fluidos de este skarn. Además, lejos del contacto con los sedimentos (Figura 5.19), la granodiorita Cuitaca contiene grafito asociado con los óxidos, lo cual indica que el magma cristalizó en un ambiente reductor, lo cual es compatible con la formación preferencial de piroxenos y no de granates (Meinert, 2020).

La presencia de un endoskarn encontrado en la granodiorita Cuitaca en el sector de Puertecitos también sugiere que este intrusivo pudo ser la fuente de calor y de fluidos debajo de la secuencia paleozoica de Buenavista Zinc, porque los metasedimentos en ambos depósitos son de la misma secuencia y porque la granodiorita Cuitaca es el intrusivo más grande del distrito.

6.4.3 Control litológico del exoskarn

En los metasedimentos paleozoicos de Puertecitos, la mineralogía del exoskarn está controlada por la litología como sugiere la presencia de hornfels calco-silicatados intercaladas con mármoles (Figura 5.23A). También se puede apreciar el control litológico de la skarnificación en el mapa, con la presencia de lentes de mármol en contacto con la granodiorita Cuitaca (Figura 5.25), lo que sugiere que la composición de las capas fue más importante para el desarrollo del skarn que la cercanía a la fuente de fluidos y calor.

En el skarn de Puertecitos se conserva claramente la mineralogía asociada con el desarrollo prógrado del skarn ya que los piroxenos y granates presentan muy poca alteración a epidota, clorita o carbonatos, relacionada con la etapa retrógrada. Brechas mineralizadas y pórfidos cortan al skarn prógrado (5.24E). Se observó en el mapa que la mineralización dentro del skarn y el skarn retrógrado se localizan donde las brechas intrusionan al skarn, lo cual sugiere que existe una correlación entre las brechas mineralizadas y el desarrollo del skarn retrógrado (Figura 5.25). Se puede concluir que los fluidos mineralizantes fueron posteriores al evento de skarnificación.

6.4.4 Comparación del skarn de Puertecitos con el skarn de Buenavista Zinc

El skarn de Puertecitos tiene algunas similitudes con el skarn de Buenavista Zinc. Si consideramos el orden estratigráfico de los metasedimentos, en Puertecitos se repite el patrón de piroxeno en capas inferiores y granate en capas superiores (figura 5.11 y 5.23). Como en Buenavista Zinc, en Puertecitos la litología del protolito parece tener también un rol más importante respecto a la estructura en el desarrollo del skarn. Por último, en ambos depósitos la mineralización más importante está asociada a un evento hidrotermal posterior al desarrollo del skarn. Sin embargo, varias diferencias se pueden encontrar entre los dos depósitos: el desarrollo del skarn retrógrado en Puertecitos es muy débil comparado con el skarn de Buenavista Zinc (Figura 5.6 y 5.22). Además, en Puertecitos no se encontraron hasta el momento mantos de sulfuros como en Buenavista Zinc. Por otro lado, en Puertecitos la mineralización está distribuida cerca de los pórfidos y brechas que cortan al skarn y existen óxidos de manganeso, así como carbonatos de cobre que no se encuentran en Buenavista Zinc (Figura 5.23).

Estas observaciones sugieren los depósitos tuvieron un desarrollo prógrado similar porque los protolitos sedimentarios eran iguales y donde la litología fue importante para el desarrollo de los minerales calco-silicatados. Sin embargo, las diferencias en la etapa retrógrada del skarn y la alteración posterior sugiere que posiblemente Buenavista Zinc y Puertecitos se encontraban en posiciones distintas respecto a la fuente de fluidos y calor.

6.5 Geoquímica

Floyd y Winchester (1978) sugirieron que el metamorfismo y la alteración hidrotermal difícilmente modifican las concentraciones de elementos inmóviles en los protolitos. Mrozek et al. (2020) utilizaron este principio para discriminar al endoskarn del exoskarn en el depósito tipo skarn de Antamina, Perú. En esta tesis de maestría, donde se consideraban clásicamente a los pórfidos y a la granodiorita Cuitaca como las posibles fuentes magmáticas, se investigó la distribución de sus concentraciones de elementos mayores y trazas y se comparó con los skarns de Buenavista Zinc y Puertecitos para identificar relaciones que apuntaran a la fuente de fluidos y calor de ambos depósitos.

Las rocas metasedimentarias de Buenavista Zinc y Puertecitos, es decir los skarns y los mármoles, presentan una gran variación en contenido de sílice y en su pérdida por

calcinación (LOI por sus siglas en inglés) (Figura 6.2). Este comportamiento es similar al reportado en otros skarns (Vander-Auwer y Verkaeren, 1993; Williams-Jones et al., 2010; Mrozek et al., 2020; Zhao et al., 2022), donde el contenido de LOI aumenta hacia el protolito sedimentario y el contenido de sílice aumenta hacia el protolito ígneo. Esto sugiere que las rocas con mayor porcentaje de LOI son más parecidas al protolito sedimentario y las rocas con menor LOI son más parecidas al protolito ígneo.

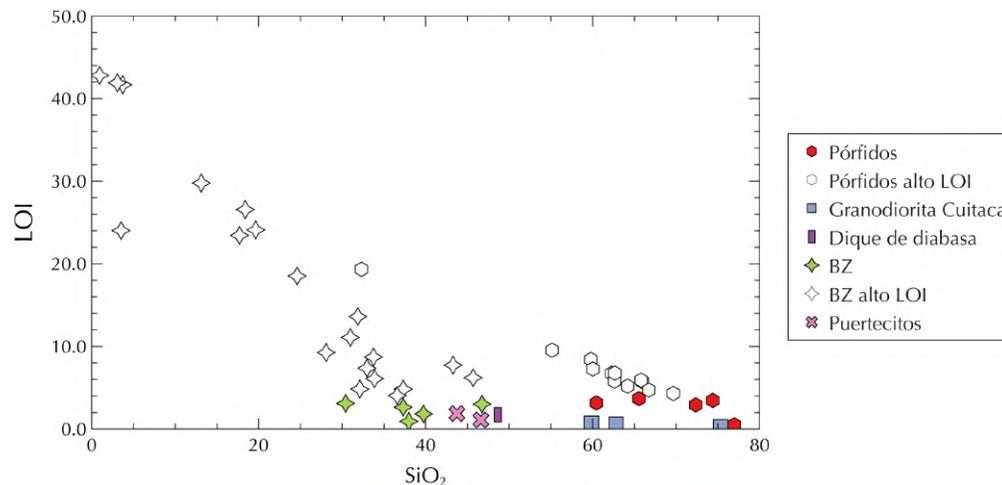


Figura 6.2 Diagrama de variación de pérdida por calcinación (LOI) contra SiO_2 .

Los elementos mayores y trazas de las rocas metacarbonatadas no muestran una distribución que apunte a las concentraciones de las rocas ígneas (Figura 5.28 y 5.31), tampoco se encuentran cerca o alrededor de ellas. En especial elementos inmóviles como Ti, Al, Yb y Ta no muestran una distribución correlacionable con los protolitos ígneos (Figura 5.31). Las concentraciones de estos elementos en los skarns y mármoles se distribuyen en un rango más amplio que en los pórfidos y la granodiorita. Las rocas de origen sedimentario en Buenavista Zinc y Puertecitos tienen diferentes grados de alteración, lo cual dificulta el estudio de la composición de los protolitos sedimentarios. Por lo tanto, se puede observar que sin el precursor sedimentario no es posible identificar si las variaciones en elementos mayores y trazas se deben a los protolitos o a la skarnificación. De tal manera, queda pendiente hacer un análisis en cada formación con los diferentes grados de alteración.

Las rocas de los pórfidos tienen en general el mismo comportamiento que las muestras de Cuitaca en elementos mayores y trazas (Figura 5.26 y 5.28), lo cual confirma que son cuerpos co-magmáticos. El dique de diabasa analizado, interpretado anteriormente como

un evento magmático más joven, mostró una composición comparable con las composiciones de la granodiorita Cuitaca y los pórfidos, lo cual sugiere que tienen una misma fuente magmática para los tres tipos de roca (Figura 5.26, 5.27, 5.28).

En conclusión, los datos geoquímicos no fueron suficientes para distinguir la fuente ígnea del skarn de Buenavista Zinc. No hubo patrones claros en la distribución de elementos mayores y trazas que apuntaran hacia los cuerpos ígneos. En otras palabras, este método resultó no ser el adecuado para discriminar la fuente ígnea de este depósito.

6.6 Patrones y cronología de la mineralización

6.6.1 Sulfuros

En Buenavista Zinc, los minerales metálicos (i.e., calcopirita y esfalerita) están asociados con el skarn retrógrado o a asociaciones posteriores que alteran al skarn, principalmente en vetas con cuarzo y calcita (Figura 5.14). El único sulfuro asociado con el skarn prógrado es la pirita y la calcopirita y la esfalerita están asociadas a la etapa retrógrada del skarn y a un evento posterior que generó vetas enriquecidas en estos sulfuros (Figura 5.8). Existe una tercera generación de vetas de calcita sin mineralización. Según Einaudi et al. (1981) la precipitación de minerales metálicos depende de los patrones de flujo y la composición de los fluidos. En Buenavista Zinc los fluidos que transportaron los metales no son de origen puramente magmático, es probable que tengan un aporte sedimentario y uno meteórico (Shimazaki y Sakai, 1984; Meinert, 2005).

En Puertecitos, los sulfuros se encuentran alterando a granates y piroxenos de forma disseminada o en vetas, asociados con carbonatos de cobre. En este depósito, los sulfuros también están asociados con la etapa retrógrada. La distribución de los sulfuros cerca de brechas mineralizadas (Figura 5.26) sugiere que el aporte de metales fue principalmente magmático.

6.6.2 Coincidencia con el zoneamiento mineralógico

En Buenavista Zinc, la distribución de la mineralización coincide, en cierta manera, con la distribución mineralógica del skarn (Figura 5.11 y 5.13). Por ejemplo, la presencia del horizonte de magnetita coincide con el límite de la zona donde domina el piroxeno (figura

5.13). Además, la presencia de hematita coincide con la región donde domina el granate. Cabe resaltar que la distribución del piroxeno en las Formaciones Abrigo y Escabrosa, y del granate en el Grupo Naco es análogo al patrón de desarrollo de los sulfuros ricos en cobre, los cuales se ubican en la Formación Abrigo y sulfuros ricos en zinc en las Formación Martín y Grupo Naco (Figura 5.13). Clásicamente, en las zonas proximales a la fuente de calor y de fluidos dominan el granate y la magnetita, mientras que en las zonas distales dominan el piroxeno y la hematita (Meinert, 2005), además, los mantos de sulfuros masivos están asociados con las zonas distales de los skarns. En Buenavista Zinc, los mantos de sulfuros masivos, y la distribución opuesta al zoneamiento clásico de los óxidos de hierro y los silicatos cálcicos sugieren que el skarn de Buenavista Zinc se encuentra más lejos de su posible fuente ígnea (Meinert, 1987) que en Puertecitos. Por otro lado, en Puertecitos la ausencia de mantos apoya que se encuentre cerca de su fuente ígnea (Meinert, 1987).

6.7 Perspectivas

En el depósito tipo skarn de Buenavista Zinc aún quedan problemas sin resolver. Recientemente se hicieron estudios para fechar la mineralización en el distrito de Cananea (Del Rio-Salas et al., 2017), pero queda pendiente conocer la edad de la skarnificación en el depósito de Buenavista Zinc. En el futuro se podrían hacer fechamientos de U-Pb en los granates para conocer la edad absoluta del skarn de Buenavista Zinc (Gavedon, et al., 2017; Burisch et al., 2019).

Otro tema pendiente es la ubicación de una fuente de calor y de los fluidos del skarn de Buenavista Zinc. Estudios de inclusiones fluidas, de isótopos estables de oxígeno o de azufre podrían ayudar a ubicar dicha fuente (Suzuki y Hayashi, 2019; Korges et al., 2020; Xue et al., 2021).

En el depósito tipo skarn de Puertecitos queda pendiente hacer una campaña de campo para delimitar a detalle el zoneamiento mineralógico del skarn. Este depósito ofrece oportunidades idóneas para realizar estudios composicionales en los granates y en los piroxenos (Siesgesmund, et al., 2018; Massawe y Lentz, 2022) porque estos minerales tienen poca alteración.

7. Conclusiones

A partir del estudio a detalle de las fallas que afectan al yacimiento de Buenavista Zinc, se pudo dilucidar que la deformación compresiva contemporánea con la Orogenia Laramide está expresada en el distrito por las fallas inversas Ricketts y Elisa y por el cabalgamiento del granito Cananea sobre la Formación Bolsa. De acuerdo con el análisis realizado en esta tesis de maestría, este sistema de fallas fue activo en un periodo de tiempo constreñido entre 67 y 64 Ma. Concretamente, la falla Elisa es una falla inversa de alto ángulo que se formó entre la deposición de la formación Mesa (67.4 ± 3.4 Ma, Meinert, 1982) y la intrusión de la granodiorita Cuitaca (64 ± 3 Ma, Anderson y Silver, 1977), que elevó la secuencia paleozoica al nivel de las rocas volcánicas cretácicas. Si bien, la falla Capote Pass se interpretó como una falla normal, que registra el único evento extensional que corresponde a la deformación *Basin and Range* del Eoceno-Mioceno; su rumbo E-W no la hace compatible con las estructuras NNW-SSE asociadas a este evento extensional, al menos que tenga una componente lateral derecha que la haría compatible con la dirección de la extensión regional N70E. Sin embargo, las condiciones físicas y técnicas en la mina no han permitido la búsqueda de evidencias para caracterizar la edad y cinemática de esta falla.

A partir de los datos geoquímicos y petrológicos de las rocas en los skarns de Buenavista Zinc y Puertecitos se demostró que el zoneamiento mineralógico del skarn de Buenavista Zinc no está afectado por las fallas descritas anteriormente, lo cual apunta a que el skarn se formó después de la deformación que se observa actualmente. Además, en Buenavista Zinc, los pórfidos cortan a las fallas o las utilizaron como planos preferenciales para ascender, por lo tanto, el sistema de pórfidos de cobre y los depósitos tipo skarn se formaron después de las fallas. De la misma manera, dado que las brechas mineralizadas contienen clastos del skarn de Puertecitos, este yacimiento fue anterior a las brechas mineralizadas asociadas a este depósito.

El zoneamiento mineralógico del depósito tipo skarn en Buenavista Zinc sugiere que la fuente de calor y fluidos todavía no se conoce, pero estaría ubicada al noreste del depósito, debajo de la Formación Mesa. Además, en esta tesis de maestría se demostró que el

zoneamiento mineralógico es controlado principalmente por la litología, ya que coincide con la distribución de las formaciones que componen a la secuencia sedimentaria paleozoica. Por lo tanto, se propone que es el calor de todo el sistema porfídico responsable de generar al skarn. Esto hace que el skarn de Buenavista Zinc sea controlado predominantemente por metamorfismo e intercambios de materia locales, lo cual explica también la ausencia de un endoskarn. En cambio, en Puertecitos, el hallazgo de un endoskarn en la granodiorita Cuitaca confirma que este intrusivo fue la fuente de fluidos y calor del skarn. Los análisis de SEM en el endoskarn y en la Granodiorita Cuitaca también indican que los cristales de piroxenos en el endoskarn se formaron a partir de un magma reductor.

Por último, se demostró que la mineralización en ambos depósitos es posterior al skarn prógrado y está asociada principalmente al skarn retrógrado. En Buenavista Zinc el skarn retrógrado se desarrolló intensamente, dejando relictos de la mineralogía prógrada. La mineralización de cobre se distribuye en la Formación Abrigo y la de zinc en la Formación Martín. La presencia de mantos de sulfuros masivos indica zonas más distales respecto a la fuente de calor. En Puertecitos el skarn retrógrado es débil y la mineralización está claramente ubicada alrededor de las brechas mineralizadas. La ausencia de mantos masivos y la presencia de minerales ricos en cobre concuerda con la cercanía a su fuente, la granodiorita Cuitaca.

8. Referencias

- Anderson T.H., Silver, L.T., 1977, U-Pb isotope ages of granitic plutons near Cananea, Sonora: *Economic Geology*, 72, 827-836.
- Anderson J.L. y Bender E.E., 1989, Nature and origin of Proterozoic A-type granitic magmatism in the southwestern United States of America: *Lithos*, 23, 19-52.
- Arvizu, Harim E., Iriondo, Alexander, Izaguirre, Aldo, Chávez-Cabello, Gabriel, Kamenov, George D., Solís-Pichardo, Gabriela, Foster, David A., & Lozano-Santa Cruz, Rufino, 2009, Rocas graníticas pérmicas en la Sierra Pinta, NW de Sonora, México: Magmatismo de subducción asociado al inicio del margen continental activo del SW de Norteamérica: *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 26(3), 709-728.
- Arvizu, H.E., Iriondo, A., 2011, Estudios isotópicos de Hf en zircones de granitoides pérmicos en el NW de México: Evidencia de mezcla de magmas generados a partir de la fusión de múltiples fuentes corticales: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(3), 493-518.
- Atkinson, W.W. y Einaudi, M.T., 1978, Skarn formation and mineralization in the contact aureole at Carr Fork, Bingham Utah: *Economic Geology*, 73, 1326-1365.
- Baker, T., van Achterberg, E., Ryan, C.G., Lang, J.R., 2004, Composition and evolution of ore fluids in magmatic-hydrothermal skarn deposit: *Geology*, 32, 117-120.
- Burisch, M., Gerdes, A., Meinert, L. D., Albert, R., Seifert, T., & Gutzmer, J., 2019, The essence of time-fertile skarn formation in the Variscan Orogenic Belt: *Earth and Planetary Science Letters*, 519, 165-170.
- Burt, D.M., 1977, Mineralogy and petrology of skarn deposits: *Rendiconti della Societa Italiana di Mineralogia e Petrologia*, 33, 859-873.
- Busby-Spera, C.J., 1988, Speculative tectonic model for the early Mesozoic arc of the southwest Cordilleran United States: *Geology*, 16, 1121-1125.
- Bushnell, S.E., 1988, Mineralization at Cananea, Sonora, Mexico, and the paragenesis and zoning of breccia pipes in quartz feldspathic rock: *Economic Geology*, 83, 1760-1781.
- Calmus, T., Vega-Granillo, R., Lugo-Zazueta, R., 2011, Evolución geológica de Sonora durante el Cretácico Tardío y el Cenozoico, *en* Calmus, T. (ed.), *Panorama de la Geología de Sonora, México*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, 227-266.

Chang, Z., Meinert, L.D., 2004, The magmatic-hydrothermal transition evidence from quartz phenocryst textures and endoskarn abundance in Cu-Zn skarns at the Empire mine, Idaho, USA: *Chemical Geology*, 210, 149-171.

Chang, Z. y Meinert, L.D., 2008, Zonation in skarns – Complexities and controlling factors: PACRIM Congress, 303-306.

Clechenko, C.C. y Valley, J.W., 2003, Oscillatory zoning in garnet from the Willsboro wollastonite skarn, Adirondack Mts, New York: A record of shallow hydrothermal processes preserved in granulite facies terrane: *Journal of Metamorphic Geology*, 21, 771-784.

Cline, J.S., 2003, How to concentrate copper: *Science*, 302, 2075-2076.

Davis, G.H., 1979, Laramide folding and faulting in southeastern Arizona: *American Journal of Science*, 279, 543-569.

De la Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., Marchal, M., 1980, A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2 –diagram and major-element analyses- its relationships with current nomenclature: *Chemical Geology*, 29, 183-210.

Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J., 1992, An introduction to the rock- forming minerals: Essex, United Kingdom, Pearson Education Ltd., 696.

Del Rio-Salas, R., Ochoa-Landín, L., Valencia-Moreno, M., Calmus, T., Meza-Figueroa, D., Salgado-Sauto, S., Kirk, J., Ruiz, J., Mendivil-Quijada, H., 2017, New U-Pb and Re-Os geochronology of Laramide porphyry copper mineralization along the Cananea lineament, northeastern Sonora, Mexico: Contribution to the understanding of Cananea copper district: *Ore Geology Reviews*, 81, 1125-1136.

Dobson, D.C., 1982, Geology and alteration of the Lost River tin-tungsten -fluorine deposit, Alaska: *Economic Geology*, 77, 1033-1052.

Einaudi, M.T., Meinert, L.D., Newberry, R.J., 1981, Skarn deposits: *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume, 317-391.

Farfán-Panamá, J.L., 2002, Caracterización de los yacimientos en skarn de Buenvista en Cananea, Son.: Hermosillo, Sonora, Universidad de Sonora, tesis de maestría, 113 pp.

Floyd, P.A., y Winchester, J.A., 1978, Identification and discrimination of altered and metamorphosed volcanic rocks using immobile elements: *Chemical Geology*, v. 21, p. 291–306.

Gaspar, M., Knaack, C., Meinert, L.D., and Moretti, R., 2008, REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 185–205.

Gevedon, M., Seman, S., Barnes, J. D., Lackey, J. S., & Stockli, D. F., 2018, Unraveling histories of hydrothermal systems via U–Pb laser ablation dating of skarn garnet: *Earth and Planetary Science Letters*, 498, 237-246.

Gill, R., 2010, *Igneous rocks and processes: a practical guide*, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell, 428.

Grajales-Nishimura, J.M., Terrell, D.J., Damon, P.E., 1992, Evidencias de la prolongación del arco magmático Cordillerano del Triásico Tardío-Jurásico en Chihuahua, Durango y Coahuila: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geología Petrolera*, 42, 1-18.

Haldar, S. K., 2020, *Introduction to mineralogy and petrology*. Elsevier.

Hammarstrom, J. M. y Zen, E-An, 1986, Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer: *American Mineralogist*, 71, 1297-1313.

Harris, A.C., Kamenetsky, V.S., White, N.C., van Achterberg, E., Ryan, C.B., 2003, Melt inclusions in veins: linking magmas and porphyry Cu deposits: *Science*, 302, 2109-2111.

Heinrich, C.A., Ryan, C.G., Mernagh, T.P., Eadington, P.J., 1992, Segregation of ore metals between magmatic brine and vapor: A fluid inclusion study using PIXE microanalysis: *Economic Geology*, 87, 1566-1583.

Heron, R.M. y Jones, W.R., 1968, Ore deposits of the Central Mining district, New Mexico, *en* Ridge, J.D., ed., *Ore deposits of the U.S., 1933-1967*, (Graton-Sales vol.): New York, American Institute Mining Metall. Petroleum Engineers, 1211-1238.

Huggins, F.E., Virgo, D., and Huchenholz, H.G., 1977, Titanium-containing silicate garnets. II. The crystal chemistry of melanites and schorlomites: *American Mineralogist*, 62, 646–665.

Irvine, T.N.J., y Baragar W.R.A.F., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8.5, 523-548.

Jamtveit, B., 1991, Oscillatory zonation patterns in hydrothermal grossular andradite garnet, nonlinear dynamics in regions of immiscibility: *American Mineralogist*, 76, 1319-1327.

Korges, M., Weis, P., Lüders, V., & Laurent, O., 2020, Sequential evolution of Sn–Zn–In mineralization at the skarn-hosted Hämmerlein deposit, Erzgebirge, Germany, from fluid inclusions in ore and gangue minerals: *Mineralium Deposita*, 55(5), 937-952.

Lasaga, A.C. y Rye, D.M., 1993, Fluid flow and chemical reactions in metamorphic systems: *American Journal of Science*, 293, 361-404.

Lawton, T.F., Molina Garza, R.S., 2014, U-Pb geochronology of the type Nazas Formation and superjacent strata, northeastern Durango, Mexico: Implications of a Jurassic age for

continental-arc magmatism in north-central Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 126(9/10) 1181–1199.

Le Maitre, R.W.(Editor), Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, M., Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sørensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A.R. & Zanettin, B., 1989, *A Classification of Igneous Rocks and a Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. p.193.

Massawe, R. J., y Lentz, D. R., 2022, Skarn formation and CuAg mineralization in the McKenzie Gulch area, northern New Brunswick, Canada: Implication for the applications of mineral chemistry in exploration for porphyry copper and skarn deposits: *Journal of Geochemical Exploration*, 238, 106965.

McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Connelly, J.N., 2001, Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 113, 521–531.

McKee, M., y Anderson, T. H, 1998, Mass-gravity deposits and structures in the Lower Cretaceous of Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 110(12), 1516-1529.

Megaw, P.K.M., Ruiz, J., Titley, S.R., 1988, High-temperature, carbonate-hosted Ag-Pb-Zn(Cu) deposits of northern Mexico: *Economic Geology*, 83, 1856-1885.

Meinert, L.D., 1982, Skarn, manto and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea mining district, Sonora, Mexico: *Economic Geology*, 77, 919-949.

Meinert, L.D., 1987, Skarn zonation and fluid evolution in the Groundhog mine, Central mining district, New Mexico: *Economic Geology*, 82, 523–545.

Meinert, L.D., 1992, Skarns and skarns deposits: *Geoscience Canada*, 19, 145-162.

Meinert, L.D., 1995, Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits – Chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization, *en* Thompson, J.F.H. (ed.), *Magmas, fluids and ore deposits: Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 23, 401-418.

Meinert, L.D., 2020, The genesis and exploration of skarn deposits: *Geochemical Perspectives*, 9(1), 17-41.

Meinert, L.D., Dipple, G.M., Nicolescu, S., 2005, World Skarn Deposits, *en* Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume: Colorado, USA*, 299-336.

Meinert, L.D., Hedenquist, J.W., Satoh, H., Matsuhisa, Y., 2003, Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluids: *Economic Geology*, 98, 147-156.

Misra, K.C., 1999, Skarn deposits, *en Understanding mineral deposits*: Kluwer Academic Publishers, 414-449.

Mrozek, S. A., Chang, Z., Spandler, C., Windle, S., Raraz, C., Paz, A., 2020, Classifying skarns and quantifying metasomatism at the Antamina deposit, Peru: insights from whole-rock geochemistry: *Economic Geology*, 115(1), 177-188.

Mulchay, R.B. y Velsco, J.R., 1954, Sedimentary rocks at Canaanea, Sonora, Mexico, and tentative correlation with the sections at Bisbee and the Swisshelm Mountains, Arizona: *Mining Engineering*, 6, 628-631.

NAVDAT The Western North American Volcanic and Intrusive Rock Database, 2014, consultado en junio del 2021, <https://www.navdat.org/index.cfm>.

Newberry, R.J., 1998, W- and Sn- skarn deposits: a 1998 status report, *en Mineralized Intrusion-related skarn systems*, short course series 26: Lentz, D.R. (ed.), Mineralogical Association of Canada, 289-335.

Nicolescu, S., Cornell, D.H., Södervall, U., and Odelius, H., 1998, Secondary ion mass spectrometry analysis of rare earth elements in grandite garnet and other skarn related silicates: *European Journal of Mineralogy*, 10, 251–259.

Ochoa-Landín, Lucas; Pérez-Segura, Efrén; Del Río-Salas, Rafael; y Valencia-Moreno, Martín, 2011, Depósitos minerales de Sonora, México, *en Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 9, 299–331.

Pirajno, F., 2009, Skarns, *en Hydrothermal Processes and Mineral Systems*: East Perth, Springer, 119-120.

Poole, F.G., Madrid, R.J., y Oliva-Becerril, F., 1991, Geological setting and origin of stratiform barite in central Sonora, Mexico, *en Geology and deposits of the Great Basin*: Raines, G.L., Lisle, R.E., Scafer, R.W. y Wilkinson, W.H. (eds), Geological Society of Nevada, 1, 517-522.

Poole, F.G., Perry Jr., W.J., Madrid, R.J., Amaya-Martínez, R., 2005, Tectonic synthesis of the Ouachita-Marathon-Sonora orogenic margin of southern Laurentia: Stratigraphic and Structural implications for timing of deformational events and plate-tectonic model: Geological Society of America, Special Paper 393, 543-596.

Rangin, C., 1977, Tectónicas sobrepuestas en Sonora septentrional, Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geología, Revista, 1, 44–47.

Reed, M.N., 1997, Hydrothermal alteration and its relationship to ore fluid composition, *en* Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*: New York, NY John Wiley and Sons, 303-365.

Rodríguez-Castañeda, J.L., 2002, Tectónica cretácica y terciaria en la margen suroeste del Alto de Cananea, Sonora norte- central: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, disertación doctoral, 217 . (inérita)

Shimazaki, H., 1980, Characteristics of skarn deposits and related acid magmatism in Japan: *Geology*, 75, 173-183.

Shimazaki, H. y Sakai, H., 1984, Regional variation of sulfur isotope composition of skarn deposits in westernmost part of the Inner zone of Southwest Japan: *Mining Geology*, 34, 419-424.

Siesgesmund, S., López-Doncel, R., Sieck, P., Wilke, H., Wemmer, K., Frei, D., & Oriolo, S., 2018, Geochronological and geochemical constraints on the genesis of Cu-Au skarn deposits of the Santa María de la Paz district (Sierra del Fraile, Mexico), *en* *Ore Geology Reviews*, 94, 310-325.

Sillitoe, R.H., 2000, Gold deposits in western Pacific island arcs; the magmatic connection: *Reviews in Economic Geology*, 13, 315-345.

Sillitoe, R.H., 2010, Porphyry Copper Systems: *Society of Economic Geologist*, 105, 3-41.

Simon, A.C., Pettke, T., Candela, P.A., Piccoli, P.M., Heinrich, C.A., 2003, Experimental determination of Au solubility in rhyolite melt and magnetite: Constrains on magmatic Au budgets: *American Mineralogist*, 88, 1644-1651.

Smith, M.P., Hendersen, P., Jeffries, T.E.R., Long, G., Williams, C.T., 2004, the rare earth elements and uranium in garnets from the Beinn an Dubhaich Aureole, Skye, Scotland, UK: Constraints on processes in a dynamic hydrothermal system: *Journal of Petrology*, 45, 457-484.

Spencer, J.E; Normark, W. R., 1979, Tosco-Abreojos fault zone: A Neogene transform plate boundary within the Pacific margin of southern Baja California, Mexico. *Geology*, 1979, 7(11), 554-557.

Spencer, J. E., Normark, W. R., 1989, Neogene plate-tectonic evolution of the Baja California Sur continental margin and the southern Gulf of California, Mexico, *en*: Winterer, EL, Hussong, DM, Decker, RW (Eds.), *The eastern Pacific Ocean and Hawaii*. Geological Society of America, *The Geology of North America*, 21-72.

Stewart, J.H., 1988, Latest Proterozoic and Paleozoic southern margin of North America and the accretion of Mexico: *Geology*, 16, 186-189.

Stewart, J.H., Poole, F.G. Ketner, K.B. Madrid, R.J., Roldán-Quintana, J., Amaya-Martínez, R., 1990, Tectonics and stratigraphy of the Paleozoic and Triassic southern margin of North America, Sonora, Mexico, *en* Gehrels, G.E. y Spencer, J.E. (eds.), *Geologic excursion through the Sonoran Desert region, Arizona and Sonora: Tucson, Arizona, Geological Survey Special Paper 7*, 183-202.

Stone, J.G., 1959, Ore genesis in the Naica district, Chihuahua, Mexico: *Economic Geology*, 54, 1002-1034.

Sun, S.S. y McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes: *Geological Society London Special Publications*, 42, 313-345.

McDonough, W. F., y Sun, S. S., 1995, The composition of the Earth: Chemical geology, 120(3-4), 223-253.

Suzuki, Y., & Hayashi, K. I., 2019, Mineralogy, fluid inclusions, and sulfur isotopes of the Huanzala deposits, Peru: early skarn and late polymetallic replacement style mineralizations: *Resource Geology*, 69(3), 249-269.

Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Barton, M.D., Patchett, P.J., Zürcher, L., Hodkinson, D., Roldán-Quintana, J., 2001, A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: identification of the southern edge of the North American Precambrian basement: *Geological Society of America Bulletin*, 113, 1409-1422.

Valencia-Moreno, M., Iriondo, A., González-León, C., 2006, Temporal constraints on the eastward migration of the Late Cretaceous – early Tertiary magmatic arc of NW Mexico based on new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ hornblende geochronology of granitic rocks: *Journal of South America Earth Sciences*, 22, 22-38.

Valencia-Moreno, Martín, y Ortega-Rivera, Amabel, 2011, Cretácico Tardío-Eoceno Medio en el noroeste de México—Evolución del arco magmático continental y su contexto geodinámico (orogenia Laramide), *en* Calmus, Thierry, ed., *Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118*, cap. 6, p. 201–226, 25 figs.

Valencia-Moreno, M., Cambrubí, A., Ochoa-Landín, L., Calmus, T., Mendivil-Quijada, H., 2017, Latest Cretaceous – early Paleogene “boom” of porphyry Cu mineralization associated with the Laramide magmatic arc of Mexico: *Ore Geology Reviews*, 81, 1113-1124.

Valentine, W.G., 1936, *Geology of the Cananea Mountains, Sonora, Mexico: Geological Society of America Bulletin*, 47, 53-86.

Vander Auwera, J., & Verkaeren, J., 1993, Occurrence of contrasting skarn formations in dolomites of the Traversella deposit (Ivrea, Italy): *Geologische Rundschau*, 82(4), 726-740.

Vidale, R., 1969, Metasomatism in a chemical gradient and the formation of calc-silicate bands: *American Journal of Science*, 267, 857-874.

Wallmach, T. y Hatton, C.J., 1989, Extreme facies of contact metamorphism developed in calc-silicate xenoliths in the eastern Bushveld Complex: *Canadian Mineralogist*, 27, 509-523.

Warr, L.N., 2021, IMA-CNMNC approved mineral symbols: *Mineralogical Magazine*, 85, 291-320.

Williams-Jones, A. E., Samson, I. M., Ault, K. M., Gagnon, J. E., & Fryer, B. J., 2010, The genesis of distal zinc skarns: Evidence from the Mochito deposit, Honduras: *Economic Geology*, 105(8), 1411-1440.

Wodziki, W.A., 1995, The evolution of Laramide igneous rocks and porphyry copper mineralization in the Cananea district, Sonora, Mexico: Arizona, EUA, Universidad de Arizona, PhD. thesis, 181 pp.

Xue, L., Wang, G., Tang, L., Cao, Y., Du, J., Du, Y., ... & Cheng, H., 2021, Genesis and hydrothermal evolution of the Zhazigou skarn W (Mo) deposit, East Qinling, China: Constraints from fluid inclusions and H–O–S–Pb isotopes: *Ore Geology Reviews*, 138, 104374.

Zarayskiy, G.P., Zharikov, V.A., Stoyanovskaya, F.M., Balashov, V.N., 1987, The experimental study of bimetasomatism skarn formation: *International geology Review*, 29, 761-858.

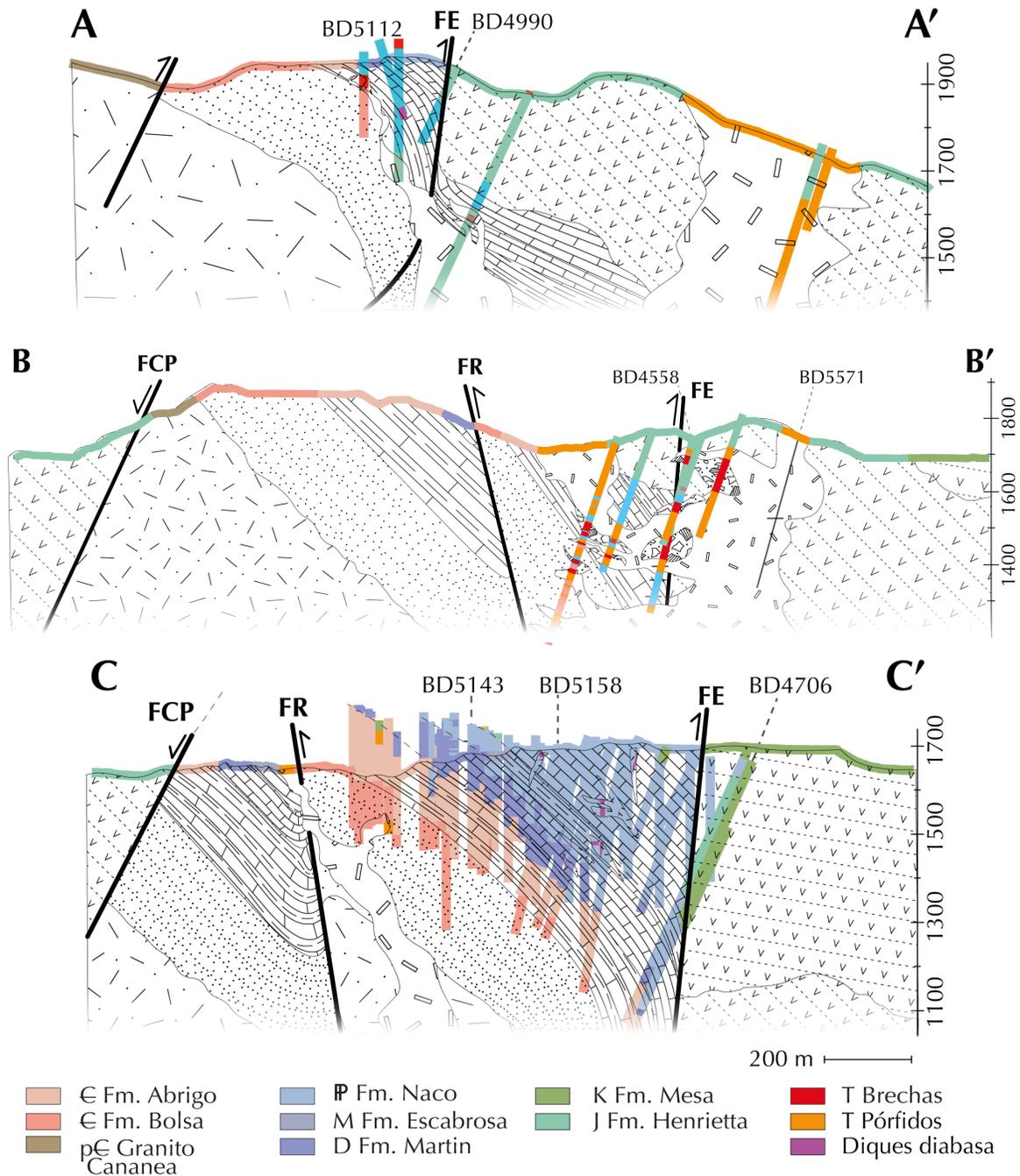
Zhao, S., Brzozowski, M. J., Mueller, T., Wang, L., & Li, W., 2022, Skarn classification and element mobility in the Yeshan Iron Deposit, Eastern China: Insight from litho geochemistry: *Ore Geology Reviews*, 145, 104909.

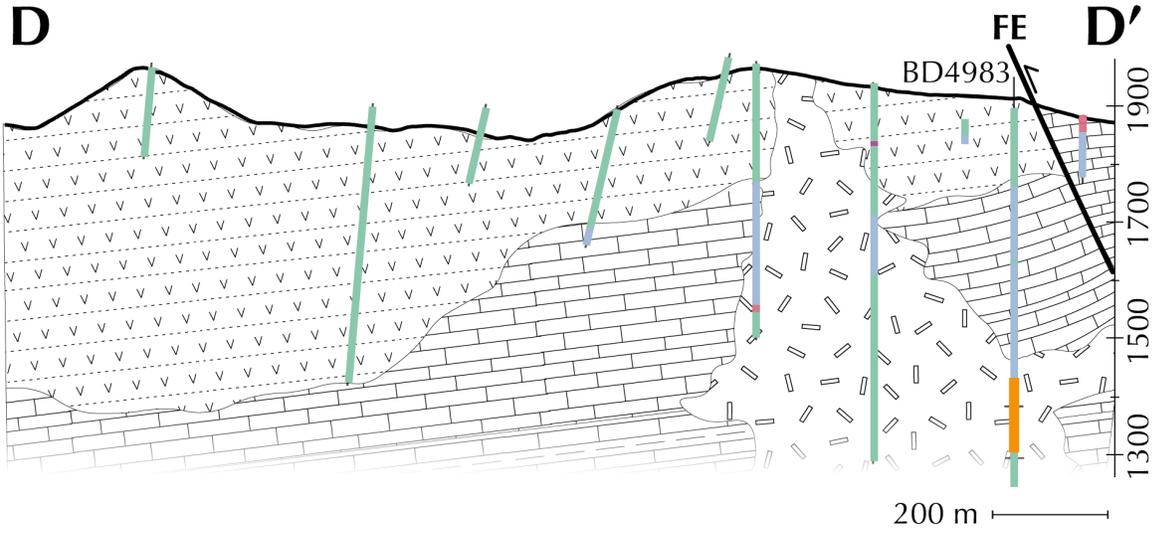
Zharikov, V.A., 1970, Skarns: *International Geology Review*, 12, 541-559, 619-647, 760-775.

Anexo 1

Barrenos para construcción de secciones

Las secciones fueron construidas con ayuda de los datos de barrenación proporcionados por la compañía minera. En los resultados se mostraron los barrenos revisados en este estudio. Aquí se muestran todos los barrenos utilizados para la elaboración de las secciones.





Anexo 2

Ubicación y descripción mineralógica de muestras

Clave	E (UTM)	N (UTM)	Z	Barreno	Profundidad (m)	Formación	Mineralogía	Descripción
BD3343	563717.52	3427067.66	1746.56	BD3343	300.25 - 301.5	Pórfido	Qz+Ser+Fsp+Cal+opacos+Ms	Pórfido con matriz de Ser, Qz y opacos. Fenocristales de Qz, Fsp y minerales máficos. Xenocristales de Cal. Tres generaciones de vetas.
BD4931	563777.32	3427010.92	1741.42	BD4931	128.80 - 130.90	Pórfido	Qz+Ser+Ms+opacos+Rt+Bt	Pórfido con matriz de Qz y Ser. Recristalización de Qz y Ser a Ms. Fenocristales de Qz y Fsp reemplazado a Ser. Cristales máficos reemplazados a Bt.
BD5136	563239.08	3427374.86	1830.022	BD5136	223.45 - 225.70	Pórfido	Qz+Ser+Ms+opacos+Cal+Rt	Pórfido con matriz de Qz y Ser. Recristalización de Qz y Ser a Ms. Fenocristales de Qz redondeados. Xenolitos de cuarcita. Xenocristales de Cal. Veta de opacos.
BD5145	563143.12	3427449.76	1830.1	BD5145	181.05 - 183	Pórfido	Qz+Ser+Fsp+opacos+Ms+Ttn+Tur	Pórfido con matriz de Qz y Ser. Fenocristales de Qz y Fsp. Tur disseminada, opacos disseminados.
BD5555-A	564997.86	3427090.42	1674.472	BD5555	346.85		Gt+Cal+Chl+Qz+Wo+opacos	Skarn prógrado, matriz de Gt de grano medio. Cal y Chl intersticial. Wo en parches. Opacos en vetas e intersticial entre Gt.
BD5555-B	564997.86	3427090.42	1674.472	BD5555	378.85		Px+Qz+Cal+Ep+opacos	Skarn prógrado, textura porfidoblástica. Matriz de Qz y opacos, porfidoblastos de Px. Veta de Px de grano grueso. Vetas secundarias de Cal.
BD5555-C	564997.86	3427090.42	1674.472	BD5555	415.9	Pórfido	Pl+Fsp+Qz+Bt+Px+Ttn+Amp	Pórfido con matriz de Qz y fenocristales de Px. Veta de Px de grano grueso. Vetas secundarias de Cal. Opacos disseminados.
BD5562	563512.78	3427809.33	1740.4	BD5562	341.6 - 342.85	Pórfido	Qz+Fsp+Ser+Ttn+Tur+opacos+Ms	Pórfido con matriz de Qz y Ser. Fenocristales de Fsp reemplazado por Ser. Pseudomorfo de minerales máficos reemplazados por Ser, Ttn y opacos. Vetas de Qz y opacos, vetas secundarias de Ttn y Qz. tur disseminada.
BD5565	562927.84	3427628.14	1773.005	BD5565	412.95 - 417.85	Pórfido	Qz+Ms+Ser+Ttn+opacos+Amp	Pórfido con matriz de Qz y Ser. Fenocristales conformados por una mezcla de Ser, Ms, Qz, Ttn y opacos. Veta de Qz+Ttn+Amp
BD5569	563122.71	3428201.22	1791.401	BD5569	243.45 - 246.5	Pórfido	Qz+Ser+Fsp+Ep+Ttn+Chl+opacos	Pórfido con matriz de Fsp y Qz. Fenocristales de minerales máficos reemplazados por Qz, opacos, Chl. Fenocristal de Fsp con corona de reacción de Bt.
BD5570	562293.44	3428005.2	1788.386	BD5570	394.10 - 396.50	Pórfido	Qz+Fsp+Px+Ms+chl+Ser+opacos	Pórfido con matriz de Qz y Fsp. Fenocristales de Pl y Fs alterados débilmente a Ser. Px reemplazado por Chl, Ttn y opacos.
BD5571	563280.1	3428411.41	1773.808	BD5571	234.85- 237.05	Pórfido	Qz+Ser+opacos+Cal+Ttn	Matriz de Ser. Fenocristales de Qz redondeados y angulosos. Minerales máficos reemplazados por Ser y opacos. Veta de Cal y opacos.

Clave	E (UTM)	N (UTM)	Z	Barreno	Profundidad (m)	Formación	Mineralogía	Descripción
BD5583-1	562749.56	3428254.23	1774.466	BD5583	395.25 - 396.5	Pórfido	Qz+filosilicatos+opacos+Ttn	Matriz de Qz y filosilicatos criptocristalinos. Fenocristales de Qz redondeado, Fsp remplazado por Ser y anfíbol reemplazado por arcillas, opacos y Ttn. Veta de Qz+Cal+opacos
BD5583-2	562749.56	3428254.23	1774.466	BD5583	400.95 - 402.6	Pórfido	Qz+Ms+Ser+Ttn+opacos	Pórfido con matriz de Qz y Ser. Fenocristales reemplazados por Ms, Ttn y Ser. Vetas de Qz.
VO-01	564044	3426722	1568			Henrietta	Qz+Ttn+Ser+Chl+opacos	Roca volcánica con textura intersertal y fenocristales de ferromagnesianos. Sericita reemplaza feldespatos y Chl+Ttn reemplaza minerales máficos
VO-02	562825	3428020	1772			Pórfido	Qz+Fsp+Ser+Mca+opacos+Ttn	Matriz de Qz+Ser+Fsp y fenocristales de Qz, cristales ferromagnesianos reemplazados por Ser, opacos y Ttn. Veta de Qz
VO-03	563406	3426861	1153			Mesa	Ser+Qz+opacos+Sp	Matriz de Ser, porfidoclastos de minerales opacos y Qz, vetas de Qz
VO-04	563432	3426913	1558			Bolsa	Qz+Fsp+Ser+Gr+Rt+Py+Zrn	Cuarcita con cristales de Qz y Fsp alterados a Ser, vetas de Qz y opacos
VO-05	563541	3426942	1558			Abrigo	Cal+Ser+Pl+Bt	Mármol con vetas de Cal secundaria, Ser diseminada
VO-06	563541	3426959	1562			Abrigo	Cal+Ser+Ilm	Mármol con cristales tabulares de Ser, opacos distribuidos en vetas
VO-07A	563612	3426935	1558			Martín	Cal+CO3+Ep+Ilm+Wo+Qz+Py+Ccp+Sp	Mármol con lentes de carbonatos masivos, reaccionando a Ep y Wo, opacos diseminados
VO-07B	563612	3426935	1558			Martín	Cal+Ves+CO3+Px+Ep	Mármol con lentes de carbonatos masivos, relictos de granates, Px diseminado
VO-08	563797	3426981	1559			Pórfido	Qz+Fsp+Ser+Mca+opacos+Ttn	Matriz de Qz y Ser. Fenocristales de Fsp con seritización, recristalización del cuarzo, máficos reemplazados por opacos
VO-09	557917	3430441	1934			Cuitaca	Qz+Px; Qz+Fsp+Amp+Ttn	Contacto no gradual entre aplita y metasedimentos. Vetas de óxidos cortan a ambas litologías.
VO-09A	557903	3430469	1936			Cuitaca	Qz+Pl+Fsp+Amp+Bt+Ttn+opacos+Ap+All	Granodiorita con anfíbol reaccionando a Bt, opacos reaccionando a Ttn. Veta de Qz, Chl y opacos. Allanita accesoria.
VO-09B	557905	3430459	1937			Cuitaca	Fsp+Pl+Cpx+Ep+Ttn+opacos+Ap+Qz+Rt	Endoskarn con cúmulos de Pxy Qz, débil alteración a Ep. Cristales de Rt con coronas de Ttn.
VO-09C	557917	3430441	1934			Cuitaca	Pl+Fsp+Qz+Ttn+opacos	Aplita con Fsp alterado a Ser, texturar pertíticas, mirmequitas, cristales de tamaño fino de opacos y Ttn.
VO-10	557917	3430441	1934			Puertecitos	Qz+Ser+Px+Fsp+Ep+Ttn+Rt	Hornfels de Qz y Px. Hay cristales de Fs alterados a Ser, cristales anhedrales de Ttn alterados a Rt

Clave	E (UTM)	N (UTM)	Z	Barreno	Profundidad (m)	Formación	Mineralogía	Descripción
VO-11	558019	3430465	1932			Puertecitos		Roca sedimentaria con fósiles aparentemente marinos. Capa marmolizada.
VO-11A	558019	3430465	1932			Puertecitos	Qz+Gt+Cal+Sp+o opacos+Chl+Ap+Mlc	Hornfels en muestra de mano, en lámina delgada matriz de Qz y Cal, cristales euhedrales de Gt. Alteración posterior con Chl, Sp y Mlc.
VO-12	558267	3430232	1972			Puertecitos	Gt+Qz+Chl+Bt+o pacos	Skarn prógrado, granate masivo con evidencia de sobrecrecimientos, intersticios con Qz y Chl. Vetas de Bt y opacos.
VO-13	558267	3430232	1972			Pórfido	Qz+Fsp+Ttn+opacos+Gt+Px	Pórfido que intrusión a skarn, cristales de Qz con texturas de deformación, Fds con forman auhedrales alterados a Ser, xenocristales de Gt y Px, opacos con coronas de Ttn
VO-14	558267	3430232	1972			Puertecitos	Filosilicatos+Qz+Ttn+opacos	Horizonte arcilloso poco consolidado, matriz compuesta por arcillas y cuarzo con textura masiva, óxidos de manganeso. Vetas de cuarzo.
VO-15	558408	3430171	1960			Puertecitos	Px+Gt+Cal	Skarn prógrado, Px masivo, Gt en intersticios, dos generaciones de Gt de diferente color. Vetas de Cal.
VO-16	558244	3430621	2051			Puertecitos	Gt+opacos+Bt+Qz	Skarn prógrado, Gt masivo y creciendo respecto a veta. Intersticios rellenos de Qz y Bt. Opacos con halos rojizos.
VO-16A	558204	3430627	2057			Puertecitos	Gt+Px+Qz+Cal+Mlc+Ccp+Sp+Ttr	Skarn prógrado, textura porfidoblástica, matriz de Px, Cal y Qz, porfidoblastos de Gt. Sulfuros asociados con Mlc.
VO-16B	558169	3430647	2059			Puertecitos		Skarn prógrado, Gt masivo de grano fino.
VO-17	558966	3430299	2116			Brecha en Puertecitos		Brecha conformada por una matriz rojiza y Qz, clastos de skarn prógrado angulosos. Vetas de Qz.
VO-18	558909	3430357	2013			Henrietta	Qz+Ser+Chl+Fsp+Pl+Amp+Ep+opacos	Roca volcánica con texturaa porfídica, matriz de Qz, Ser, Chl, opacos. Porfidoclastos de Fsp, Pl y Amp. Textura de flujo, fenocristales orientados.
VO-19	564057	3426664	1570			Henrietta	Ser+arcillas+Qz+opacos+Ttn+Chl	Roca volcánica con textura intersertal y fenocristales de ferromagnesianos. Sericita reemplaza feldespatos y Chl+Ttn reemplaza minerales máficos
VO-20	564063	3426731	1557			Henrietta		Roca porfídica con matriz melanocrática afanítica y fenocristales máficos.
VO-21	564067	3426789	1556			Henrietta	Matriz rojiza+Ttn+Qz+o pacos	Brecha con matriz rojiza rica en Ttn, clastos angulosos de minerlaes opacos y cuarzo.

Clave	E (UTM)	N (UTM)	Z	Barreno	Profundidad (m)	Formación	Mineralogía	Descripción
VO-22	564062	3426857	1560			Pórfido	Qz+Ser+Fsp+Ttn+opacos+Bt+Chl	Matriz de Qz y Ser. Fenocristales de Fsp con seritización, de cuarzo, maficos rememplazados por opacos, Bt y Chl. Dos generaciones de vetas, una de Qz y otra de Qz y opacos
VO-23	564013	3426961	1563			Escabrosa	Qz+Ser+CO3+Ttn+Ap	Lutita carbonatada, con vetas de opacos y cuarzo
VO-24	563994	3427011	1568			Escabrosa	Cal+Qz+Gt+opacos	Skarn prógrado con formación incipiente de Gt euhedral
VO-25	563144	3427090	1691			Pórfido	Qz+Ser+Bt+opacos	Matriz de Qz y Ser. Fenocristales de Fsp con seritización, cuarzo redondeado con bahia y coronas de reacción, anfíboles remplazados por Bt y Chl.
VO-26	563175	3427295	1735			Falla		Roca de zona de falla de grano fino, poco consolidada, blanca.
VO-27	563468	3427330	1682			Martín	Cal+Ser+Qz+opacos	Mármol con bandeamientos de Ser, bandas de opacos, vetas de Qz
VO-28	563323	3427368	1688			Martín	Cal+CO3+opacos	Mármol con pseudomorfos de granates
VO-29	563312	3427185	1650			Abrigo	Cal+Px+Ep+Qz+Gt+Ser Py+Ccp+Sp+sulfosal	Skarnoide con zona de Px masivo, zona de Gt+Cal, zona de carbonatos masivos cortados por vetas
VO-30	563723	3427150	1643				Fsp+Qz+Ttn+opacos	Hornfels feldespático con Ttn diseminada y vetas de opacos
VO-31A	563642	3427759	1726					
VO-31B	563642	3427759	1726				Px+Ep+Qz+Py+Sp	Hornfels de piroxeno reaccionando a Ep. Opacos en vetas y deseminados con coronas de Qz
VO-33	563617	3427633.9				Naco	Gt+Qz+Ves+opacos	Skarn prógrado de Gt zoneado
VO-34	563348.57	3427527.91				Martín	Cal+Wo+Ves Py+Sp+Gn	Mármol con veta de sulfuros y halo de Wo
VO-35	563176	3426998	1658			Escabrosa	Cal+Qz+Mca+Ves+opacos	Mármol con bandas de mica blanca, Ves diseminada, opacos diseminados
VO-36	563485	3427934	1746				Px+Gt+Qz+Ves+Py+Ilm	Hornfels de piroxeno, vetas de Gt y Qz. Ligera alteración a Ep. Opacos diseminados reaccionando a Ilm.
VO-37	563557	3427835	1728				Pl+Ep+Mca+wo+opacos	Hornfels de Pl alterada a Ser con Ep y Wo, opacos diseminados
VO-38	563598	3427855	1722				Pl+Px+Ep+opacos	Hornfels de Pl alterando a Ser y Ep. Cristales de Px reaccionando a Ep
VO-39	564181	3427390	1671			Mesa	Ser+Cal+opacos	Hornfels de Ser y Cal, opacos diseminados, veta de Qz fibroso
VO-40	563670	3427377	1707			Naco	Gt+Px+Cal+Ser+Opacos Py+Sp+Hem	Skarn prógrado de Gt y Px, débil alteración retrógrada, sulfuros diseminados
VO-41	563194.03	3428082.63	1748.759	BD4558	368-371	Pórfido	Ser+Qz+Bt+opacos+Ap+Act	Pórfido con matriz de Ser, Qz, Bt. Fenocristales de Qz redondeados, con coronas de reacción, evidencias de deformación. Fenocristales de Fsp reemplazados por Ser. Act con hábito radial.

Clave	E (UTM)	N (UTM)	Z	Barreno	Profundidad (m)	Formación	Mineralogía	Descripción
VO-42	563194.03	3428082.63	1748.759	BD4558	382-385		Cal+Qz+opacos	Carbonatos criptocristalinos en matriz, sulfuros con coronas de reacción de Cal fibrosa. Vetas de Cal y vetas secundarias de Qz.
VO-43	563194.03	3428082.63	1748.759	BD4558	390-394		Cal+opacos+Tur+Mag+Hem+Py+Ccp	Roca mineralizada, matriz de carbonatos. Sulfuros de Fe y Cu, óxidos de Fe.
VO-44	563194.03	3428082.63	1748.759	BD4558	401-404		Cal+opacos+Qz	Roca mineralizada, con matriz de Cal. Opacos con bordes rojizos, coronas de reacción.
VO-45	563194.03	3428082.63	1748.759	BD4558	427-429		Cal+Qz+CO3	Roca con matriz de Cal, Qz. Carbonatos reemplazan Cal holocristalina. Vetas de Cal fibrosa.
VO-47	562306.4	3428471	1899.18	BD4983	590-600		Qz+Fsp+Ser+Chl+Cal+Py+Ccp+Sp	Roca holocristalina, compuesta por Qz y Ser de grano fino. fenocristales de Fsp reaccionando a Ser. Chl y sulfuros reemplazan fenocristales máficos. vetas de sulfuros, Qz y Cal.
VO-48	561627.3	3428773	1959.573	BD4990	79-84	Henrietta	Qz+Pl+Ser+Px+Am+opacos	Región con tamaño de grano medio, cristales de Qz y Pl en matriz de Ser, formación incipiente de Px. Region de tamaño de grano fino, matriz criptocristalina de color pardo, opacos, Amp. Vetas de cuarzo.
VO-49	562306.4	3428471	1899.18	BD4990	480-488	Pórfido	Qz+Fsp+Ser+Ms+Cal+opacos	Matriz de Qz y Ms, fenocristales de Fsp, Qz redondeado. Veta de Cal, Ms y opacos. Sulfuros diseminados.
VO-50	561627.3	3428773	1959.573	BD4990	8	Henrietta		Roca porfídica fanerítica mesocrática.
VO-51	561627.3	3428773	1959.573	BD4990	9	Henrietta		Roca afanítica melanocrática con intenso fracturamiento.
VO-52	561627.3	3428773	1959.573	BD4990	14-18	Henrietta		Roca afanítica melanocrática con vetillas de Cal.
VO-53	561174	3428882	2006			Henrietta	Qz+Pl+Fsp+Ilm+opacos+Ser+Ms	Matriz pilotaxíquica de Fsp alerado a Ser en bordes, óxidos paralelos dirección de flujo. Disminución de tamaño de grano ocasiona oscurecimiento de matriz.
VO-54	563271	3427398	1681			Abrigo		
VO-55	563982.55	3427786.58	1710.04	BD4706	646	Abrigo		
VO-56	563982.55	3427786.58	1710.04	BD4706	672	Naco	Cal+Px+Py+Bn+Dg	Caliza con formación incipiente de Px. Veta de Cal y Qz con pocos sulfuros. Veta secundaria de Py con Bn y Dg en los bordes de la veta.
VO-57	563982.55	3427786.58	1710.04	BD4706	685-690	Abrigo		
VO-58	563982.55	3427786.58	1710.04	BD4706	691-694	Abrigo	Cal+Qz+Chl+Py+Ccp+Bn	Caliza arcillosa, bandeada. Capa con Cal recristalizada sin sulfuros. Capa con Chl y filosilicatos criptocristalinos con Ccp y Py. Capa masiva, Chl radial, menor cantidad de sulfuros. Veta de Cal fibrosa con Py.

Clave	E (UTM)	N (UTM)	Z	Barreno	Profundidad (m)	Formación	Mineralogía	Descripción
VO-59	561395.69	3428873.64	1953.2	BD5109	53-55	Derrame andesítico	Pl+Fsp+Qz+Ser+opacos+Ttn+Px+Tur	Roca fenerítica de grano medio, equigranular de Qz, Fsp, Pl. Débil alteración a Ser. Qz redondeado con inclusiones de Px. Cristales de Amp reemplazados por Bt y opacos. Vetas de Qz.
VO-60	561395.69	3428873.64	1953.2	BD5109	63-65	Derrame andesítico	Qz+Fsp+Ser+Tur+Px+filosilicatos+Py+Mag	Textura porfídica, matriz de Qz y Fsp alterado a Ser. Fenocristales de Fsp fracturados. Tur acicular diseminada. Filosilicatos criptocristalinos alrededor de sulfuros. Py con inclusiones de Mag.
VO-61	561395.69	3428873.64	1953.2	BD5109	122		Gt+Px+CO3+Cal+Qz+Py	Skarn prógrado, Gt masivo y Px intersticial, alterados a carbonatos. Vetas de Gt. Qz y Py rellenando intersticios. Vetas secundarias de Cal.
VO-62	561395.69	3428873.64	1953.2	BD5109	161	Abrigo		Roca con lentes de Px y lentes de Gt amarillo y verde con galena diseminada.
VO-63	561395.69	3428873.64	1953.2	BD5109	190	Abrigo	Px+Qz+Cal+Wo+Ves	Skarn prógrado, Px, Cal, y Qz. Wo diseminada en intersticios, Ves en matriz diseminada.
VO-64	563550.621	3427561.41	1737.57	BD5158	81-83	Naco		Hornfels color verde botella, lentes blancos, piritita diseminada y en vetas.
VO-65	563550.621	3427561.41	1737.57	BD5158	180		Qz+Fsp+CO3+CaI+opacos	Textura porfídica de Qz, Fsp y carbonatos. Máficos reemplazados por opacos. Vetas de Cal y Qz.
VO-66	563550.621	3427561.41	1737.57	BD5158	229	Escabrosa		Roca con abundantes óxidos, rojiza, de grano fino. Vetas de Qz.
VO-67	563550.621	3427561.41	1737.57	BD5158	315	Martín	Cal+Chl+Ser+Qz+Py+Sp	Hornfels de Ser, Chl y Cal. Chl con habito radial. Veta anostomosada de Cal y Py. Veta secundaria de cal fibrosa.
VO-68	563550.621	3427561.41	1737.57	BD5158	316	Martín	Cal+Qz+Px+Py+Ccp+Sp+Mag	Roca mineralizada conformada por Py, Qz y Cal. Hay una región con Cal y Px. Py con inclusiones de Sp. Vetas de Cal.
VO-69	563550.621	3427561.41	1737.57	BD5158	317	Martín		Roca verdosa bien consolidada estratificadaa, límite de mineralización.
VO-70	563550.621	3427561.41	1737.57	BD5158	350	Abrigo		Roca verde bien consolidada con vetas de epidota.
VO-71	563550.621	3427561.41	1737.57	BD5158	368	Abrigo		Roca con textura porfidoblástica, matriz verde y porfidoblastos color crema.
VO-72	563587.885	3427309.59	1768.596	BD5143	59	Naco	Cal+Qz+Sp+Py	Mármol con cristales diseminados de Sp y Py. Relictos de Gt compuestos por carbonatos. Sp rojiza y amarillenta.
VO-73	563587.885	3427309.59	1768.596	BD5143	49	Naco		Roca estratificada color verde de grano fino. Cristales de grano medio blancos aciculares. Patinas rojizas.

Clave	E (UTM)	N (UTM)	Z	Barreno	Profundidad (m)	Formación	Mineralogía	Descripción
VO-74	563587.885	3427309.59	1768.596	BD5143	80	Martín	Cal+Qz+Sp+Ves+Px	Mármol con Px. Vetas de Cal, Qz y sulfuros. Py euهدral y Sp amarilla.
VO-75	563603.61	3427598.19				Dique	Pl+Px+Ep+Ser+Chl+opacos+Ttn+AmP	Textura intergranular, Pl con sericitización y cloritización. Px reaccionando a Ep. Veta con Amp, Qz y Px.
VO-76	563587.885	3427309.59	1768.596	BD5143	87	Martín		Roca color verde claro, no consolidada y masiva de grano fino.
VO-77	563587.885	3427309.59	1768.596	BD5143	98	Martín		Roca consolidada color verde oscuro, estratificada.
VO-78	563587.885	3427309.59	1768.596	BD5143	162	Abrigo	Qz+Cal+Ttn+opacos	Roca bandeada con Qz y cantidad variable de Ttn. Relictos de Px. Vetas de Cal y Qz.
VO-79	563587.885	3427309.59	1768.596	BD5143	199	Abrigo		Roca bandeada con capas de diferente tonalidad de verde, no consolidada.
VO-80	563587.885	3427309.59	1768.596	BD5143	267	Abrigo	Px+Cal+Qz+Ep+Py	Skarn retrógrado. Cristales de Px alterados a Ep y Cal. Qz en intersticios, con extinción ondulante. Veta de Cal y Qz. Py diseminada.

Anexo 3

Análisis geoquímicos

Muestra	BD-3343	BD-4931	BD-5136	BD-5145	BD-5555	BD-5562	BD-5565	BD-5569	BD-5570	BD-5571	BD-5583-1	BD-5583-2
Al2O3 (wt%)	14.18	16.66	16.1	8.6	15.76	14.88	15.56	15.37	15.8	13.04	15.91	15.06
BaO	0.05	0.1	0.05	0.02	0.3	0.14	0.07	0.14	0.12	0.03	0.14	0.1
CaO	0.31	0.08	0.42	0.37	3.53	0.55	0.3	3.61	1.04	0.06	0.31	0.28
Cr2O3	<0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01
Fe2O3	12	2.85	7.02	30.64	1.09	8.88	5.17	2.82	4.06	3.01	6.93	5.8
K2O	3.83	4.49	3.89	0.83	13.05	4.69	4.8	5.21	4.32	3.9	4.71	4.79
MgO	0.39	0.62	1.5	2.76	0.19	1.19	1.16	0.78	1.52	0.53	0.56	0.82
MnO	0.17	0.01	0.26	3.47	0.13	0.09	0.58	0.13	0.09	0.12	0.64	0.2
Na2O	0.12	0.24	0.05	0.02	0.24	0.12	0.05	1.06	0.92	0.1	0.11	0.13
P2O5	0.2	0.13	0.22	0.18	0.05	0.11	0.22	0.14	0.24	0.06	0.17	0.2
SiO2	59.79	65.96	62.28	32.31	60.45	60.02	64.18	62.62	65.56	74.39	62.65	66.72
SrO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	<0.01	0.02	0.01	<0.01	0.01	<0.01
TiO2	0.57	0.48	0.79	0.41	0.24	0.85	0.55	0.32	0.66	0.22	0.36	0.5
LOI 1000	8.42	5.73	6.74	19.34	3.15	7.26	5.19	5.8	3.68	3.46	6.77	4.72
Total	>110	104	>110	>110	100.5	>110	104	101.05	103	103.65	103.8	107.15
C	0.17	0.01	0.21	3.4	0.74	0.1	0.35	0.83	0.08	0.11	0.75	0.22
S	8.67	2.34	4.36	9.37	0.78	5.36	1.99	1.13	1.7	1.85	1.72	2.82
Ba (ppm)	408	921	419	127.5	2830	1300	581	1270	1115	237	1315	861
Ce	56.1	56.3	61	37.3	45	68.1	67.3	53.6	67.1	59.9	64.3	59.9
Cr	10	10	30	20	10	10	<10	10	10	<10	30	10
Cs	6.53	3.7	30.7	5.62	6.4	26.1	6.62	16.45	10.2	4.28	13.75	7.98
Dy	2.78	1.97	3.08	5	2.72	4.15	2.43	1.87	3.17	2.93	2.16	2.18
Er	1.48	0.87	1.79	3.3	2.04	2.28	1.29	1.06	1.7	1.76	1.13	1.2
Eu	0.91	1.14	1.02	0.71	0.4	1.35	1.21	0.8	1.2	0.52	1.04	0.94
Ga	13.2	16.9	27.6	26.3	13.8	19.9	21.2	19.8	21.7	17.3	22.4	20.7
Gd	4.26	4.45	4.01	4.45	2.65	4.61	3.85	2.53	3.85	2.69	3.33	2.86
Ge	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Hf	3.7	5	4.3	7.2	5.7	6.6	5	5.1	5	3.6	5	4.4
Ho	0.52	0.31	0.6	0.98	0.55	0.83	0.43	0.33	0.51	0.65	0.42	0.39
La	27.6	30.7	30.7	14.6	22.8	36.8	34	28.4	33.6	31.7	33.9	31.1
Lu	0.17	0.13	0.24	0.61	0.34	0.43	0.21	0.17	0.22	0.38	0.21	0.17
Nb	6.9	8.4	8.1	11.3	12.6	9.3	7.9	8	9.8	12.5	8.1	8.8
Nd	26.5	22.9	27.3	17.4	16.8	28.6	28.9	20.1	27.6	20.3	25.1	24.3
Pr	6.6	6.26	6.96	4.27	4.86	8.08	7.87	5.99	7.51	6.3	7.04	6.52
Rb	257	254	304	38.1	635	258	357	307	257	226	347	321
Sm	4.89	4.13	5	3.76	2.6	5.04	4.9	3.16	5.2	3.41	4.21	3.78
Sn	7	9	12	52	2	4	7	2	6	2	5	8
Sr	26.6	59.1	11.3	15.9	152.5	55.7	37	129	131.5	6.7	76.8	16.2
Ta	0.6	0.7	0.6	0.8	1	0.8	0.7	0.6	0.8	1.1	0.7	0.8
Tb	0.53	0.48	0.56	0.76	0.44	0.69	0.49	0.28	0.55	0.45	0.41	0.44
Th	7.07	9.37	8.86	6.54	19	10.25	12.15	12.5	14.45	19.25	12.9	16.75
Tm	0.17	0.13	0.24	0.56	0.35	0.39	0.2	0.15	0.22	0.33	0.16	0.17
U	3.03	2.28	3.58	4.13	5.54	3.07	3.81	5.01	6.32	4.34	5.86	3.56
V	84	74	124	69	22	125	76	39	89	28	44	80
W	63	21	28	98	12	26	41	4	20	3	31	47
Y	15.1	8.7	16.5	30	17.4	23.3	13.3	10.3	15.8	19.5	12.1	11.6
Yb	1.21	0.8	1.46	3.77	2.52	2.79	1.06	0.91	1.38	2.47	1.09	1.04
Zr	142	188	170	264	188	248	179	188	199	112	183	162
As	99.1	174.5	63.7	>250	10.1	14.9	212	3.3	6.8	5.4	24.1	53.2
Bi	0.96	0.54	3.01	54.3	7.11	3.1	1.92	0.98	0.94	1.64	0.61	0.95
Hg	0.226	0.091	0.168	0.236	0.049	0.008	0.353	<0.005	0.02	0.014	0.022	0.032
In	0.142	1.535	0.517	9.26	0.137	0.162	0.634	0.017	0.43	0.058	0.086	0.141
Re	0.063	0.34	0.017	0.106	0.012	0.001	0.32	0.016	0.009	0.001	0.035	0.098
Sb	6.35	10.4	11.65	65.9	0.89	1.63	22.4	0.38	0.71	1.4	3.96	5.66
Sc	1	1	2.9	13.6	1.5	4.3	0.8	0.6	1.5	0.4	1.1	0.6
Se	3.6	1.4	1.5	13.3	1.9	1.4	1.5	0.4	1	0.9	1.1	1.4
Te	0.38	0.34	0.41	4.51	1.41	0.78	0.32	0.21	0.26	0.19	0.16	0.2
Tl	2.31	1.26	0.67	0.77	0.23	0.6	0.54	0.39	0.28	0.33	0.52	0.47
Ag	1.3	1	1.3	8.9	5.4	<0.5	4.7	<0.5	3.4	0.5	1.5	1.1
Cd	1.1	16.7	1.4	14.7	4.8	<0.5	6	<0.5	3.8	<0.5	0.7	<0.5
Co	33	11	12	21	27	3	26	3	10	6	13	19
Cu	527	4020	1265	4580	175	109	1830	79	2190	56	1430	2400
Li	10	10	30	20	10	30	20	10	10	10	20	10
Mo	10	11	6	9	8	<1	52	2	2	2	5	24
Ni	18	4	18	32	6	10	12	3	6	4	6	7
Pb	168	138	86	234	426	26	767	24	699	31	145	15
Sc	5	6	8	16	2	9	5	3	7	3	4	4
Zn	1400	106	895	4150	1565	116	2310	62	1470	389	867	462

Muestra	VO-02	VO-08	VO-09A	VO-09B	VO-09C	VO-11A	VO-13	VO-16B	VO-25	VO-27	VO-28	VO-29
Al2O3 (wt%)	16.27	14.75	15.76	16.94	12.04	4.01	9.49	4.99	25.09	0.36	0.26	6.39
BaO	0.11	0.09	0.11	0.34	0.09	<0.01	0.11	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01
CaO	0.06	0.07	4.35	4.4	1.97	24.1	1.77	23.8	0.08	35	49.6	30.2
Cr2O3	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.05	<0.01	0.01	0.01
Fe2O3	1.66	4.61	4.39	1.45	1.2	20.35	0.99	17.25	3.64	0.7	0.68	6.77
K2O	4.75	4.31	3.66	10.85	7.15	0.03	7.18	0.02	2	0.01	<0.01	0.06
MgO	0.84	0.84	2.26	1.48	0.12	0.89	0.45	1.88	2.08	16.5	4.43	6.51
MnO	0.01	0.01	0.08	0.11	0.06	0.9	0.25	1.5	0.03	0.2	0.3	0.67
Na2O	0.12	0.18	4.31	1.54	1.75	0.45	0.23	0.02	0.08	<0.01	<0.01	0.53
P2O5	0.06	0.09	0.21	0.24	0.03	0.59	0.1	0.07	0.17	0.58	0.04	0.25
SiO2	72.35	69.66	62.8	59.86	75.32	46.61	76.97	43.74	55.14	3.71	0.94	31.88
SrO	<0.01	<0.01	0.05	0.04	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
TiO2	0.6	0.5	0.75	0.82	0.25	0.09	0.49	0.1	1.51	0.03	0.01	0.29
LOI 1000	2.92	4.3	0.59	0.71	0.27	1.1	0.51	1.87	9.54	41.67	42.8	13.61
Total	100.15	108	99.44	98.99	100.4	100.1	99	100.25	103.4	99.38	99.49	101.55
C	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.06	0.02	0.07	0.03	11.45	11.6	3.73
S	0.11	3.29	0.01	0.02	0.01	0.09	0.01	<0.01	1.35	0.15	0.1	1.4
Ba (ppm)	947	757	1025	2980	705	5	899	461	168	4.7	32.4	11.5
Ce	38.1	49.1	67.1	68.2	101	26.7	51.6	8.4	52.3	21.4	10.1	120
Cr	10	<10	10	10	<10	40	<10	20	250	<10	<10	20
Cs	7.18	4.39	7.76	9.52	3.66	0.53	2.62	0.62	13.85	3.45	0.27	110
Dy	0.86	2.1	5.61	5.64	6.94	3.77	5.59	1.2	10.4	2.2	1.05	9.17
Er	0.5	1.24	3.62	2.81	4.67	2.5	3.19	0.63	11.5	1.38	0.7	5.64
Eu	0.39	0.54	1.25	1.11	0.52	1.76	0.6	0.84	0.88	0.18	0.13	2.31
Ga	18.3	14.3	17.5	12.5	12.1	15	7.7	13.3	24.6	1.5	0.7	9.8
Gd	1.15	2.43	5.6	5.49	6.24	3.59	5.14	1.79	4.35	2.12	1.03	8.91
Ge	<5	<5	<5	<5	<5	6	<5	5	<5	<5	<5	<5
Hf	4.5	3.9	4.8	9.6	5.1	1.9	7.7	1.2	4.2	1.2	0.3	4.2
Ho	0.18	0.42	1.13	0.93	1.45	0.85	1.18	0.23	3.23	0.51	0.22	1.84
La	21.7	28.2	31.9	37.8	52.1	7.9	29.9	3.1	25	6.8	4.4	46.1
Lu	0.09	0.14	0.51	0.47	0.62	0.29	0.41	0.09	1.56	0.21	0.08	0.64
Nb	9.6	7.8	10.1	12.4	14	2.5	16.1	2.3	9.4	1.4	1	6.3
Nd	15	16.6	32	31.5	38.4	21.1	23.7	9.9	23	8.4	4.4	49.9
Pr	4.23	4.79	8.36	8.54	11.05	4.88	6.23	1.73	6.17	2.02	1.09	13.4
Rb	241	270	130.5	324	255	2.7	326	1.2	186.5	2	0.6	51.6
Sm	2.19	2.88	6.17	6.09	7.38	4.19	5.37	2.6	4.71	1.56	0.97	10.25
Sn	7	11	2	1	3	2	2	1	10	1	1	41
Sr	25.1	20.5	369	306	86.8	4.9	51.5	20.4	33.9	59.7	278	32.7
Ta	0.6	0.4	0.6	0.8	1.2	<0.1	1.1	0.1	0.3	0.1	<0.1	0.4
Tb	0.17	0.34	0.87	0.86	1.08	0.58	0.84	0.26	0.89	0.31	0.17	1.4
Th	8.62	6.78	13.6	13.65	25.6	1.16	13.35	1.18	4.1	1.85	0.79	8.67
Tm	0.09	0.18	0.45	0.36	0.76	0.35	0.46	0.09	1.75	0.18	0.09	0.78
U	2.27	2.91	3.44	3.12	3.98	6.79	4.49	2.76	2.68	0.71	0.6	6.31
V	74	204	117	64	10	30	28	55	223	9	13	43
W	16	54	2	3	1	153	6	181	26	3	1	4
Y	4.6	12.4	29.9	26	41.7	40.1	30.8	7.2	117	15	7.2	58.1
Yb	0.54	0.87	3.42	2.6	4.65	1.87	2.95	0.56	11.55	1.21	0.6	4.86
Zr	174	152	186	366	168	68	277	43	178	41	14	159
As	101.5	3.9	5.4	8.9	11.3	199.5	6.6	144.5	4.7	34.9	15.2	66.1
Bi	0.79	1.45	0.21	0.51	0.2	1.02	29.2	11	0.5	0.19	0.58	4.4
Hg	0.022	0.013	<0.005	<0.005	<0.005	0.048	0.019	0.077	0.013	<0.005	<0.005	0.009
In	0.107	0.171	0.014	0.027	0.037	1.085	0.041	1.375	0.399	0.183	0.052	1.47
Re	0.002	0.069	<0.001	0.001	<0.001	0.001	0.001	<0.001	0.012	0.003	0.002	0.062
Sb	8.49	1.7	1.77	1.98	0.83	4.46	8.87	68.8	1.18	1.11	0.77	48.6
Sc	0.9	0.6	3.2	4	3	1.4	5.3	1.5	24.6	0.6	0.7	3.3
Se	0.3	2.5	<0.2	0.2	<0.2	0.6	1.4	0.4	1	0.2	1.4	2.7
Te	0.13	0.29	0.03	0.05	0.02	0.09	3.33	0.61	0.12	0.08	0.09	0.15
Tl	0.34	0.29	0.15	0.09	0.06	0.03	0.07	0.23	1.74	0.16	0.07	0.17
Ag	1.5	1.6	<0.5	0.6	<0.5	1.3	19.8	13.4	<0.5	<0.5	<0.5	0.6
Cd	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	8.7	<0.5	28.3	0.9	0.8	<0.5	7.5
Co	<1	45	9	4	27	10	5	102	25	1	1	8
Cu	88	2570	41	166	17	1210	2270	3330	928	40	30	820
Li	10	20	10	10	<10	20	30	40	30	20	<10	10
Mo	11	34	1	1	1	4	1	1	3	1	<1	6
Ni	1	9	10	7	4	10	5	32	63	3	2	12
Pb	174	11	22	53	21	14	17	114	25	109	101	111
Sc	5	5	14	12	3	1	6	1	26	1	1	4
Zn	40	96	106	81	102	3130	218	>10000	466	323	122	3650

Muestra	VO-33	VO-34	VO-35	VO-36	VO-40	VO-49	VO-54	VO-55	VO-57	VO-59	VO-60	VO-61
Al2O3 (wt%)	5.52	0.75	1.14	7.25	2.47	16.14	7.12	9.29	13.12	13.13	16.08	7.87
BaO	0.01	0.01	0.01	0.07	0.01	0.15	0.01	<0.01	0.01	0.07	0.19	0.01
CaO	30.1	34.8	41.8	16.45	27.4	0.88	22.4	29.9	30.6	2.83	4.85	32.1
Cr2O3	0.02	<0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe2O3	21.7	2.47	10.6	18	22.41	4.51	4.68	16.7	7.12	4.17	6.19	12.44
K2O	0.01	<0.01	0.29	1.33	0.23	4.44	<0.01	0.31	0.45	4.38	9.13	0.02
MgO	0.81	15.4	1.36	3.85	2.72	0.72	19.4	0.62	4.44	2.24	2.92	2.69
MnO	1.32	0.14	1.28	1.11	0.99	0.3	0.62	0.82	1.08	0.05	0.12	1.44
Na2O	0.1	<0.01	0.01	0.1	0.18	0.1	0.15	0.01	0.02	0.81	0.85	<0.01
P2O5	0.1	0.68	0.08	0.19	0.09	0.18	0.72	0.23	0.37	0.17	0.17	0.05
SiO2	37.98	13.12	3.51	43.28	36.59	65.8	17.7	32.96	39.75	68.69	53.37	37.31
SrO	<0.01	<0.01	0.01	0.02	<0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
TiO2	0.56	0.06	0.05	0.42	0.11	0.53	0.47	0.43	0.97	0.72	0.72	0.4
LOI 1000	0.93	29.77	24.02	7.73	4.04	5.91	23.44	7.37	1.83	2.56	5.66	4.83
Total	100.1	100.8	100.05	>110	107.45	105.7	100.55	99.19	100.45	102.8	109.45	101.45
C	0.02	7.62	9.48	0.02	1.01	0.39	5.42	1.91	0.45	0.06	0.55	1.47
S	0.05	1.3	6.43	8.49	4.43	2.26	1.41	0.09	0.13	1.17	3.51	0.5
Ba (ppm)	7.1	0.6	6.7	428	42.7	1450	2.7	2.7	21.2	599	1705	2.1
Ce	4.7	34.4	87.4	79.3	5.8	68.9	84.9	66.2	85.5	70.6	60.4	29.5
Cr	80	10	10	70	30	10	30	30	90	60	20	40
Cs	1.25	0.02	2.93	5.88	2	14.9	2.53	191.5	6.61	17.4	12.4	4.8
Dy	4.34	3.07	10	11.7	1.27	2.63	5.86	8.6	4.2	5.52	4.34	4.55
Er	2.46	2.19	6.43	7.71	0.75	1.21	3.24	4.98	2.51	3.29	2.76	2.62
Eu	0.59	0.44	1.88	1.43	0.27	0.9	1.31	2.96	1.96	1.05	1.04	0.75
Ga	11	2.4	8.5	12	6.8	19.9	11.4	25.3	19.9	17.2	16.3	14.4
Gd	3.84	3.21	9.5	11.55	1.25	3.44	5.87	9.04	6.16	5.96	5.19	4.4
Ge	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	6	5	<5	<5	8
Hf	7.8	1.9	0.5	8.4	2.1	4.4	10.9	4.6	3.7	9.4	6.8	3.4
Ho	0.84	0.73	2.16	2.57	0.28	0.46	1.13	1.76	0.87	1.08	0.91	0.94
La	1.4	12	45.4	48.4	2	36.1	36.1	27.3	43.4	34.4	32.4	14.5
Lu	0.32	0.3	0.72	0.96	0.22	0.15	0.42	0.63	0.28	0.42	0.47	0.41
Nb	6.8	1.9	2.5	7.6	2.1	8.2	18.8	15.5	9.3	13.7	9.8	13.3
Nd	7.8	13.6	39	42.6	5.6	27.2	34.3	38	37.4	31.9	29.3	15.4
Pr	1.26	3.39	9.86	11.05	1.24	7.87	9.32	9.1	10.15	8.42	7.83	4.03
Rb	1.9	0.2	32.7	55	13.4	235	1.9	145	58.1	272	367	5.8
Sm	3.03	2.78	9.04	7.82	1.16	4.41	6.61	8.25	6.44	6.09	5.56	3.54
Sn	2	1	4	2	2	4	6	12	7	2	2	4
Sr	4.1	50.3	53.9	103.5	7.4	122.5	34.6	45.7	33.7	131.5	185.5	19.6
Ta	0.5	0.1	<0.1	0.5	<0.1	0.6	1.1	0.9	0.4	0.9	0.7	1
Tb	0.62	0.49	1.53	1.69	0.21	0.47	0.92	1.37	0.75	0.87	0.73	0.71
Th	8.29	2.26	1.53	6.97	1.29	14.95	10.45	13.15	3.03	11.6	9.8	8.56
Tm	0.33	0.3	0.87	1.03	0.12	0.16	0.47	0.68	0.26	0.46	0.39	0.41
U	2.71	0.79	2.44	3.85	1.38	3.6	7.39	8.05	4	3.6	3.13	2.5
V	45	20	11	55	28	85	37	66	185	78	128	50
W	229	3	5	6	88	21	13	183	13	4	2	23
Y	27.3	22.7	71.4	106.5	9.5	14.1	32.3	48	23.9	32.3	28	25.2
Yb	2.04	2	5.41	5.89	1.18	1.18	3.02	4.15	1.89	3.13	2.73	2.68
Zr	310	73	19	298	83	149	433	158	147	332	242	113
As	108.5	99.4	8.9	94.9	190	114.5	>250	171.5	64.1	9.4	10	77.3
Bi	78.8	2.79	2.63	4.56	52.4	1.29	0.79	0.78	22.3	0.61	0.95	10.9
Hg	0.031	0.009	<0.005	<0.005	0.02	0.101	0.008	0.008	0.005	<0.005	<0.005	0.013
In	0.298	0.165	0.622	0.246	0.758	0.107	0.127	3.11	1.005	0.016	0.022	2.15
Re	0.006	0.003	0.003	0.006	0.006	0.117	0.029	0.001	0.001	0.003	0.005	0.002
Sb	1.15	2.86	0.93	4.19	2.86	12.5	6.63	7.14	3.64	1.19	1.18	1.61
Sc	5	1.3	1.5	2.2	1.3	0.8	4.5	4.3	4.6	3.1	4.4	3.5
Se	1.6	2.6	10.9	3.9	3.9	1.2	3.3	0.3	0.3	<0.2	1.4	2
Te	7.61	0.55	0.46	1.18	9.06	0.28	0.38	0.13	3.97	0.35	0.33	0.94
Tl	0.09	0.07	0.21	0.04	0.07	0.22	1.91	0.59	0.28	0.76	0.1	0.15
Ag	12.7	1.3	<0.5	0.7	8	1.2	1.3	0.5	0.8	<0.5	<0.5	4.8
Cd	2.9	1.4	2.6	0.9	2.9	1.4	3.3	0.7	0.6	<0.5	<0.5	<0.5
Co	12	1	4	22	26	10	5	3	5	10	18	5
Cu	3560	32	426	255	342	381	86	268	184	8	14	4860
Li	10	<10	<10	10	20	30	80	<10	10	20	30	40
Mo	4	<1	<1	1	2	27	1	<1	1	<1	1	4
Ni	19	7	6	27	17	7	13	7	45	22	11	16
Pb	190	568	19	36	280	48	613	28	25	10	35	38
Sc	7	1	2	6	1	4	4	8	18	11	10	8
Zn	673	466	440	740	1175	298	965	243	199	40	95	101

Muestra	VO-62	VO-63	VO-64	VO-66	VO-67	VO-69	VO-70	VO-71	VO-73	VO-75	VO-77	VO-78
Al2O3 (wt%)	5.04	11.96	1.35	1.28	13.08	16.23	11.14	10.85	9.24	17.24	15.84	1.17
BaO	0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.08	0.19	0.01
CaO	30.1	24.3	20.8	5.36	19.75	4.48	32.7	31.9	30.3	9.6	14.7	36.3
Cr2O3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.03	0.01	<0.01
Fe2O3	20.44	14.13	18.76	40.81	16.23	10.66	7.5	4.54	14.98	7.62	3.81	1.3
K2O	0.06	0.09	0.01	0.07	0.3	0.16	0.28	0.18	0.04	3.98	5.89	<0.01
MgO	3.45	1.88	6.72	2.57	4.16	22.4	1.36	3.13	0.83	6.48	4.16	14.6
MnO	0.74	1	1.72	4.72	0.54	0.58	0.73	0.33	1.37	0.23	0.54	0.37
Na2O	<0.01	0.01	0.1	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	0.12	0.01	2.75	0.23	0.01
P2O5	0.08	0.34	0.03	0.47	0.25	0.32	0.28	0.07	0.21	0.32	0.29	0.01
SiO2	37.3	32.11	46.75	19.65	28.08	30.97	24.6	30.41	33.88	48.63	45.68	3.06
SrO	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.03	<0.01	0.03	0.01	<0.01	0.07	0.03	0.01
TiO2	0.17	0.72	0.03	0.07	1.04	1.3	1.18	0.48	0.71	1.27	1.25	0.05
LOI 1000	2.63	4.84	3.01	24.1	9.26	11.08	18.52	3.1	6.1	1.73	6.2	41.91
Total	100.95	105.75	>110	>110	107.65	99.16	99.41	100.65	99.55	100.9	100.05	99.91
C	0.59	2	0.04	6.57	2.47	0.89	5.17	0.29	1.69	0.03	1.2	11.5
S	0.24	4.86	4.85	4.95	6.5	0.19	0.23	6.28	0.33	0.25	0.31	0.32
Ba (ppm)	4.8	7.3	2.3	3.6	13.1	2	8.5	14.6	4.8	565	1770	3.6
Ce	11.3	42.5	1.4	13.6	44.2	98.2	112.5	98	104.5	43.9	31.2	10.9
Cr	20	30	10	30	80	70	90	40	<10	140	90	10
Cs	1.13	2.98	1.13	93.7	21.3	11.1	41.1	5.1	61.3	48.2	31.2	1.92
Dy	3.11	11	0.19	3.99	5.39	5.84	5.57	6.26	6.48	4.57	4.61	1.08
Er	1.72	7.03	0.2	2.52	3.33	3.2	3.3	3.71	3.92	2.82	2.69	0.73
Eu	0.62	1.28	0.09	0.56	1.37	1.91	1.99	1.17	1.2	1.72	1.05	0.2
Ga	14.5	34.7	4.8	8.4	24.1	45.3	29.9	16.2	15.5	18.7	17.2	4
Gd	2.78	10.15	0.19	3.61	6.25	6.3	6.57	6.65	6.97	5.29	4.67	1.1
Ge	7	6	<5	<5	7	7	7	<5	5	<5	<5	<5
Hf	1.5	15.3	0.1	0.5	3.6	4.3	3.7	3.3	8.5	3.1	4	0.5
Ho	0.69	2.24	0.05	0.86	1.06	1.17	1.16	1.19	1.31	0.9	0.83	0.23
La	1.9	19	1.1	8.1	21.9	48	65.8	50.1	62.5	20.1	14.8	6.1
Lu	0.24	0.96	0.22	0.31	0.4	0.46	0.37	0.51	0.57	0.35	0.33	0.1
Nb	6.1	30.8	0.4	1.2	6.4	7.8	7.4	15.2	11	5.2	6.8	1.2
Nd	11.3	20.4	1.3	10.8	23.8	37.6	40.5	40.7	39.4	24.6	19.6	4.8
Pr	2.43	5.03	0.25	2.48	5.68	10.45	11.8	11.4	12.25	5.56	4.22	1.21
Rb	4.4	10.9	1.1	58	60.7	34.1	66.3	19.4	39.1	394	400	2.1
Sm	2.67	6.37	0.18	2.04	5.52	6.55	6.8	7.03	6.63	5.18	4.51	1
Sn	7	16	<1	1	31	108	36	7	5	2	2	1
Sr	13.7	66.5	3.4	16.3	248	28.9	255	55.1	21.1	558	306	52.2
Ta	0.3	1.9	<0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.9	0.7	0.1	0.4	0.1
Tb	0.44	1.7	0.02	0.54	0.84	0.99	0.92	1	0.97	0.75	0.7	0.19
Th	2.7	11.3	0.29	1.14	3.74	3.35	3.38	10.05	21.3	2.01	2.87	0.89
Tm	0.24	0.92	0.05	0.3	0.42	0.43	0.44	0.5	0.54	0.35	0.36	0.1
U	1.82	4.34	0.28	2.08	2.29	5.11	3.1	2.92	4.11	0.51	1.78	1.25
V	39	63	28	37	221	257	254	46	32	268	257	115
W	60	14	5	249	80	87	38	6	345	2	141	9
Y	19.2	65.5	2.4	36.7	33.9	31.9	34.6	33.2	40.5	24.4	26.9	9.2
Yb	1.72	6.64	0.87	2.24	2.85	3.01	2.76	3.44	3.72	2.37	2.41	0.71
Zr	48	548	5	19	142	174	133	126	332	128	151	16
As	64.6	44.4	73.1	234	188	18.6	15.3	10.5	31.8	35.2	31.7	34.8
Bi	3.5	38.5	3.13	9.98	>250	8.4	12.65	1.61	>250	0.19	1.9	0.95
Hg	0.007	0.107	<0.005	0.365	0.008	0.021	0.008	0.005	0.014	<0.005	0.009	0.02
In	1.305	2.22	0.259	1.325	1.525	1.935	2.56	0.285	0.287	0.014	0.092	0.218
Re	<0.001	0.027	0.001	0.007	0.005	0.003	0.003	0.001	0.029	0.001	0.01	0.057
Sb	1.36	3.5	0.78	31.5	14.25	0.7	6.29	11.8	3.34	5.66	8.15	2.29
Sc	2	3.6	0.5	1.9	12.7	17.2	19.4	1.8	6.3	7.1	12.4	1.2
Se	0.3	1.9	1.1	1.6	2.5	0.2	0.2	0.7	4.6	0.2	0.6	0.5
Te	0.31	13.55	0.56	4.46	16.95	1.05	3.04	0.18	9.38	0.09	0.45	0.15
Tl	0.03	0.1	0.03	0.66	0.26	0.17	0.32	0.04	0.6	2.8	0.48	1.51
Ag	0.5	11.4	0.7	1.3	17	1.3	1.3	<0.5	>100	<0.5	0.9	0.9
Cd	1.8	19.5	0.5	3.7	1	2.6	0.9	1.7	1.8	0.5	0.9	1.6
Co	6	11	16	59	11	4	2	6	6	23	16	3
Cu	17	1115	184	87	2280	454	1640	154	10	213	111	196
Li	10	10	40	10	10	50	10	10	10	20	60	<10
Mo	1	16	1	8	3	1	2	9	5	<1	42	2
Ni	21	12	16	43	21	21	9	16	10	75	26	10
Pb	13	4700	25	110	292	21	26	17	5400	19	206	137
Sc	4	9	1	2	25	26	29	10	11	25	31	1
Zn	628	6810	173	2640	627	1715	193	833	661	197	503	706

Muestra	VO-79	VO-80
Al ₂ O ₃ (wt%)	7.87	14.31
BaO	0.01	0.01
CaO	30.8	24.8
Cr ₂ O ₃	<0.01	0.01
Fe ₂ O ₃	2.45	10.75
K ₂ O	0.03	0.46
MgO	9.99	0.99
MnO	0.54	0.72
Na ₂ O	0.02	0.02
P ₂ O ₅	0.75	0.11
SiO ₂	18.39	33.74
SrO	<0.01	0.01
TiO ₂	0.5	0.65
LOI 1000	26.56	8.71
Total	99.86	108.15
C	6.27	2.13
S	0.36	5.26
Ba (ppm)	2.4	34.4
Ce	65.9	134
Cr	20	60
Cs	3.09	27.7
Dy	6.09	8.48
Er	3.79	5.14
Eu	0.97	1.48
Ga	14.5	32.3
Gd	5.61	9.83
Ge	<5	5
Hf	13.9	5.5
Ho	1.22	1.68
La	28	70.3
Lu	0.5	0.72
Nb	20.3	23.8
Nd	29.1	62.4
Pr	7.6	16.7
Rb	4.7	56.3
Sm	6.18	11.85
Sn	3	13
Sr	31.8	34.5
Ta	1.2	1.7
Tb	0.97	1.4
Th	9.48	18.05
Tm	0.51	0.68
U	5.66	8.11
V	31	72
W	58	7
Y	38.2	47.6
Yb	3.24	4.33
Zr	491	190
As	166.5	33.9
Bi	5.7	6.62
Hg	0.065	0.011
In	0.997	0.532
Re	0.01	0.006
Sb	1.83	2.7
Sc	3.9	4.8
Se	1.5	9.9
Te	1.22	1.96
Tl	0.88	0.16
Ag	3	2.3
Cd	11.3	3.6
Co	7	19
Cu	453	833
Li	10	40
Mo	<1	2
Ni	13	38
Pb	943	115
Sc	4	14
Zn	4330	1385

Anexo 4

Información analítica del laboratorio ALS Chemex



ALS Chemex de México S.A. de C.V.
Ignacio Salazar 688, Local 5
Fracc. Los Vinedos
Hermosillo SONORA 83147
Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MEXICO
AVE. UNIVERSIDAD #3000
COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
CIUDAD DE MEXICO 04510

Página: 1
Número total de paginas: 6 (A - E)
El Apéndice positivo Pagina
Fecha Completada:
26-MAYO-2021
Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO HE21117717

Proyecto: PEN MEX

Este informe se aplica a 56 muestras de Pulpa sometidas a nuestro laboratorio de Hermosillo, SONORA, Mexico en 11-MAYO-2021.

Los siguientes tienen acceso a los datos asociados a este certificado:

THIERRY CALMUS

RAFAEL DEL RIO SALAS

MARTIN VALENCIA

PREPARACIÓN DE MUESTRA

CODIGO ALS	DESCRIPCIÓN
WEI-21	Peso Muestra Recibida
LOG-24	Reg Pulpas - Rcd sin Cód. Barra

PROCEDIMIENTOS ANALÍTICOS

CODIGO ALS	DESCRIPCIÓN	INSTRUMENTO
ME-4ACD81	Metales por la digestión de 4 ácidos	ICP-AES
ME-XRF26	Whole Rock By Fusion/XRF	XRF
OA-GRA05x	LOI at 1000C for XRF	WST-SEQ
ME-MS42	Hasta 34 Elementos por ICP-MS	ICP-MS
S-IR08	Azufre Total (IR Spec)	LECO
C-IR07	Carbono Total (IR Spec)	LECO
ME-MS81	Fusión Lithium Borate ICP-MS	ICP-MS

Éste es el Informe Final y substituye cualquier informe preliminar con este número de certificado. Los resultados se aplican a las muestras sometidas. Todas las páginas de este informe fueron comprobadas y aprobadas antes de publicación.

***** Vea Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total). The sulfur-free total calculation is the Total minus SO₃. SF-Total less than or equal to 100%.

Firma:

Saa Traxler, General Manager, North Vancouver



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 2 - B
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método	C-IR07	S-IR08	ME-MS81												
	Analito	C	S	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Ge	Hf	Ho	La
	Unidades	%	%	ppm	ppm											
	LDD	0.01	0.01	0.5	0.1	10	0.01	0.05	0.03	0.02	0.1	0.05	5	0.1	0.01	0.1
ESTÁNDARES																
AMIS0304				2670	8180	90	0.40	138.0	35.0	141.0	35.0	339	5	27.7	18.10	3370
AMIS0304				2560	7820	100	0.38	135.5	33.3	145.0	56.7	330	9	27.6	17.05	3360
Rango de Resultados - límite inferior				2340	7280	70	0.35	119.0	30.6	135.0	47.8	309	<5	25.1	16.20	3250
límite superior				2860	8900	120	0.45	145.5	37.4	165.0	58.7	377	18	30.9	19.80	3970
AMIS0461																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
AMIS0547																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
AMIS0547																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
AMIS0571																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
DS-1		3.15	2.67													
Rango de Resultados - límite inferior		3.01	2.51													
límite superior		3.25	2.71													
GS310-10		1.06	0.27													
Rango de Resultados - límite inferior		1.03	0.25													
límite superior		1.13	0.29													
GS313-8		0.92	1.25													
Rango de Resultados - límite inferior		0.90	1.19													
límite superior		0.98	1.29													
MA-1 b		2.49	1.15													
Rango de Resultados - límite inferior		2.34	1.12													
límite superior		2.54	1.22													
MRGeo08																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510

Página: 2 - C
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método Analito Unidades LDD	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	
		Lu ppm 0.01	Nb ppm 0.1	Nd ppm 0.1	Pr ppm 0.02	Rb ppm 0.2	Sm ppm 0.03	Sn ppm 1	Sr ppm 0.1	Ta ppm 0.1	Tb ppm 0.01	Th ppm 0.05	Tm ppm 0.01	U ppm 0.05	V ppm 5	W ppm 1
ESTÁNDARES																
AMIS0304		2.03	>2500	4020	>1000	10.7	608	26	3380	12.4	34.1	429	3.44	22.9	358	4
AMIS0304		1.94	>2500	3990	>1000	10.2	573	25	3370	11.4	33.4	404	3.46	21.7	354	4
Rango de Resultados - límite inferior		1.84	4670	3610	925	9.3	543	22	3060	11.1	30.8	406	3.14	21.6	331	3
límite superior		2.27	>2500	4410	>1000	11.8	664	29	3740	13.8	37.7	496	3.86	26.5	415	7
AMIS0461																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
AMIS0547																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
AMIS0547																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
AMIS0571																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
DS-1																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
GS310-10																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
GS313-8																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
MA-1b																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
MRGeo08																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V.
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
 MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510

Página: 2 - D
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método Analito Unidades LDD	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS42	ME-4ACD81	ME-4ACD81									
		Y ppm	Yb ppm	Zr ppm	As ppm	Bi ppm	Hg ppm	In ppm	Re ppm	Sb ppm	Sc ppm	Se ppm	Te ppm	Tl ppm	Ag ppm	Cd ppm
		0.1	0.03	2	0.1	0.01	0.005	0.005	0.001	0.05	0.1	0.2	0.01	0.02	0.5	0.5
ESTÁNDARES																
AMIS0304		396	16.45	1165												
AMIS0304		408	16.55	1150												
Rango de Resultados - límite inferior		369	15.25	1005												
límite superior		451	18.75	1230												
AMIS0461																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
AMIS0547																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
AMIS0547																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
AMIS0571																
AMIS0571																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
DS-1																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
GS310-10																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
GS313-8																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
MA-1b																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
MGeo08														4.4	2.1	
MGeo08														4.2	2.0	
Rango de Resultados - límite inferior														3.2	1.1	
límite superior														5.6	3.4	

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V.
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
 MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 2 - E
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método Analito Unidades LDD	ME-4ACD81							
		Co ppm	Cu ppm	Li ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Sc ppm	Zn ppm
		1	1	10	1	1	2	1	2
ESTÁNDARES									
AMIS0304									
AMIS0304									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
AMIS0461									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
AMIS0547									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
AMIS0547									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
AMIS0571									
AMIS0571									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
DS-1									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
GS310-10									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
GS313-8									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
MA-1b									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
MGeo08		21	646	40	14	731	1120	12	849
MGeo08		20	623	30	13	683	1050	11	802
Rango de Resultados - límite inferior		17	586	<10	12	621	969	10	722
límite superior		23	676	50	18	761	1190	15	886

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Veá Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510

Página: 3 - A
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método Analito Unidades LDD	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	OA-GRA05x	ME-XRF26
		Al2O3 %	BaO %	CaO %	Cr2O3 %	Fe2O3 %	K2O %	MgO %	MnO %	Na2O %	P2O5 %	SiO2 %	SrO %	TiO2 %	LOI 1000 %	Total %	
		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
ESTÁNDARES																	
OREAS 146																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
OREAS 220		13.54	0.02	9.60	0.04	11.36	0.46	7.16	0.17	2.75	0.18	49.92	0.03	1.28			97.03
OREAS 220		13.58	0.02	9.70	0.04	11.46	0.46	7.16	0.17	2.74	0.18	49.85	0.03	1.28			97.24
OREAS 220		13.59	0.02	9.66	0.04	11.39	0.46	7.28	0.17	2.76	0.18	50.24	0.03	1.28			97.62
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
OREAS 905		13.12	<0.01	9.28	0.02	11.00	0.42	6.92	0.14	2.60	0.15	49.10	<0.01	1.19			<0.01
límite superior																	
OREAS 905		14.04	0.05	10.00	0.06	11.80	0.51	7.50	0.20	2.90	0.21	51.50	0.05	1.37			0.02
OREAS 905																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
OREAS 920																	
OREAS 920																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
OREAS-101b																	
OREAS-101b																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
OREAS-45d																	
OREAS-45d																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
OREAS-45e																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
SCH-1																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
SY-4																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 3 - B
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método Analito	C-IR07	S-IR08	ME-MS81												
	Unidades LDD	C	S	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Ge	Hf	Ho	La
		%	%	ppm	ppm											
		0.01	0.01	0.5	0.1	10	0.01	0.05	0.03	0.02	0.1	0.05	5	0.1	0.01	0.1
ESTÁNDARES																
OREAS 146				>10000	4970	190	0.57	228	86.2	126.5	17.6	344	<5	4.2	36.7	2580
Rango de Resultados - límite inferior				11450	4220	160	0.47	202	78.3	114.5	26.2	323	<5	3.7	33.1	2260
límite superior				>10000	5160	220	0.59	246	95.7	139.5	32.2	395	15	4.7	40.5	2760
OREAS 220																
OREAS 220																
OREAS 220																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
OREAS 905																
OREAS 905																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
OREAS 920																
OREAS 920																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
OREAS-101b				181.5	1285	30	2.43	31.0	18.55	7.18	23.5	33.8	<5	10.6	6.49	744
OREAS-101b				184.5	1270	40	2.19	32.5	17.90	7.46	28.7	34.6	<5	10.7	6.26	776
Rango de Resultados - límite inferior					1200			28.8	16.80	6.97		32.4			5.70	710
límite superior					1465			35.4	20.6	8.57		39.7			6.98	868
OREAS-45d																
OREAS-45d																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
OREAS-45e																
OREAS-45e																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
SCH-1																
SCH-1																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
SY-4				345	127.0	10	1.56	19.10	14.95	1.97	35.2	14.10	<5	11.0	4.43	59.9
Rango de Resultados - límite inferior				306	109.5	<10	1.34	16.35	12.75	1.78	33.1	12.55	<5	9.9	3.86	52.1
límite superior				375	134.5	30	1.66	20.1	15.65	2.22	40.7	15.45	12	12.3	4.74	63.9

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 3 - C
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método Analito	ME-MS81														
	Unidades LDD	Lu	Nb	Nd	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W
		ppm	ppm													
		0.01	0.1	0.1	0.02	0.2	0.03	1	0.1	0.1	0.01	0.05	0.01	0.05	5	1
ESTÁNDARES																
OREAS 146		6.32	407	2390	581	27.2	475	45	3210	4.0	44.9	927	9.85	2.39	160	28
Rango de Resultados - límite inferior		5.66	349	1965	493	23.7	397	40	2790	3.6	42.5	813	8.90	2.37	140	25
límite superior		6.94	427	2400	603	29.5	485	52	3410	4.6	51.9	993	10.90	3.01	182	33
OREAS 220																
OREAS 220																
OREAS 220																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
OREAS 905																
OREAS 905																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
OREAS 920																
OREAS 920																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
OREAS-101b		2.37	57.3	370	121.5	176.0	49.2	10	20.4	2.6	5.22	33.3	2.68	371	73	18
OREAS-101b		2.42	59.6	365	120.5	174.5	48.6	10	20.5	2.6	5.14	33.5	2.78	370	76	19
Rango de Resultados - límite inferior		2.31		340	114.5		43.2				4.82	32.7	2.38	348	66	
límite superior		2.85		416	139.5		52.8				5.92	40.1	2.94	426	94	
OREAS-45d																
OREAS-45d																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
OREAS-45e																
OREAS-45e																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
SCH-1																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
SY-4		2.10	13.9	61.1	15.45	53.0	13.55	8	1225	0.6	2.61	1.35	2.23	0.88	7	<1
Rango de Resultados - límite inferior		1.88	11.6	51.2	13.50	49.3	11.40	6	1070	0.7	2.33	1.11	2.06	0.66	<5	<1
límite superior		2.32	14.4	62.8	16.50	60.7	14.00	10	1310	1.1	2.87	1.47	2.54	0.94	18	3

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Veá Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
 MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 3 - D
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS42	ME-4ACD81	ME-4ACD81									
	Analito	Y	Yb	Zr	As	Bi	Hg	In	Re	Sb	Sc	Se	Te	Tl	Ag	Cd
	Unidades LDD	ppm	ppm	ppm												
		0.1	0.03	2	0.1	0.01	0.005	0.005	0.001	0.05	0.1	0.2	0.01	0.02	0.5	0.5
ESTÁNDARES																
OREAS 146		949	51.4	238												
Rango de Resultados - límite inferior		814	48.1	204												
límite superior		996	58.9	254												
OREAS 220																
OREAS 220																
OREAS 220																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
OREAS 905															<0.5	<0.5
OREAS 905															<0.5	<0.5
Rango de Resultados - límite inferior															<0.5	<0.5
límite superior															1.5	1.4
OREAS 920					4.4	0.60	<0.005	0.027	<0.001	0.67	2.9	0.3	0.01	0.14		
OREAS 920					4.9	0.58	<0.005	0.032	<0.001	0.67	2.9	<0.2	0.02	0.15		
Rango de Resultados - límite inferior					4.2	0.60	<0.005	0.019	<0.001	0.45	2.5	<0.2	<0.01	0.09		
límite superior					5.4	0.76	0.010	0.043	0.002	0.77	3.3	0.6	0.04	0.20		
OREAS-101b		162.0	17.45	402												
OREAS-101b		162.5	16.85	403												
Rango de Resultados - límite inferior		160.0	15.80													
límite superior		196.0	19.40													
OREAS-45d					6.2	0.26	0.032	0.073	<0.001	0.41	40.1	1.0	0.06	0.12		
OREAS-45d					6.4	0.26	0.036	0.074	<0.001	0.35	44.2	1.0	0.06	0.12		
Rango de Resultados - límite inferior					5.8	0.26	0.025	0.071	<0.001	0.22	37.3	0.7	0.02	0.07		
límite superior					7.3	0.34	0.053	0.099	0.003	0.49	45.8	1.7	0.06	0.17		
OREAS-45e																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
SCH-1																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
SY-4		118.5	14.85	574												
Rango de Resultados - límite inferior		107.0	13.30	543												
límite superior		131.0	16.30	668												

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
 MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 3 - E
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método	ME-4ACD81							
	Análito	Co	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	Zn
Unidades	LDD	ppm							
		1	1	10	1	1	2	1	2
ESTÁNDARES									
OREAS 146									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
OREAS 220									
OREAS 220									
OREAS 220									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
OREAS 905		15	1550	20	3	10	31	5	143
OREAS 905		16	1510	20	3	10	32	5	141
Rango de Resultados - límite inferior		12	1425	<10	<1	7	25	3	122
límite superior		18	1640	40	5	12	36	7	154
OREAS 920									
OREAS 920									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
OREAS-101b									
OREAS-101b									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
OREAS-45d									
OREAS-45d									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
OREAS-45e									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
SCH-1									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									
SY-4									
Rango de Resultados - límite inferior									
límite superior									

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 4 - B
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método	C-IR07	S-IR08	ME-MS81													
	Analito	C	S	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Ge	Hf	Ho	La	
	Unidades	%	%	ppm	ppm												
LDD		0.01	0.01	0.5	0.1	10	0.01	0.05	0.03	0.02	0.1	0.05	5	0.1	0.01	0.1	
BLANCOS																	
BLANK																	
BLANK																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
BLANK																	
BLANK																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
BLANK				0.5	0.1	<10	0.02	<0.05	<0.03	<0.02	<0.1	<0.05	<5	<0.1	0.01	0.1	
BLANK				1.5	0.1	<10	0.02	<0.05	<0.03	<0.02	<0.1	<0.05	<5	<0.1	<0.01	<0.1	
BLANK				6.1	<0.1	<10	<0.01	<0.05	<0.03	<0.02	0.1	<0.05	<5	<0.1	<0.01	<0.1	
Rango de Resultados - límite inferior				<0.5	<0.1	<10	<0.01	<0.05	<0.03	<0.02	<0.1	<0.05		<0.1	<0.01	<0.1	
límite superior				1.0	0.2	20	0.02	0.10	0.06	0.04	0.2	0.10		0.2	0.02	0.2	
BLANK																	
BLANK																	
BLANK																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
BLANK																	
BLANK																	
Rango de Resultados - límite inferior		0.01	<0.01														
límite superior		0.01	<0.01														
BLANK		<0.01	<0.01														
límite superior		0.02	0.02														
DUPLICADOS																	
ORIGINAL																	
DUP																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510

Página: 4 - C
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método	ME-MS81															
	Analito	Lu	Nb	Nd	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W	
Unidades	LDD	ppm	ppm														
		0.01	0.1	0.1	0.02	0.2	0.03	1	0.1	0.1	0.01	0.05	0.01	0.05	5	1	
BLANCOS																	
BLANK																	
BLANK																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
BLANK																	
BLANK																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
BLANK		0.01	<0.1	<0.1	<0.02	<0.2	<0.03	<1	0.2	<0.1	<0.01	<0.05	<0.01	<0.05	<5	<1	
BLANK		0.01	<0.1	<0.1	<0.02	<0.2	<0.03	<1	0.1	<0.1	0.01	<0.05	0.02	<0.05	<5	<1	
BLANK		<0.01	<0.1	<0.1	<0.02	0.3	<0.03	<1	0.2	<0.1	<0.01	<0.05	0.01	<0.05	<5	<1	
Rango de Resultados - límite inferior		<0.01	<0.1	<0.1	<0.02	<0.2	<0.03	<1	<0.1	<0.1	<0.01	<0.05	<0.01	<0.05	<5	<1	
límite superior		0.02	0.2	0.2	0.04	0.4	0.06	2	0.2	0.2	0.02	0.10	0.02	0.10	10	2	
BLANK																	
BLANK																	
BLANK																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
BLANK																	
BLANK																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
BLANK																	
BLANK																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
DUPLICADOS																	
ORIGINAL																	
DUP																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V.
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
 MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 4 - D
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método Analito Unidades LDD	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS42	ME-4ACD81	ME-4ACD81									
		Y ppm	Yb ppm	Zr ppm	As ppm	Bi ppm	Hg ppm	In ppm	Re ppm	Sb ppm	Sc ppm	Se ppm	Te ppm	Tl ppm	Ag ppm	Cd ppm
		0.1	0.03	2	0.1	0.01	0.005	0.005	0.001	0.05	0.1	0.2	0.01	0.02	0.5	0.5
BLANCOS																
BLANK															<0.5	<0.5
BLANK															<0.5	<0.5
Rango de Resultados - límite inferior															<0.5	<0.5
límite superior															1.0	1.0
BLANK					<0.1	<0.01	<0.005	<0.005	<0.001	<0.05	<0.1	<0.2	<0.01	<0.02		
BLANK					<0.1	<0.01	<0.005	<0.005	<0.001	<0.05	<0.1	<0.2	<0.01	<0.02		
Rango de Resultados - límite inferior					<0.1	<0.01	<0.005	<0.005	<0.001	<0.05	<0.1	<0.2	<0.01	<0.02		
límite superior					0.2	0.02	0.010	0.010	0.002	0.10	0.2	0.4	0.02	0.04		
BLANK		<0.1	<0.03	<2												
BLANK		<0.1	<0.03	<2												
BLANK		<0.1	<0.03	<2												
Rango de Resultados - límite inferior		<0.1	<0.03	<2												
límite superior		0.2	0.06	4												
BLANK																
BLANK																
BLANK																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
BLANK																
BLANK																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
BLANK																
BLANK																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																
DUPLICADOS																
ORIGINAL					>250	0.10	0.458	0.019	0.001	8.36	2.6	0.7	0.13	0.23		
DUP					>250	0.11	0.522	0.020	0.002	8.16	2.7	0.7	0.13	0.25		
Rango de Resultados - límite inferior					237	0.09	0.448	0.014	<0.001	7.59	2.4	0.5	0.11	0.20		
límite superior					>250	0.12	0.532	0.025	0.002	8.93	2.9	0.9	0.15	0.28		

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
 MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 5 - A
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método Analito Unidades LDD	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26
		Al2O3 %	BaO %	CaO %	Cr2O3 %	Fe2O3 %	K2O %	MgO %	MnO %	Na2O %	P2O5 %	SiO2 %	SrO %	TiO2 %	LOI 1000 %	Total %
VO-11A DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
DUPLICADOS																
VO-75 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior																
VO-28 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior		0.26 0.28 0.26 0.28	0.01 <0.01 <0.01 0.02	49.6 49.6 48.8 50.4	0.01 0.01 <0.01 0.02	0.68 0.69 0.66 0.71	<0.01 <0.01 <0.01 0.02	4.43 4.44 4.36 4.51	0.30 0.30 0.28 0.32	<0.01 <0.01 <0.01 0.02	0.04 0.04 0.03 0.05	0.94 0.97 0.93 0.98	0.03 0.03 0.02 0.04	0.01 0.01 <0.01 0.02	42.80 42.96 41.80 43.96	99.49 99.53 98.50 100.50
PMX-19-24 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior																
4867 23 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior																
4867 03 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior																
4867 14 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior																
4867 16 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior		15.48 15.73 15.36 15.85	0.08 0.08 0.07 0.09	2.95 3.02 2.93 3.04	<0.01 <0.01 <0.01 0.02	3.26 3.35 3.25 3.36	3.33 3.40 3.27 3.46	0.88 0.91 0.87 0.92	0.11 0.11 0.10 0.12	2.82 2.86 2.76 2.92	0.11 0.12 0.10 0.13	64.41 65.58 64.01 65.98	0.04 0.04 0.03 0.05	0.25 0.26 0.24 0.27	4.57 4.58 4.45 4.70	102.20 104.05 102.10 104.15

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 5 – B
 Número total de paginas: 6 (A – E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método Analito Unidades LDD	C-IR07	S-IR08	ME-MS81													
		C %	S %	Ba ppm	Ce ppm	Cr ppm	Cs ppm	Dy ppm	Er ppm	Eu ppm	Ga ppm	Gd ppm	Ge ppm	Hf ppm	Ho ppm	La ppm	
		0.01	0.01	0.5	0.1	10	0.01	0.05	0.03	0.02	0.1	0.05	5	0.1	0.01	0.1	
DUPLICADOS																	
VO-11A		0.06	0.09														
DUP		0.07	0.09														
Rango de Resultados - límite inferior		0.05	0.08														
límite superior		0.08	0.10														
VO-75																	
DUP																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
VO-28																	
DUP																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
PMX-19-24				728	50.4	20	2.46	3.56	1.65	0.91	19.3	3.53	<5	7.0	0.66	25.1	
DUP				745	51.6	20	2.33	3.38	1.80	1.01	18.9	3.58	<5	7.1	0.67	25.7	
Rango de Resultados - límite inferior				699	48.4	<10	2.27	3.25	1.61	0.89	18.0	3.33	<5	6.6	0.62	24.0	
límite superior				774	53.7	30	2.52	3.69	1.84	1.03	20.2	3.78	10	7.5	0.71	26.8	
4867 23																	
DUP																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
4867 03		0.21	0.24														
DUP		0.20	0.24														
Rango de Resultados - límite inferior		0.19	0.22														
límite superior		0.22	0.26														
4867 14																	
DUP																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	
4867 16																	
DUP																	
Rango de Resultados - límite inferior																	
límite superior																	

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Veá Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
 MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 5 - C
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	
	Analito	Lu	Nb	Nd	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W
	Unidades	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	LDD	0.01	0.1	0.1	0.02	0.2	0.03	1	0.1	0.1	0.01	0.05	0.01	0.05	5	1
VO-11A DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior	DUPLICADOS															
VO-75 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior	DUPLICADOS															
VO-28 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior	DUPLICADOS															
PMX-19-24 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior		0.24 0.30 0.25 0.29	6.7 6.5 6.2 7.0	24.0 24.7 23.0 25.7	6.48 6.58 6.18 6.88	105.0 104.0 99.1 110.0	4.90 4.91 4.63 5.18	3 3 2 4	405 413 388 430	0.4 0.3 0.2 0.5	0.55 0.60 0.54 0.61	17.65 17.95 16.85 18.75	0.28 0.31 0.27 0.32	4.65 4.82 4.45 5.02	92 92 82 102	1 1 <1 2
4867 23 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior	DUPLICADOS															
4867 03 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior	DUPLICADOS															
4867 14 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior	DUPLICADOS															
4867 16 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior	DUPLICADOS															

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
 MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 5 - D
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método Analito Unidades LDD	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-4ACD81	ME-4ACD81	
		Y ppm	Yb ppm	Zr ppm	As ppm	Bi ppm	Hg ppm	In ppm	Re ppm	Sb ppm	Sc ppm	Se ppm	Te ppm	Tl ppm	Ag ppm	Cd ppm
VO-11A DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior		0.1	0.03	2	0.1	0.01	0.005	0.005	0.001	0.05	0.1	0.2	0.01	0.02	0.5	0.5
DUPLICADOS																
VO-75 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior														<0.5	0.5	
														<0.5	0.5	
														<0.5	<0.5	
														1.0	1.0	
VO-28 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior																
PMX-19-24 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior		17.1 17.4 16.3 18.2	1.95 1.88 1.79 2.04	226 236 217 245												
4867 23 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior					1.5 1.8 1.5 1.8	0.03 0.03 0.02 0.04	<0.005 <0.005 <0.005 0.010	0.010 0.011 <0.005 0.016	<0.001 <0.001 <0.001 0.002	0.09 0.10 <0.05 0.10	3.7 4.0 3.6 4.1	<0.2 <0.2 <0.2 0.4	0.01 <0.01 <0.01 0.02	0.02 0.02 <0.02 0.04		
4867 03 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior																
4867 14 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior														4.8 4.6 4.0 5.4	1.2 1.2 0.6 1.8	
4867 16 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior																

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510

Página: 5 - E
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método Analito Unidades LDD	ME-4ACD81	ME-4ACD81	ME-4ACD81	ME-4ACD81	ME-4ACD81	ME-4ACD81	ME-4ACD81	
		Co ppm	Cu ppm	Li ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Sc ppm	Zn ppm
		1	1	10	1	1	2	1	2
VO-11A DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior		DUPLICADOS							
VO-75 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior		23 23 21 25	213 208 202 219	20 20 <10 30	<1 <1 <1 2	75 74 70 79	19 20 17 22	25 25 23 27	197 194 184 207
VO-28 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior									
PMX-19-24 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior									
4867 23 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior									
4867 03 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior									
4867 14 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior		9 9 8 10	4440 4340 4240 4540	10 10 <10 20	85 81 78 88	3 3 2 4	26 25 22 29	3 2 <1 4	535 523 501 557
4867 16 DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior									

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510

Página: 6 - A
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	OA-GRA05x	ME-XRF26
Método Analito Unidades LDD	Al2O3	BaO	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SiO2	SrO	TiO2	LOI 1000	Total
Descripción de la Muestra	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
ORIGINAL DUP	DUPLICADOS														
Rango de Resultados - límite inferior															
límite superior															
ORIGINAL DUP															
Rango de Resultados - límite inferior															
límite superior															
ORIGINAL DUP	16.28 16.29	0.04 0.04	19.25 19.35	0.02 0.02	2.76 2.78	0.71 0.71	1.16 1.16	0.05 0.05	1.85 1.86	0.09 0.09	43.11 43.32	0.05 0.05	0.72 0.72		100.65 100.90
Rango de Resultados - límite inferior	16.03	0.03	19.00	<0.01	2.72	0.68	1.13	0.04	1.80	0.08	42.56	0.04	0.69		99.76
límite superior	16.54	0.05	19.60	0.03	2.82	0.74	1.19	0.06	1.91	0.10	43.87	0.06	0.75		101.80

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 6 - B
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método	C-IR07	S-IR08	ME-MS81												
	Analito	C	S	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Ge	Hf	Ho	La
	Unidades	%	%	ppm	ppm											
	LDD	0.01	0.01	0.5	0.1	10	0.01	0.05	0.03	0.02	0.1	0.05	5	0.1	0.01	0.1
DUPLICADOS																
ORIGINAL				276	45.0	10	0.96	7.04	4.48	1.60	18.4	6.71	<5	7.0	1.45	19.2
DUP				251	42.6	10	0.85	6.09	3.94	1.53	15.9	6.07	<5	6.3	1.36	17.9
Rango de Resultados - límite inferior				250	41.5	<10	0.85	6.19	3.97	1.47	16.2	6.02	<5	6.2	1.32	17.5
límite superior				277	46.1	20	0.96	6.94	4.45	1.66	18.1	6.76	10	7.1	1.49	19.6
ORIGINAL				164.5	62.9	<10	0.97	8.69	5.82	0.78	15.4	7.15	<5	7.4	1.97	29.7
DUP				152.5	63.7	10	0.95	7.99	5.57	0.78	14.7	6.58	<5	6.8	1.72	29.7
Rango de Resultados - límite inferior				150.0	60.0	<10	0.90	7.87	5.38	0.72	14.2	6.47	<5	6.6	1.74	28.1
límite superior				167.0	66.6	20	1.02	8.81	6.01	0.84	15.9	7.26	10	7.6	1.95	31.3
ORIGINAL																
DUP																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510

Página: 6 - C
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método	ME-MS81														
	Analito	Lu	Nb	Nd	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W
Unidades	LDD	ppm	ppm													
		0.01	0.1	0.1	0.02	0.2	0.03	1	0.1	0.1	0.01	0.05	0.01	0.05	5	1
DUPLICADOS																
ORIGINAL		0.67	10.8	26.8	6.11	30.8	6.51	2	82.2	0.6	1.11	1.82	0.66	0.43	45	13
DUP		0.62	9.8	25.9	5.79	28.5	6.14	2	74.7	0.4	1.02	1.67	0.56	0.34	43	1
Rango de Resultados - límite inferior		0.60	9.7	24.9	5.63	28.0	5.98	<1	74.4	0.4	1.00	1.61	0.57	0.32	37	6
límite superior		0.69	10.9	27.8	6.27	31.3	6.67	3	82.5	0.6	1.13	1.88	0.65	0.45	51	8
ORIGINAL		0.90	16.9	30.4	7.61	70.0	6.67	5	23.9	1.3	1.34	6.09	0.89	1.44	<5	<1
DUP		0.85	16.2	30.6	7.76	64.2	6.16	4	22.3	1.2	1.14	5.67	0.85	1.28	<5	<1
Rango de Resultados - límite inferior		0.82	15.6	28.9	7.28	63.5	6.06	3	21.8	1.1	1.17	5.54	0.82	1.24	<5	<1
límite superior		0.93	17.5	32.1	8.09	70.7	6.77	6	24.4	1.4	1.31	6.22	0.92	1.48	10	2
ORIGINAL																
DUP																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
 MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510
 Proyecto: PEN MEX

Página: 6 - D
 Número total de paginas: 6 (A - E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Descripción de la Muestra	Método Analito Unidades LDD	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS42	ME-4ACD81	ME-4ACD81									
		Y ppm	Yb ppm	Zr ppm	As ppm	Bi ppm	Hg ppm	In ppm	Re ppm	Sb ppm	Sc ppm	Se ppm	Te ppm	Tl ppm	Ag ppm	Cd ppm
		0.1	0.03	2	0.1	0.01	0.005	0.005	0.001	0.05	0.1	0.2	0.01	0.02	0.5	0.5
DUPLICADOS																
ORIGINAL		39.5	4.08	291												
DUP		36.2	3.93	265												
Rango de Resultados - límite inferior		35.9	3.77	262												
límite superior		39.8	4.24	294												
ORIGINAL		52.8	5.73	226												
DUP		49.6	5.48	210												
Rango de Resultados - límite inferior		48.5	5.29	205												
límite superior		53.9	5.92	231												
ORIGINAL																
DUP																
Rango de Resultados - límite inferior																
límite superior																

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****



ALS Chemex de México S.A. de C.V
 Ignacio Salazar 688, Local 5
 Fracc. Los Vinedos
 Hermosillo SONORA 83147
 Teléfono: +52 662 218 4403 Telefax: +52 662 218 4487
 www.alsglobal.com/geochemistry

A: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
 MEXICO
 AVE. UNIVERSIDAD #3000
 COL. CIUDAD UNIVERSITARIA
 CIUDAD DE MEXICO 04510

Página: 6 – E
 Número total de paginas: 6 (A – E)
 El Apéndice positivo Pagina
 Fecha Completada:
 26-MAYO-2021
 Cuenta: UNAMMX

CQ CERTIFICADO DE ANÁLISIS HE21117717

Método Analito Unidades LDD	ME-4ACD81	ME-4ACD81	ME-4ACD81	ME-4ACD81	ME-4ACD81	ME-4ACD81	ME-4ACD81	ME-4ACD81
Descripción de la Muestra	Co	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	Zn
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	1	1	10	1	1	2	1	2
ORIGINAL DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior	DUPLICADOS							
ORIGINAL DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior								
ORIGINAL DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior								
ORIGINAL DUP Rango de Resultados - límite inferior límite superior								

Comentarios: ME-XRF26: High total was obtained due to sulphides being calculated twice (in the LOI value and retained in the fusion adding to the XRF total).The sulfur-free total calculation is the Total minus SO3. SF-Total less than or equal to 100%.

***** Ve a Apéndice Página para comentarios con respecto a este certificado *****

