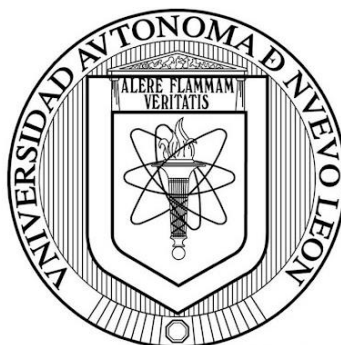


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



**MINERALOGÍA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA
DEL SKARN “LA MEXICANA”, CONCEPCIÓN DEL ORO
- MAZAPÍL, ZACATECAS**

PRESENTA

GABRIELA GUADALUPE ARIZPE RUIZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

MAYO 2026

**MINERALOGÍA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA
DEL SKARN “LA MEXICANA”, CONCEPCIÓN DEL ORO-
MAZAPÍL, ZACATECAS**

PRESENTA

GABRIELA GUADALUPE ARIZPE RUIZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN CIENCIAS GEOLOGICAS

Aprobación de la Tesis:

DR. FERNANDO VELASCO TAPIA

Director de Tesis

DR. AUGUSTO ANTONIO RODRÍGUEZ DÍAZ

Co-Director

DR. JUAN ALONSO RAMÍREZ FERNÁNDEZ

Co-Director

DR. SÓSTENES MÉNDEZ DELGADO

Subdirector de Estudios de Posgrado

MINERALOGÍA, GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA DEL SKARN “LA MEXICANA”, CONCEPCIÓN DEL ORO- MAZAPÍL, ZACATECAS

**Este trabajo fue realizado en la Facultad de Ciencias de la Tierra de la
Universidad Autónoma de Nuevo León, bajo la Dirección del Dr.
Fernando Velasco Tapia y la Co-Dirección del Dr. Augusto Antonio
Rodríguez Díaz y del Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández**

DR. FERNANDO VELASCO TAPIA

Director de Tesis

DR. AUGUSTO ANTONIO RODRÍGUEZ DÍAZ

Co-Director

DR. JUAN ALONSO RAMÍREZ FERNÁNDEZ

Co-Director

MAYO 2026

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mis padres Rafael Arizpe y Araceli Ruiz, quienes desde el momento cero se han esforzaron en darnos lo mejor. Gracias por acompañarme en mis sueños y guiarme con amor. A mi hermano Betito que me acompaña y protege siempre, gracias por ser el pilar más fuerte para nosotras. A mi hermana Rocio, quien es lo mejor en mi vida y me recuerda siempre que la vida es hermosa. A mi cuñada y sobrina por llegar a complementar nuestras vidas. A André Camilo por enseñarme a amar incondicionalmente y a mi tía Marisela Ruiz por estar al pendiente siempre.

A Bubba por acompañarme desde el inicio de la licenciatura hasta el día de hoy. Los desvelos fueron más ligeros contigo.

A Ferremundo (Cintia Cantú, Mario Sánchez y Valentín Sánchez) por su incondicional apoyo. A mis compañeros quienes hacen bonitos mis días (Cintia, Cris, Cristo, Nelda y, Adrián).

A Jorge Efren por todos los momentos divertidos y el apoyo constante.

A los Nachelis (Bettsy y Edgar), Robertito y al cubo 7 (Ana Finol, Ismelis, Ceci, Jordan y Mary) por hacer más ligero el Posgrado.

Por último y más importante: a Dios quien obra de manera hermosa en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Alma Mater, la **Universidad Autónoma de Nuevo León**, y a la **Facultad de Ciencias de la Tierra**, por brindarme una formación académica de excelencia y por poner a mi disposición sus instalaciones; así mismo a todo el personal académico, técnico y administrativo, especialmente a la Subdirección de Posgrado, por su apoyo constante.

Al **Dr. Fernando Velasco Tapia** le agradezco profundamente por confiar en mí y acompañarme durante la maestría y hasta ahora con sus consejos y carisma que le caracteriza. Gracias por su constante apoyo, dedicación, compromiso, paciencia y vasto conocimiento, que han sido esenciales para poner fin a este ciclo. Gracias por los regaños que me hicieron mejor estudiante.

Agradezco profundamente al **Dr. Augusto Antonio Rodríguez Díaz**, del Instituto de Geofísica, UNAM, por su entera disposición al compartir sus conocimientos. Gracias por confiar en mí, por su apoyo en campo, en laboratorio y sus valiosos consejos. Su orientación y aportaciones en la tesis fueron fundamentales para la elaboración de este proyecto.

Al **Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández** por el tiempo invertido en campo y por resolver con la mejor disposición las dudas que permitieron mejorar mi tesis, así como su constante orientación académica, consejos y el apoyo brindado a lo largo de la licenciatura y posgrado.

Al **Dr. René González Guzmán**, del Departamento de Geología, División de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, por su apoyo para el desarrollo de los estudios geocronológicos de este trabajo.

Al **Ing. Ignacio Elizondo** por prestar su camioneta y acompañarnos todo el tiempo en campo.

Al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología** (CONAHCyT, actualmente Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación) por brindarme el apoyo de beca para desarrollar mi estudio de maestría.

A la minera **Aura Minerals (Aranzazú Holding), S.A.** y al **Ing. Oscar Solís de la Cruz** por permitir el acceso a las minas de Aranzazú y La Mexicana. Un agradecimiento muy especial a la **Ing. Urenia Navarro**, por su apoyo en el trabajo de campo y por su asesoría en relación con la estructura y desarrollo del yacimiento.

Al **M.C. Carlos Uriel Miguel Morales**, responsable del Laboratorio de Petrografía y Preparación de muestras del Instituto de Geología, UNAM, por su ayuda en la elaboración de las láminas delgadas utilizadas en la tesis. Al **Ing. Carlos Linares López** por su ayuda en las mediciones de microsonda en el Laboratorio Universitario de Petrología del Instituto de Geofísica, UNAM.

Al **Dr. Luigi Solari** y al **Dr. Carlos Ortega** del Laboratorio de Estudios Isotópicos, Instituto de Geociencias, UNAM, por su orientación y apoyo durante los análisis de geocronología U-Pb en circón.

Finalmente, a todos aquellos a quienes involuntariamente omito, pero que de una u otra forma han sido parte de este proyecto. **¡Gracias Totales!**

ÍNDICE

	PÁGINA
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Propiedades generales del Cobre	1
1.2 Mineralogía del cobre	1
1.3 Depósitos económicos de cobre	2
1.4 Yacimientos cupríferos en México	9
1.5 Justificación, Objetivo e Hipótesis de Trabajo	12
CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO	13
2.1 Geología Regional	13
2.2 Geología Local	17
2.3 Complejo minero Aranzazú-La Mexicana	23
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	25
3.1 Muestreo	25
3.2 Petrografía	25
3.3 Microscopía Electrónica de Barrido	27
3.4 Análisis Infrarrojo de Onda Corta	27
3.5 Análisis de Difracción de Rayos X	28
3.6 Análisis de microsonda electrónica	29
3.7 Análisis geoquímico de roca total	30
3.8 Análisis geocronológico	30
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	33
4.1 Análisis mineralógico	33
4.2 Análisis geoquímico	49
4.3 Análisis geocronológico	50

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN	56
5.1 Carbonatos	56
5.2 Rocas intrusivas	58
5.3 Skarn cuprífero	64
5.4 Modelo paragenético	67
CONCLUSIONES	70
REFERENCIAS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1.1	Esquema típico de un yacimiento de tipo pórfido de cobre (Sillitoe, 2010). 4
Figura 1.2	Esquema de formación de un depósito tipo VMS (Piercey, 2010). 5
Figura 1.3	Esquema de generación de un skarn (Meinert, 2020). 6
Figura 1.4	Esquema de formación de un depósito tipo IOCG (Groves et al., 2010). 7
Figura 1.5	Modelo de formación de cobre nativo (Zhao et al., 2022). 7
Figura 1.6	Esquema de formación de un depósito de Cu sedimentario (Hitzman et al., 2010). 8
Figura 1.7	Esquema de formación de un depósito de Cu en cúpulas salinas (Martínez, 1991). 9
Figura 1.8	Distribución de depósitos de cobre (pórfidos, skarn y brechas hidrotermales) del Cinturón Laramídico (Valencia-Moreno et al. 2006). 10
Figura 1.9	Distribución temporal de depósitos de cobre (pórfidos, skarn y brechas hidrotermales) en México, que incluyen (Valencia-Moreno et al. 2006): (a) los asociados al cinturón laramídico (90-40 Ma), (b) los del Eoceno-Oligoceno de la región norte-occidente y (c) los de Mioceno-Plioceno de la región centro-sureste. Los números indican las localidades reportadas por Valencia-Moreno et al. (2006). 10
Figura 2.1	(A) La región frontera entre las provincias de la Mesa Central y de la Sierra Madre Oriental (Díaz-Bravo et al., 2022), que incluye (B) la ubicación de la zona de estudio, la región de Concepción del Oro-Mazapil y otras localidades del NMCIB = cinturón de intrusivos del norte de la Mesa Central (<i>Northern Mesa Central Intrusive Belt</i>). 14
Figura 2.2	Localización regional y mapa geológico del magmatismo entre la región de Concepción del Oro, Zacatecas y Galeana, N.L. (Velasco-Tapia et al., 2011). MC = Mesa Central; FVTM = Faja Volcánica Transmexicana; SMOcc = Sierra Madre Occidental; SMO = Sierra Madre Oriental; PVSLP = Plataforma Valles-San Luis Potosí; SFTSMA = Sistema de Fallas Taxco – San Miguel Allende. Localidades de intrusivos de la zona norte de la MC: CN, Coneto de Comonfort; LP, La Paz; PA, Papantón; RC, Real de Catorce; SA: Sapiorís-América; VE, Velardeña. Localidades que conforman el CICO: CO, Concepción del Oro; CPEP, Complejo plutónico El Peñuelo; ES, El Saltillito; MA, Mazapil; MO, Melchor Ocampo; NB, Noche Buena; RM, Rocamontes; SR, Santa Rosa; TP: Terminal de Providencia. 15
Figura 2.3	Diagrama QAP de clasificación modal de rocas plutónicas del margen occidental mexicano (círculos pequeños verdes) y de la región frontera entre la Sierra Madre Oriental y la Mesa Central (círculos grandes) (Díaz-Bravo et al., 2022). 16

Figura 2.4	(A-C) Desarrollo del arco cretácico asociado a la subducción de la placa Farallón después del cierre de la cuenca tras-arco de Arperos (Díaz-Bravo <i>et al.</i> , 2022). El transecto desde 100 a 60 Ma corresponde a la edad de deformación progresiva en esta zona. De igual forma se muestra la temporalidad entre el magmatismo intracontinental y la migración de la deformación. MFTB: Cinturón Mexicano de Pliegues y Cabalgaduras (<i>Mexicanfold and thrustbelt</i>). Distribución espacio temporal de: (A-A') Rocas plutónicas del Cretácico Superior, (B-B') Rocas plutónicas del Paleoceno, y (C-C') rocas plutónicas del Eoceno.	17
Figura 2.5	(A) Columna estratigráfica y (B) mapa geológico generales para la región de Concepción del Oro-Mazapil, Zacatecas (SGM, 2004).	18
Figura 2.6	(A) Afloramiento de caliza de la Formación Zuloaga, parcialmente marmolizada (UTM: 14R253332; 2724384); (B) Afloramiento de la Formación La Caja, parcialmente metamorfozada a un hornfels mineralizado con especies de Cu (UTM: 14R253616 E 2724244N).	19
Figura 2.7	(A) Horizonte carbonoso entre los límites entre las Formaciones La Caja y Taraises (UTM: 14R 253806, 272423); (b) Afloramiento de la Formación Taraises, consistente de caliza parcialmente marmolizada y estratos de arcilla (UTM: 14R253750, 2724394).	20
Figura 2.8	(A) Intrusivo masivo de composición intermedia. Su emplazamiento dio lugar a (B) la generación de un hornfels de calcosilicatos y (C) al desarrollo del skarn cuprífero La Mexicana, Distrito Minero de Concepción del Oro.	22
Figura 2.9	Foto panorámica de complejo minero Aranzazú-La Mexicana.	23
Figura 3.1	Distribución de puntos de muestreo (estrellas) en superficie para los yacimientos Aranzazú y La Mexicana, Concepción del Oro, Zacatecas. Las muestras procedentes de barrenos comparten la misma coordenada.	26
Figura 3.2	Microscopio de luz transmitida Zeiss Axioplan 2; Laboratorio de Petrografía y Microtermometría, Instituto de Geofísica, UNAM.	26
Figura 3.3	Microscopio de Barrido Electrónico Hitachi TM-1000; Laboratorio de Petrografía y Microtermometría, Instituto de Geofísica, UNAM.	27
Figura 3.4	Equipo LabSpecPro para análisis SWIR; Laboratorio de Petrografía y Microtermometría, Instituto de Geofísica, UNAM.	28
Figura 3.5	(A) Difractómetro Rigaku Mini Flex 600. (B) Detalle del sistema de tubo de rayos-X, porta-muestras y detector. DifractLab, S.A.	29
Figura 3.6	Microsonda Electrónica WDS JEOL JXA-8900R. Laboratorio Universitario de Petrología, Instituto de Geofísica, UNAM.	29
Figura 4.1	Imágenes de petrografía de luz transmitida (NX) para el sistema La Mexicana: (a) granitoide BMEX-492 de textura porfírica que incluye un arreglo de Qz + Plg + Kfs + Bt + Aug + Ser; (b) granitoide BMEX-492 de textura fanerítica con un arreglo similar al observado en la zona	34

	porfírica que incluye además Ttn y Ap; (c) y (d) Exoskarn D23-1208 en la que ocurre Grt + Dps ± Cal, embebidos en una matriz de carbonatos; (e) estrato arcilloso BMEX-485 que incluye restos de Plg, en algunos casos cloritizada, y espículas de Tr-Act; (f) exoskarn D23-1208 que incluye Grt + Plg con evidencia de alteración a Chl + Qz + Ms (alteración filica); (g) endoskarn D23-1223 que incluye Epd + Bt + Cal + Qz + Chl embebidos en una matriz calcareo-silícica (alteración subpropilítica); (h) endoskarn D23-1223 que incluye Epd + Cal + restos de Grt + Zrn embebidos en una matriz calcareo-silícica (alteración propilítica). Abreviaturas: Act = actinolita, Aug = augita, Bt = biotita, Cal = calcita, Chl = clorita, Dps = diópsida, Grt = granate, Kfs = feldespato potásico, Ms = muscovita, Plg = plagioclasa, Qz = cuarzo, Ser = sericita, Tr = tremolita, Zrn = circón.	
Figura 4.2	Diagrama QAP (Streckeisen, 1976) para rocas intrusivas de los sistemas de skarn La Mexicana y Aranzazú. En el gráfico se ha incluido a la roca plutónica alterada BMEX485. La línea discontinua representa el campo composicional que cubren las rocas intrusivas del Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil (DMCOM). Abreviaturas de litologías: G = granito, GD = granodiorita, QM = cuarzo-monzonita y QMD = cuarzo-monzodiorita.	35
Figura 4.3	Diagrama de clasificación de granates del sistema La Mexicana en función de sus miembros finales: Adr = andradita, Alm = almandino, Grs = grosularia, Prp = piropo y Sps = espesartina. En la parte superior izquierda se presenta el tipo de depósito metálico esperado de acuerdo con la composición de granate (Meinert, 2020).	37
Figura 4.4	Diagrama atómico Fe-Al (Kowallis <i>et al.</i> , 2022) para las titanitas del skarn La Mexicana. Se incluyen los campos donde se distribuye el mineral con un origen ígneo o hidrotermal (skarn).	39
Figura 4.5	Imágenes de petrografía de luz reflejada (NX) para el sistema La Mexicana: (a) grano de Cpy anhedral de color crema, incluido en el exoskarn D23-1208; (b) granos de Cpy + Hem + Cu nativo embebidos en una matriz de carbonato en exoskarn D23-1208; (c) fragmentos de Hem subhedral primaria acompañada de espículas de covelina en endoskarn D23-1195; (d) grano de Hem secundaria sobre Cpy de color crema, dentro de una matriz de carbonatos en endoskarn D23-1195; (e) grano de Hem primaria subhedral en exoskarn D23-1208 (f) granos de Cpy primaria en color crema acompañado de Mgt primaria dentro de exoskarn D23-1208; (g) Hem sobre granos de Grt en muestra de endoskarn D23-1223; (h) matriz de carbonatos que incluyen espículas de Hem primaria en exoskarn D23-1208. Abreviaturas: Ccp = calcopirita, Cv = covelina, Grt = granate, Hem = hematita, Mgt = magnetita.	40
Figura 4.6	Patrones de infrarrojo de onda corta (SWIR, short-wave infrared) para calizas alteradas (A) ARAG23-13 y (B) ARAG23-14. En cada patrón se incluye la posición de señales asociadas a especies de hierro (Fe ⁺² , Fe ⁺³), agua	40

	(H ₂ O), hidroxilo (OH), hidroxilo unido a Al o Mg (Al-OH, Mg-OH), carbonatos (CO ₃) y sulfatos (SO ₄) (Clark et al., 1990).	
Figura 4.7	Espectro de XRD para la muestra ARAG23-14, la cual incluye un arreglo de cuarzo (Qz) + yeso (Gy) + albita (Ab) + montmorillonita (Mn) + microclina (Mi). Se incluyen los patrones JCPDS utilizados para efectuar la comparación.	41
Figura 4.8	Diagrama de clasificación de epidotas del sistema La Mexicana en función de sus miembros finales: Czo = clinozoisita, Ep = epidota y Pmt = piemantita.	43
Figura 4.9	Diagrama de clasificación de clorita del sistema La Mexicana en función de su relación atómica de Mg, Fe y Al.	44
Figura 4.10	Imágenes de petrografía de luz reflejada (NX) para el sistema La Mexicana – Etapa retrógrada: (a) grano de Hem secundaria sobre Cpy de color crema, dentro de una matriz de carbonatos barrenos D23-1195; (b) granos de Cpy primaria en color crema acompañado de Mgt primaria barrenos D23-1208. Abreviaturas: Ccp = calcopirita, Cv = covelina, Grt = granate, Hem = hematita, Mgt = magnetita.	45
Figura 4.11	Diagrama de especies metálicas en calcopirita normalizado a condrita para especímenes en el skarn La Mexicana. Se incluye la concentración máxima reportada en calcopirita por George et al. (2018) .	46
Figura 4.12	Patrones (a) SWIR y (b) de difracción de rayos-X para la muestra ARAG23-17.	46
Figura 4.13	(A) Muestra de mano de la muestra ARAG23-MI, la cual se colectó en contacto con el endoskarn. La muestra fue triturada (B), datada por un método K-Ar (C) y caracterizada por XRD (D). Se determinó que correspondía a una flogopita.	47
Figura 4.14	Patrones de infrarrojo de onda corta (SWIR, short-wave infrared) para (b) endoskarn ARAG23-17 y (d) mica ARAG23-MI. En cada patrón se incluye la posición de señales asociadas a especies de hierro (Fe ⁺² , Fe ⁺³), agua (H ₂ O), hidroxilo (OH), hidroxilo unido a Al o Mg (Al-OH, Mg-OH), carbonatos (CO ₃) y sulfatos (SO ₄) (Clark et al., 1990).	48
Figura 4.15	Análisis mineralógico <i>CoreScanX</i> para el barrenos BMEX del sistema de skarn La Mexicana, en el intervalo de 30 a 90 m. Minerales: Bt = biotita, Fe-Cb = carbonato de hierro, Mnt = montmorillonita, Grt = granate, Chl = clorita, Ccp = calcopirita, Py = pirita.	49
Figura 5.1	Diagrama ternario SiO ₂ -CaO-Al ₂ O ₃ para carbonatos y mármoles en el Distrito de Concepción del Oro-Mazapil que incluyen los sistemas La Mexicana (este trabajo) y Sol y Luna (González-Bernal, 2018).	56
Figura 5.2	Diagramas de discriminación para carbonatos (Zhang et al., 2017) del Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil: La Mexicana (este trabajo) y Sol y Luna (González-Bernal, 2018). Los lantánidos normalizados respecto a PAAS (<i>post-Archean American Shale</i>), representativo de la corteza superior. Para comparación se incluye la composición de la corteza continental superior	57

	(UCC y NASC, North America Shale Composite; Rudnick y Gao, 2005).	
Figura 5.3	Diagrama de lantánidos normalizado a condrita para carbonatos del Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil: La Mexicana (este trabajo) y Sol y Luna (González Bernal, 2018). Datos de normalización de Rollinson (1993) .	58
Figura 5.5	Diagrama de clasificación de álcalis totales – sílice (TAS, total alkali-silica; Cox et al., 1979) para rocas intrusivas asociadas al depósito La Mexicana, Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil. La línea verde define la frontera entre magmas sub-alcálinos y alcalinos.	59
Figura 5.6	Diagramas de variación de elementos mayores para rocas intrusivas asociadas al depósito La Mexicana, Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil: (a) diagrama $\text{FeO}^t/(\text{MgO} + \text{FeO}^t) - \text{SiO}_2$ (Frost y Frost, 2008); (b) diagrama $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$ (Frost et al., 2001); (c) diagrama $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ (Maniar y Piccoli, 1989); (d) diagrama $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})/\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (Meinert, 1992).	60
Figura 5.7	Diagrama de lantánidos normalizado a condrita para rocas plutónicas asociadas al depósito La Mexicana del Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil. Datos de normalización de Rollinson (1993) .	60
Figura 5.8	Diagramas de variación para rocas plutónicas asociadas al depósito La Mexicana en el Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil: (a) diagrama $\text{Th}/\text{Yb} - \text{Ta}/\text{Yb}$ (Pearce et al., 1984); (b) diagrama $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}} - (\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ (Taylor y McLennan, 1985); (c) diagrama $\text{Rb} - \text{Yb} + \text{Nb}$ (Pearce et al., 1984 ; Pearce, 1996); (d) diagrama $\text{Th}/\text{Ta} - \text{Yb}$ (Gorton y Schandl, 2000). Fuentes magmáticas: N-MORB = cresta medio-oceánica normal, E-MORB = cresta medio-oceánica enriquecida, OIB = basalto de isla oceánica, LCC = corteza continental inferior, MCC = corteza continental media, UCC = corteza continental superior.	61
Figura 5.9	Geocronología U-Pb en circón para granitoide ARAG23-16: (a) diagrama de concordia de Wetherill y (b) diagrama de edad ponderada (sobre la base del análisis de 27 granos de 29 totales) con un promedio de 43.51 ± 0.67 Ma (MSWD = 0.86).	61
Figura 5.10	Secuencia de eventos asociados al desarrollo del skarn cuprífero La Mexicana.	62
Figura 5.11	Esquema temporal de eventos magmáticos (granodiorita, cuarzo monzodiorita y cuarzo sienita) y de generación de mineralización Fe-Cu en los depósitos Sol y Luna y Aranzazú El Cobre (Ramos-Prado et al., 2025). Los símbolos de rombo indican dataciones U-Pb en circón y los triángulos indican datación K-Ar en micas.	62
Figura 5.12	Geoquímica de circones separados de la cuarzo-monzodiorita ARAG23-16: (a) diagrama de lantánidos normalizado a condrita (Rollinson, 1993); (b) diagrama $\text{Hf} - \text{Y}$ (Belousova et al., 2003), I = kimberlitas, II = rocas ultramáficas, máficas e intermedias, III = rocas intermedias y félsicas que incluyen cuarzo, IV = rocas félsicas con alto contenido de SiO_2 , V = greisen, VI =	63

	rocas alcalinas y VII = carbonatitas; (c) diagrama $(\text{Sm}/\text{La})_N - \text{La}$ (Hoskin, 2005); diagrama $\text{U}/\text{Yb} - \text{Nb}/\text{Yb}$ (Grimes et al., 2015).	
Figura 5.13	Diagramas de variación geoquímica en función de SiO_2 para el sistema de skarn La Mexicana, que involucra carbonatos, roca ígnea, roca ígnea alterada y exoskarn: (a) relación $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, (b) relación $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$, (c) relación TiO_2/MnO , (d) relación $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$, (e) relación Ba/La y (f) relación Sr/Y .	65
Figura 5.14	Diagrama $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_N - \text{Hf}$ para circón de la cuarzomonzodiorita ARAG23-16. La relación $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_N = [\text{Ce}/0.91]/\{[\text{Nd}/0.64]^2/[\text{Sm}/0.195]\}$ de acuerdo a Yao et al. (2017) y donde los valores numéricos corresponden a datos de normalización de condrita (Rollinson, 1993).	66
Figura 5.15	Diagramas de variación en función de Cu para el sistema de skarn La Mexicana: (a) Fe_2O_3^t , (b) Co , (c) Zn , y (d) Mo . Una concentración de $\text{Cu} \geq 20,000$ ppm es considerada como la esperada para una mena de interés económico (Oyman, 2010).	66
Figura 5.16	Modelo evolutivo de mineralización de Cu para el skarn La Mexicana, Distrito Concepción del Oro, Zacatecas. Abreviaturas: Cal = calcita, Ccp = calcopirita, Chl = clorita, Epd = epidota, Gn = galena, Grt = granate, Mg = magnetita, Phl = flogopita, Py = pirita, Pyx = piroxeno, Sp = esfalerita. La datación de la granodiorita se efectuó con un método U-Pb en circón. La datación del inicio de la alteración se efectuó con un método K-Ar en flogopita.	67
Figura 5.17	Modelo paragenético del skarn cuprífero La Mexicana, Concepción del Oro, Zacatecas.	68

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1.1	Aplicaciones del cobre (ICSG, 2023). 1
Tabla 1.2	Ejemplos de especies de cobre. 2
Tabla 2.3	Tipos de yacimientos de cobre, su génesis, minerales asociados y ejemplos en el mundo (SGM, 2017). 3
Tabla 4.1	Relación de muestras colectadas en el sistema de skarn La Mexicana y esquema de análisis. 33
Tabla 4.2	Relación de muestras colectadas en el sistema de skarn Aranzazú y esquema de análisis. 33
Tabla 4.3	Composición química y cálculo de fórmula para granate en el sistema La Mexicana 36
Tabla 4.4	Composición química y cálculo de fórmula estructural para titanita del sistema de skarn La Mexicana (endoskarn BMEX-482). 38
Tabla 4.5	Composición química y cálculo de fórmula para epidota en el sistema La Mexicana (skarn D23-1223). 42
Tabla 4.6	Composición química y cálculo de fórmula estructural para clorita del sistema de skarn La Mexicana (skarn BMEX-482). Temperatura calculada utilizando el geotermómetro de Cathelineau y Nieva (1995). 43
Tabla 4.7	Composición química de calcopirita del sistema de skarn La Mexicana (endoskarn BMEX-482). 45
Tabla 4.8	Composición en elementos mayores y traza para litologías relacionadas al skarn La Mexicana (PPI = Pérdida por Ignición a 700°C; Métodos analíticos: ICP = ICP-OES, MS = ICP-MS; LD = Límite de detección). 51
Tabla 4.9	Cálculo de fórmula mineral para la mica ARAG23-MI aplicando el esquema propuesto por Brady y Perkins (2017) . n = %peso/pfg, pfg = peso fórmula gramo. 53
Tabla 4.10	Datos de geocronología U-Pb en circón para el granitoide ARAG23-16, asociado a la mineralización cuprífera La Mexicana. 53
Tabla 4.11	Composición en elementos traza (ppm) para circones separados del granitoide ARAG23-16. 54
Tabla 4.12	Datación radiométrica K-Ar de biotita separada de la muestra ARAG23-16. 54
Tabla 4.13	Datación radiométrica K-Ar de la flogopita ARAG23-MI. 55

RESUMEN

Se presentan en esta tesis de Maestría los resultados del estudio mineralógico, geoquímico y geocronológico del sistema de skarn cuprífero La Mexicana ($\text{Cu} = 2.1\text{-}3.5\%$ en exoskarn), Distrito Minero de Concepción del Oro – Mazapil, Zacatecas. La integración de la información generada ha permitido proponer un modelo paragenético para este yacimiento. De forma inicial, se efectuó el reconocimiento y el muestreo de todas las litologías involucradas en el desarrollo del skarn. Las rocas sedimentarias están representadas por estratos de margas acompañadas de rocas siliciclásticas del Jurásico Superior y Cretácico Inferior, las cuales forman parte de la secuencia de la Sierra Madre Oriental. Estas rocas fueron emplazadas por plutones de composición intermedia a félsica (granodiorita a sienodiorita), con características de magmas sub-alcálinos (tipo cordillerano – meta aluminoso) durante el Eoceno ($43.51 \pm 0.67 \text{ Ma}$; U-Pb en circon). El enfriamiento continuó al menos hasta $39.4 \pm 1.5 \text{ Ma}$ (K-Ar en biotita). Las rocas intrusivas se caracterizan por una textura porfírica a fanerítica con un arreglo de plagioclasa + cuarzo + feldespato-K + biotita $\pm$ titanita + clorita $\pm$ clinopiroxeno $\pm$ apatito + sericita. Su origen puede asociarse a la fusión parcial a nivel de la interfase manto-corteza inferior en un ambiente post-orogénico. Las condiciones oxidantes durante el emplazamiento favorecieron el desarrollo de un skarn de Cu, cuya mena principal es la calcopirita. La paragénesis tuvo lugar en tres etapas: (1) *etapa prograda*: se caracteriza por la generación de un mármol de calcosilicatos con un arreglo mineral de diópsida + granate (grosularia-andradita) + wollastonita + vesuvianita + titanita + cuarzo + calcita; (2) *etapa retrograda*: esta se subdivide en tres fases de evolución. La primera se distingue por la alteración de silicatos hacia tremolita y actinolita acompañada de minerales potásicos hidratados (flogopita y muscovita), turmalina y apatito. La segunda etapa se caracteriza por la formación paulatina de epidota, así como la alteración de micas y anfíboles hacia clorita trioctaédrica. Al incrementar las condiciones de oxidación se produce la cristalización de magnetita y calcopirita, la mena del depósito. La datación K-Ar de una flogopita permite proponer que la alteración se inició a partir de $39.8 \pm 0.9 \text{ Ma}$. En la parte final de esta etapa precipitan sulfuros (pirita, esfalerita y galena) y sulfosales de Ag; (3) *etapa supergénica*: el sistema cierra con la formación de hematita y malaquita. La combinación de las herramientas mineralógicas, geoquímicas y geocronológicas ha permitido generar un modelo paragenético para el skarn cuprífero La Mexicana. Este puede ser refinado a través de un estudio más detallado de la termodinámica del proceso.

ABSTRACT

This M.Sc. thesis project encompasses a mineralogical, geochemical and geochronological database for the copper-bearing La Mexicana skarn system (Cu = 2.1-3.5% in exoskarn), located in the Concepción del Oro - Mazapil Mining District, Zacatecas. Integral analysis of this information has enabled us to propose a paragenetic model for this deposit. At the outset, all lithologies associated with the skarn development were recognized and sampled. The sedimentary rocks consist of Upper Jurassic and Lower Cretaceous marl strata accompanied by siliciclastic rocks, which belong to the Sierra Madre Oriental sequence. These rocks were emplaced during the Eocene (43.51 ± 0.67 Ma; U-Pb in zircon) by intermediate to felsic plutons (granodiorite to syenodiorite), exhibiting sub-alkaline, Cordilleran and meta-aluminous features. Magma cooling persisted until at least 39.4 ± 1.5 Ma (K-Ar in biotite). The intrusive rocks feature a porphyritic to phaneritic texture with a plagioclase + quartz + K-feldspar + biotite $\pm$ titanite + chlorite $\pm$ clinopyroxene $\pm$ apatite + sericite arrangement. Its origin might be linked to partial melting process occurring at the upper mantle and lower crust interface in a post-orogenic tectonic setting. Oxidizing conditions during magma intrusion promoted the formation of Cu skarn, with chalcopyrite as its main ore. Paragenesis occurred in three stages: (1) *prograde stage*: defined by calcsilicate marble showing a mineral arrangement of diopside + garnet (grossular-andradite) + wollastonite + vesuvianite + titanite + quartz + calcite; (2) *retrograde stage*: this is subdivided into three evolutionary steps. The first is distinguished by the silicate's alteration into tremolite and actinolite, along with hydrated potassic minerals (phlogopite and muscovite), as well as tourmaline and apatite. The second step involves the gradual formation of epidote, along with the micas and amphibole alteration to trioctahedral chlorite. As the oxidation conditions intensify, magnetite and chalcopyrite crystallization occurs. A K-Ar dating of phlogopite suggests that alteration process started at 39.8 ± 0.9 Ma. In the concluding step of this stage, sulfides (pyrite, sphalerite and galena) and Ag-sulfosalts precipitate; (3) *supergene stage*: in which precipitates calcite + hematite + malachite. A coupled analysis of mineralogical, geochemical, and geochronological data has permitted to propose a paragenetic model for the La Mexicana copper skarn, Concepción del Oro-Mazapil Mining District.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Propiedades generales del Cobre

Es el elemento químico con número atómico 29, de símbolo Cu y perteneciente al grupo 11 de la Tabla Periódica (Metales de transición; configuración electrónica: $[Ar] 3d^{10}4s^1$; estados de oxidación: +1 y +2). Naturalmente, se presenta en forma de los isótopos ^{63}Cu (69.15%, 62.930 uma) y ^{65}Cu (30.85%, 64.928 uma) (ICSG, 2023). Su nombre deriva de los términos latinos *cuprum* o *cyprum* (metal de Chipre), que es evidencia de su uso desde la prehistoria. Esto se debe a que es uno de los pocos metales que pueden ocurrir de forma nativa y a que la mayoría de sus yacimientos se forman en zonas cercanas a la superficie. Se caracteriza por ser un metal suave, maleable y dúctil (dureza Mohs = 3), además de mostrar una relativa alta conductividad térmica (401 W/mK) y una baja resistividad eléctrica (16.78 nΩ.m a 20°C) (Moga, 2012). Debido a estas propiedades ha sido ampliamente utilizado (Tabla 1.1), al igual que sus aleaciones, para la elaboración de diversos materiales, formando parte esencial de la sociedad (ICSG, 2023). La exploración y explotación de este elemento es de importancia nacional (Crispín y Enríquez-Dentón, 1996; Téllez Ramírez, 2024).

Tabla 1.1 Aplicaciones del cobre (ICSG, 2023).

Edad de Cobre (5000-3000 a.C.)	Transporte	Medicina
Durante este periodo, el metal fue uno de los primeros en ser utilizado para la elaboración de herramientas, armas y adornos.	Se utiliza en la fabricación de motores eléctricos, bobinas de motores, baterías, industria aeroespacial y sistemas de navegación.	Sus propiedades antimicrobianas lo hacen útil para reducir la propagación de enfermedades, siendo aplicado en superficies táctiles como manijas, barandillas y equipo médico.
Energías Renovables y Tecnologías Verdes	Nanotecnología	Comunicación
Útil en la fabricación de paneles solares, turbinas eólicas y sistemas de energía hidroeléctrica.	En la creación de sensores biomédicos avanzados, tratamientos antimicrobianos y para diagnósticos.	En la era tecnológica del 5G, es crucial para sistemas de comunicación inalámbrica. Usado en antenas, estaciones de base y otros equipos.

1.2 Mineralogía del cobre

Se conocen alrededor de 165 minerales de cobre, que incluyen principalmente el elemento nativo, sulfuros y óxidos (SGM, 2014). Las condiciones de óxido-reducción son determinantes para la generación de especies en los estados de oxidación +1 (cuproso) o +2 (cúprico) (Ramírez, 2024). Los minerales más comunes incluyen a la calcopirita (CuFeS_2), la cual en promedio incluye 34% de cobre en peso (Tabla 1.2). Otras especies de importancia incluyen a la bornita (Cu_5FeS_4), la calcocita (Cu_2S) y la malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$). Estos minerales pueden ocurrir en diversos ambientes geológicos, que incluyen pórfidos, skarns y depósitos sedimentarios.

Tabla 1.2 Ejemplos de especies de cobre.

Nombre	Fórmula	% de Cu
Cobre nativo	Cu	100.0
Cuprita	Cu ₂ O	88.8
Tenorita	CuO	79.9
Calcocita	(Cu ₂ S)	79.8
Linarita	Cu ₁₈ O ₂₁	77.3
Covellita	(CuS)	66.5
Digenita	(Cu ₁₂ S ₁₂)	66.4
Cluroclasita	CuCl	64.2
Bornita	(Cu ₅ FeS ₄)	63.3
Malaquita	(Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂)	57.5
Planchcita	(Cu ₄ (SiO ₄)(OH) ₆)	56.7
Azurita	(Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂)	55.3
Cuprocloro	Cu ₂ Cl ₂ (OH) ₂	54.8
Duffrenita	(Cu ₁₄ O ₂₈ (CO ₃) ₆)	52.4
Tetrahedrita	(Cu ₁₂ Sb ₄ S ₁₂)	46.6
Diopstasa	(Cu ₆ Si ₄ O ₁₁ (OH) ₈ ·5H ₂ O)	45.3
Crisocola	(Cu ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ ·nH ₂ O)	34.7
Calcopirita	(CuFeS ₂)	34.6
Cloruro Cúprico	(CuCl ₂ ·2H ₂ O)	33.8
Vitrolo Azul/Sulfato Cúprico	CuSO ₄ ·5H ₂ O	33.0

1.3 Depósitos económicos de cobre

En relación con el contexto tectónico, el cobre puede ocurrir en diferentes tipos de yacimientos que incluyen ambientes ígneos, metamórficos y sedimentarios (Tabla 1.3; Ridley, 2013; SGM, 2017). Es importante señalar que, la mayoría de estos depósitos son de tipo polimetálico, siendo Fe, Pb y Zn los principales metales que acompañan al Cu (Meinert et al., 2003). Además, en gran parte se ubican en zonas relacionados a procesos orogénicos del Mesozoico-Cenozoico, los cuales representan más del 50% de la producción mundial (Evans, 1987).

En los siguientes párrafos se describe, de forma breve, las características que distinguen a los tipos de yacimientos de cobre relacionados a diferentes ambientes tectónicos.

1.3.1 Pórfido de Cobre: Se trata de depósitos que tienen un origen magmático-hidrotermal, en los que líquidos magmáticos de alta temperatura, pobres en agua y sin un gran avance en cristalización se acercan a la superficie de la corteza terrestre (Figura 1.1). El nombre se atribuye a la textura porfirítica que es característica y en donde la roca intrusiva se encuentra en forma de diques o “tapones alargados” cercanos y asociados directamente con la mineralización (Seedorff, 2005). Al hallarse cerca de la superficie, el magma se satura en agua durante la cristalización. El agua magmática contiene aniones cloruro (Cl⁻) que provocan la extracción del cobre desde el magma y la precipitación posterior de sulfuros y óxidos. Este tipo de depósito es fuente importante de metales críticos para la industria y la sociedad, que incluyen el cobre y el oro (Park et al., 2021). Sin

embargo, los procesos magmáticos y redox necesarios para formar depósitos de pórfido de grado económico siguen siendo aún tema de debate.

Otra característica es que estos depósitos son de grande tonelaje, pero de baja ley de recuperación, y con la peculiaridad de que la mena de estos yacimientos se distribuye en formas de vetas o vetillas diseminadas (Titley y Beane, 1981; Chelle-Michou *et al.*, 2017). El escaso conocimiento que se tenía sobre estos depósitos provocó la aceptación de la idea de que el único metal importante era el cobre. En la actualidad, se reconocen cinco clases de pórfidos en función del tipo de metal dominante: Cu, Au, Mo, W y Sn. Estas clases se dividen a su vez en subclases de acuerdo con la composición del intrusivo y el contenido de minerales que acompañan a la mena metálica (Sillitoe, 2010).

Tabla 1.3 Tipos de yacimientos de cobre, su génesis, minerales asociados y ejemplos en el mundo (SGM, 2017).

Ambiente	Yacimientos	Génesis	Minerales	Ejemplos de depósitos
Ígneo	Pórfido	Formados por intrusiones de granitoides y actividad volcánica asociada	Calcopirita Bornita Molibdenita	Baja California (México) Sonora (México) Chuquicamata (Chile) Bingham Canyon (EUA)
Ígneo	VMS (<i>Volcanogenic Massive Sulfide</i>)	Formados por actividad hidrotermal asociada a volcanes submarinos. Ricos en sulfuros	Calcopirita Esfalerita Galena	San Nicolás (Durango) Francisco I. Madero (Zacatecas) Kidd Creek (Canadá) Flin Flon (Canadá)
Metamórfico	Skarn	Formados por metamorfismo-hidrotermalismo generado por el contacto entre una intrusión magmática y rocas carbonatadas	Granates Piroxenos Calcopirita	Concepción del Oro Zacatecas (México) Yerington (EUA) Antamina (Perú)
Metamórfico	IOCG (<i>Iron Oxide Copper Gold</i>)	Asociado a actividad hidrotermal por actividad magmática	Calcopirita Pirita Hematita	Durango (México) Michigan (EUA) Olympic Dam (Australia)
Sedimentario	Elemento Nativo	Formados por la reducción directa del cobre a partir de soluciones hidrotermales.	Cobre nativo	Lago superior (EUA)
Sedimentario	Yacimientos Sedimentarios	Formados en rocas clásticas o carbonatadas	Calcopirita Bornita Calcosina	Molango (Hidalgo) El Boleo (Baja California Sur) Kupferschiefer (Europa central) Zaire (África)
Sedimentario	Domos salinos	Asociados a diapiros donde el cobre se concentra en sedimentos circundantes	Calcosina Bornita	Yacimientos en el Golfo de México

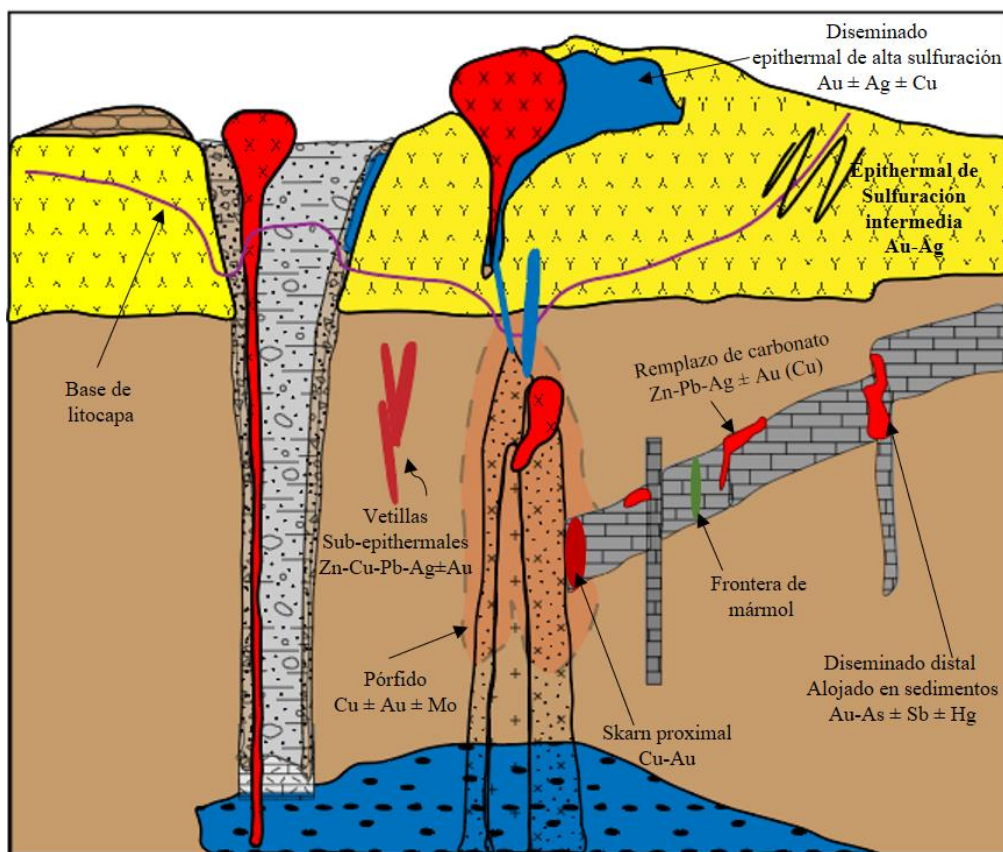


Figura 1.1 Esquema típico de un yacimiento de tipo pórfido de cobre (Sillitoe, 2010).

1.3.2 Yacimiento tipo VMS (*Volcanogenic Massive Sulfide*): Suelen ser depósitos formados en zonas de actividad volcánica submarina, donde fluidos hidrotermales interactúan con rocas volcánicas o sedimentarias generando la precipitación en forma de lentes masivos de una mena polimetálica (Mineriaenlinea, 2022).

Ocurren en zonas de régimen extensional (zonas de cresta y de arco posterior), que incluyen estructuras de graben, calderas y fallas sin-sedimentarias o sin-volcánicas. Estas últimas son comúnmente asociadas a enjambres de diques máficos paralelos a zonas de rift y suelen ocurrir sobre complejos de intrusivos. El gradiente de temperatura da lugar a la circulación del fluido y la interacción con las litologías volcánica y/o sedimentarias, generando la precipitación del montículo tabular de sulfuro masivo (>40%), cuarzo y filosilicatos subordinados, acompañados de óxido de hierro y otros metales (Figura 1.2; Piercey, 2010).

Durante el Jurásico tardío y el Cretácico temprano en el margen occidental de México se formaron los yacimientos más representativos de tipo VMS. Muchos de ellos presentan una zonación y una estructura mineral de tipo “*kuroko*”, relacionadas a secuencias volcano-sedimentarias asociadas a cuencas tras arco. Abundan a lo largo del margen Pacífico, desde Baja California hasta Guerrero, sobre los terrenos Alisitos, Parral y Guerrero y suelen tener una asociación metálica de Zn-Pb-Cu o Zn-Cu con una relación a rocas volcánicas calco-alcalinas, toleíticas o alcalinas (Camprubí *et al.*, 2017). Estos

yacimientos son contribuyentes importantes en la producción mundial de metales (Zn: 22%, Pb: 9.7%, Ag: 8.7%, Cu: 6.0%, Au: 2.2%).

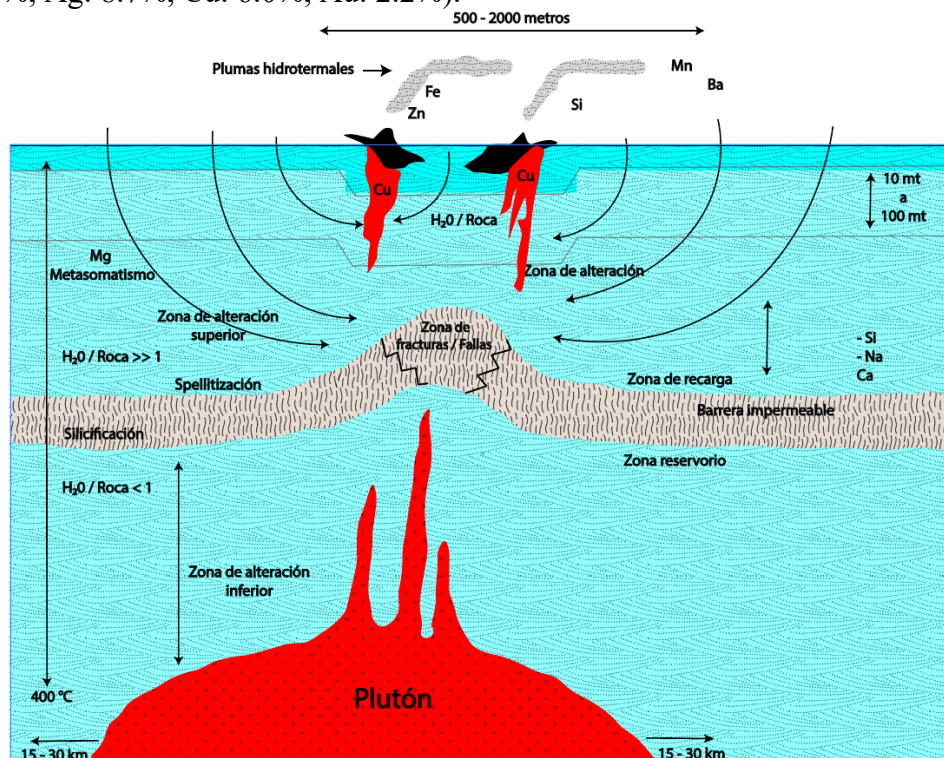


Figura 1.2 Esquema de formación de un depósito tipo VMS (Piercey, 2010).

1.3.3 Skarn: El término (Meinert, 1992, 2020; Misra, 2000; Meinert et al., 2005;) ha sido aplicado a una variedad de ensamblajes de calco-silicatos formados por la interacción de un magma con rocas carbonatadas, durante un evento de metamorfismo de contacto o regional (Figura 1.3). Sin embargo, también se ha utilizado para categorizar a aquellos arreglos de calco-silicatos que resultan del metasomatismo con otras litologías encajonantes que incluyen lutita, arenisca, granito, basalto y komatiita. Einaudi y Burt (1982) dividieron a los skarns en dos tipos: (a) *de reacción*, de una extensión limitada, que se desarrollan a lo largo de los contactos de lutita-caliza durante el metamorfismo y (b) *de depósito*, los cuales incluyen mineralizaciones metálicas debido a la infiltración de fluidos derivados de intrusiones ígneas. De esta forma, las clasificaciones deberían considerar los tipos de roca (ígneas y encajonantes) y la asociación de minerales de la litología reemplazada. Los términos endo- y exo-skarn refieren a la ubicación de los productos de la “skarnificación”, ya sea si se encuentra dentro de las rocas ígneas o dentro de la roca carbonatada. Desde un punto de vista composicional los skarns han sido clasificados de acuerdo con el metal dominante: Cu, Fe, Au, W, Zn-Pb, Mo o Sn (Pirajno, 2009).

Estos sistemas se han asociado a zonas de arcos de cordillera, generando skarns con metales base, principalmente de cobre y hierro que han crecido de forma adyacente a plutones de cuarzo-diorita o granodiorita y ferrosos. Aquellos que son ricos en cobre y/o hierro, pueden mostrar cantidades significativas de oro (Sawkins, 1984).

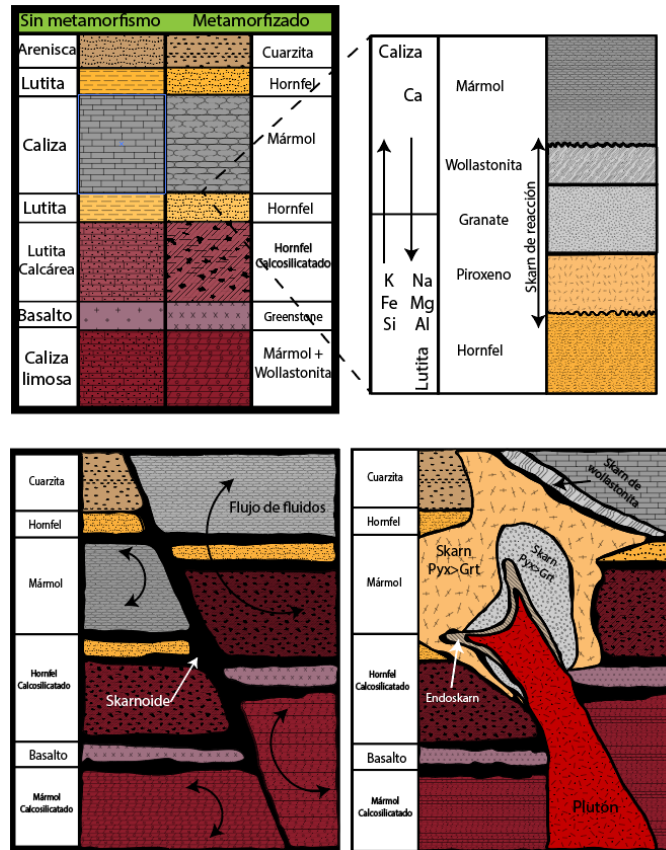


Figura 1.3 Esquema de generación de un skarn (Meinert, 2020).

1.3.4 Yacimiento de tipo IOCG (*Iron Oxide Copper Gold*): El término fue usado por primera vez para distinguir entre la diversa variedad de depósitos asociados a óxidos de hierro con mena polimetálica (Figura 1.4; Hitzman *et al.*, 1992; Williams *et al.*, 2005; del Real, 2023): (1) son depósitos de Cu acompañados en ocasiones por Au y acumulaciones de tierras raras, (2) presentan vestigios de hidrotermalismo y su desarrollo muestra un control estructural marcado, (3) incluyen una cantidad abundante de magnetita y/o hematita, (4) óxidos de Fe con una relación de Fe/Ti más alta a aquella observada en la mayoría de las rocas ígneas y la corteza terrestre y (5) no están relacionados necesariamente con un intrusivo.

Se generan en diversos ambientes tectónicos que permitan condiciones para la formación de magma de manera regional, su diferenciación, migración y la posibilidad de fenómenos de mezcla (Hitzman, 2000; Shaofeng, 2016): (1) ambiente extensional intracontinental, (2) ambiente de arco en margen continental y (3) ambiente de colisión. Estos depósitos se han relacionado a dos tipos de actividad magmática (Shaofeng, 2016): (1) intrusivos calco-alcalinos, por ejemplo, el depósito Olympic Dam (Australia) asociado a una intrusión de granito Proterozoico (1600 Ma) y el depósito Candelaria (Chile) asociado a una monzodiorita y granodiorita-tonalita del Cretácico y (2) magmas carbonatados, como los depósitos proterozoicos de Phalaborwa (polimetálico, Sudáfrica) y Bayan Obo (Fe-Nb-REE, China). Otra particularidad es la profundidad requerida para su formación: desde la corteza inferior hasta ~10 km de profundidad, en contraste a los pórfidos o los skarns, que se localizan comúnmente arriba de los ~5 km. Esto indica que los fluidos provienen de una fuente más profunda (Groves *et al.*, 2010).

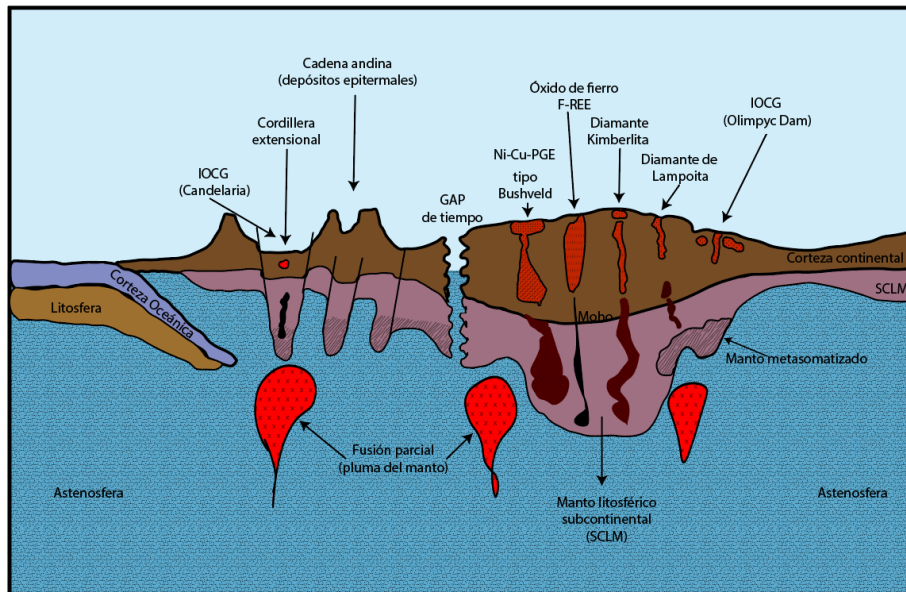


Figura 1.4 Esquema de formación de un depósito tipo IOCG (Groves *et al.*, 2010).

1.3.5 Yacimiento de Cobre nativo: se trata de depósitos hipógenos, donde el cobre precipita como elemento nativo durante el ascenso de fluidos derivados de una fuente magmática (Figura 1.5). Suelen estar asociados a yacimientos de tipo pórfido o VMS (Schwartz, 1996; Zhao *et al.*, 2022). Estos depósitos se forman en secuencias terrestres de basalto-conglomerado a temperaturas de 100-200°C. Los sistemas hidrotermales deben de mostrar condiciones de fugacidades de oxígeno especiales (por debajo del límite de estabilidad de la cuprita y por encima del límite de magnetita-hematita), además de bajas actividades de azufre total para asegurar la precipitación del cobre nativo (Schwartz, 1996). Por último, estos depósitos pueden estar sujetos a procesos hidrotermales posteriores y recrystalizar minerales ya formados, haciendo más complicado el entendimiento de su paragénesis (Kleine y Stefánsson, 2018).

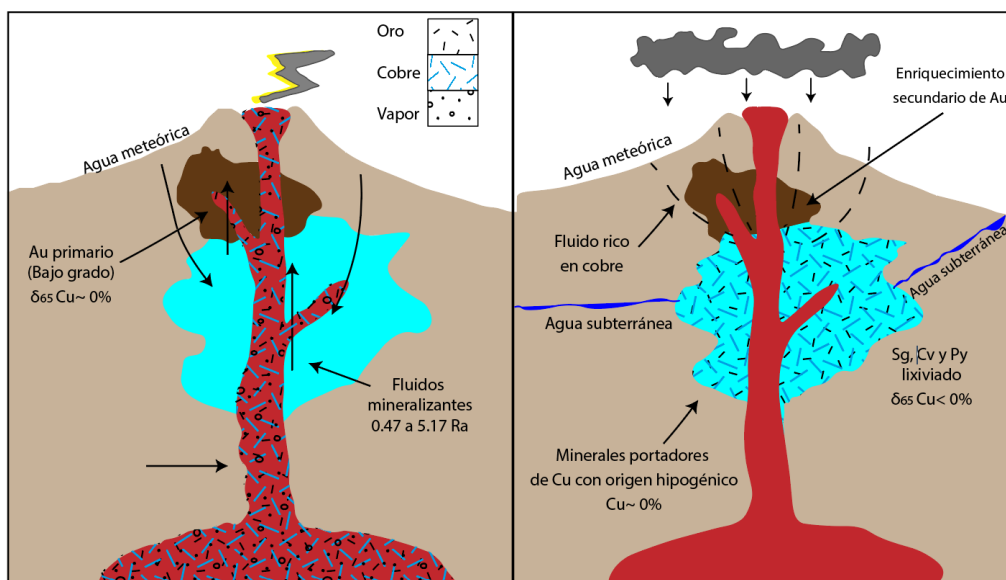


Figura 1.5 Modelo de formación de cobre nativo (Zhao *et al.*, 2022).

1.3.6 Yacimientos de Cu sedimentario: Los depósitos estratiformes de cobre alojados en rocas sedimentarias se generan por el movimiento de fluidos, que contienen cobre, a través de un frente de reducción que resulta en la precipitación de sulfuros de cobre (**Figura 1.6**). Ejemplos de producción a gran escala se localizan en tres grandes cuencas: (1) Cuenca paleoproterozoica Kodaro-Udokan (Siberia), (2) Cuenca neoproterozoica Katangan (Centro-Sur de África) y (3) Cuenca pérmica Zechstein (Norte de Europa).

En general, el marco tectónico para estos depósitos se generó a partir de rifts fallidos, que posteriormente se convirtieron en cuencas en las que se depositaron secuencias de lechos rojos, cubiertas por sedimentos marinos y/o lacustres (Hitzman *et al.*, 2010). Además de recuperar cobre desde estos yacimientos, se puede aprovechar su enriquecimiento en otros metales como cobalto, plomo y plata, en algunas ocasiones oro, uranio, grupo del platino y elementos de tierras raras. La precipitación de estos metales se da por procesos diplogenéticos (en parte sin-genéticos y en parte epigenéticos). Inicia con una reducción del carbonato de los sedimentos, que se enriquece en sulfuros y continua con la impregnación de cobre y los metales asociados por un proceso post-sedimentario. Los metales provienen de granos y poros de la roca adyacente y que son removidos con la ayuda de fluidos transportadores (Brown, 1992).

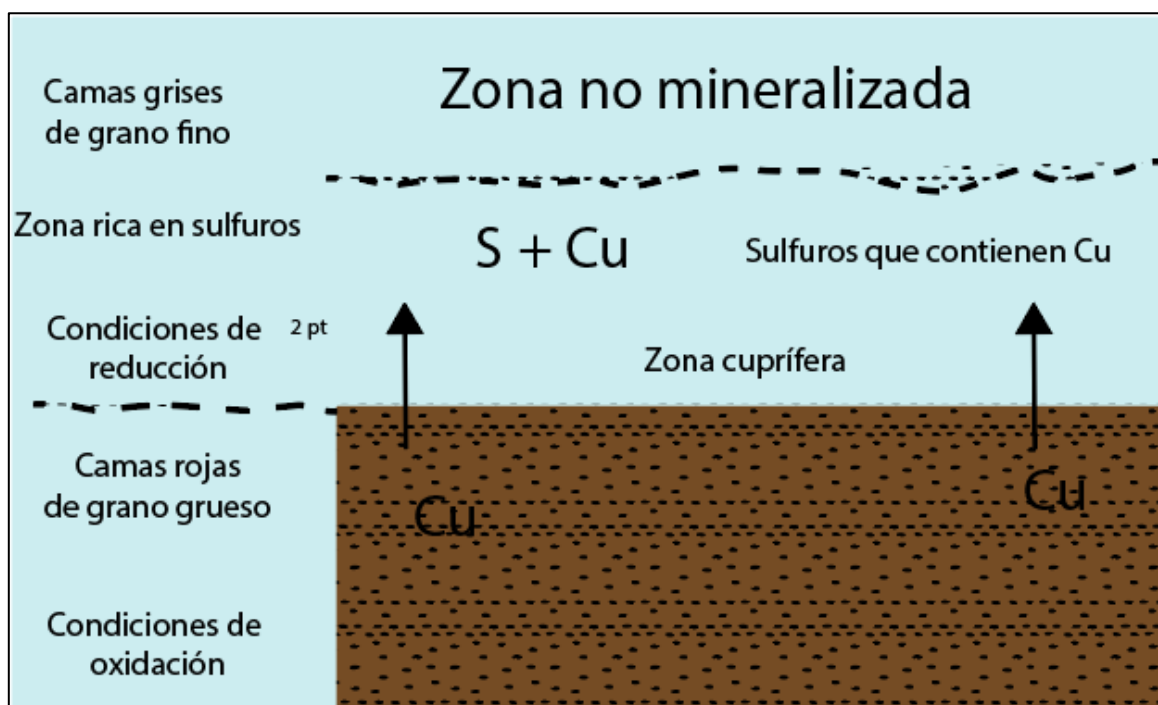


Figura 1.6 Esquema de formación de un depósito de Cu sedimentario (Hitzman *et al.*, 2010).

1.3.7 Yacimientos de Cu en domos salinos: A través del Golfo de México se encuentran distribuidas estas estructuras, producto generalmente de la migración de evaporitas (yeso y anhidrita) jurásicas durante la deformación de secuencias sedimentarias mesozoicas (**Figura 1.7**; Martínez, 1991). Estos cuerpos incluyen caliza y sulfuros además de las sales, pudiendo presentar condiciones para la acumulación de petróleo en los flancos y/o entre capas de roca. Los sulfuros son el resultado de una reducción bacteriana de sulfatos, así

como por la desintegración del petróleo que forma sulfuro de hidrógeno, el cual subsecuentemente es oxidado a sulfuro elemental, por lo tanto se generan concentraciones importantes de celestita y barita, así como metales de Zn, Pb, Cu y Ag (Kyle, 1999).

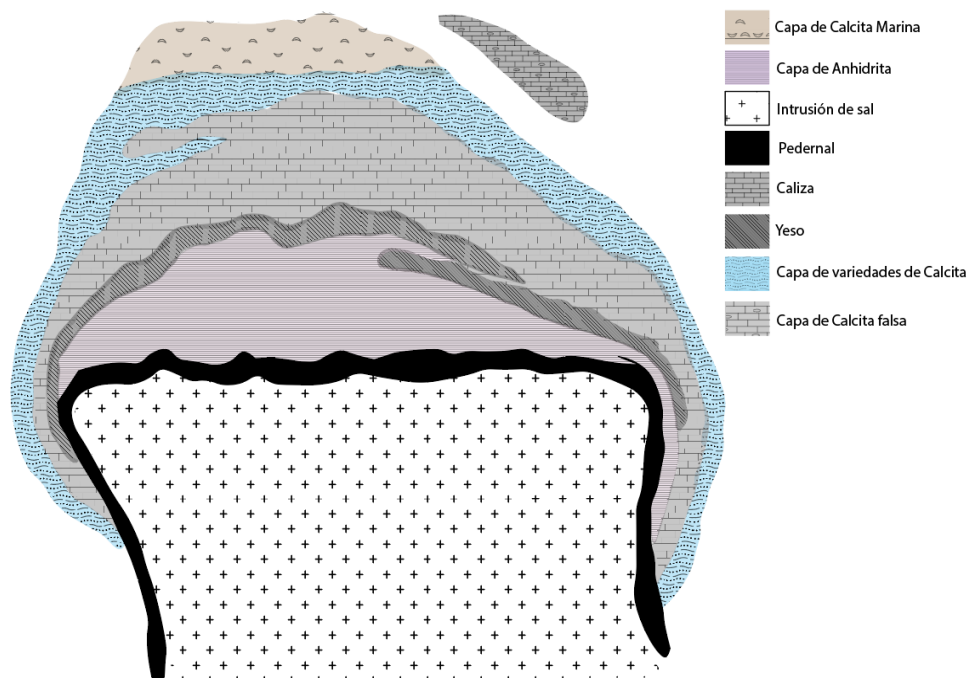


Figura 1.7 Esquema de formación de un depósito de Cu en cúpulas salinas (Martínez, 1991).

1.4 Yacimientos cupríferos en México

México es uno de los principales productores de cobre. Entre 2001 y 2021 se registró un aumento en la producción, pasando de 371 a 734 mil toneladas. Esto significó un incremento de 98% y su posicionamiento como el décimo productor mundial. El mayor centro extractivo es el yacimiento de Cananea, Sonora, con una capacidad de producción anual de 525 mil toneladas, lo cual representó 2.6% del total global en 2021 (Meinert, 1982; Bhutada, 2021; Ramírez, 2024). La producción nacional de cobre durante el 2022 fue de 753 mil 885 toneladas, lo que representó un aumento en 2.7% con relación al año anterior (CAMIMEX, 2023). Sonora en ese mismo año aportó al país 75.6% de la producción nacional de cobre, seguido por Zacatecas con una producción del 13.7% (principalmente en el municipio de Mazapil y triplicando el registro de 2021) y San Luis Potosí con 4.3% (específicamente en el municipio de Villa de la Paz).

Esta producción cuprífera está ligada principalmente a cuerpos mineralizados que presentan características de tipo pórfido, seguido de algunos de skarn y brechas hidrotermales. En estos yacimientos, además de Cu, se extrae W, Mo, Au, Ag, Pb y Zn. Valencia-Moreno *et al.* (2006, 2017) efectuaron una clasificación temporal, dividiendo los yacimientos en (Figuras 1.8-1.9): (a) los asociados al denominado cinturón laramídico (90-40 Ma), (b) del Eoceno-Oligoceno del centro-occidente y (c) del Mioceno-Plioceno del centro-sureste.

La actividad magmática que provocó el desarrollo de estos grandes cuerpos de México, así como aquellos localizados desde Alaska hasta el SW de EE. UU., se inició hace unos 200 Ma en la Columbia Británica (Canadá) con una asociación a un ambiente de arco continental. Se ha señalado que la actividad magmática migró paulatinamente hacia el sur, llegando al noreste de Sonora entre los 64-55 Ma. Progresivamente, el magmatismo se manifestó en la región centro y sur occidental de México (45 – 31 Ma) y continuó migrando hacia el sureste durante el Mioceno-Plioceno situándose en Chiapas.

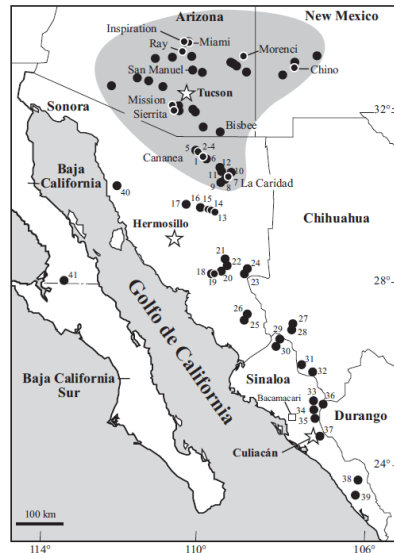


Figura 1.8 Distribución de depósitos de cobre (pórfidos, skarn y brechas hidrotermales) del Cinturón Laramídico ([Valencia-Moreno et al. 2006](#)).

De acuerdo con [Valencia-Moreno et al. \(2006, 2017\)](#) el cinturón de pórfidos de Cu asociados al magmatismo laramídico se encuentran restringidos al sur de la Meseta de Colorado (sur de Arizona, oeste de Nuevo México y norte de Sonora).

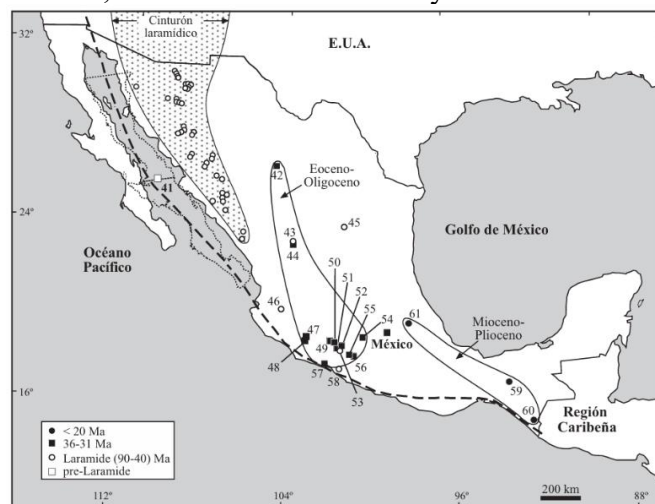


Figura 1.9 Distribución temporal de depósitos de cobre (pórfidos, skarn y brechas hidrotermales) en México, que incluyen ([Valencia-Moreno et al. 2006](#)): (a) los asociados al cinturón laramídico (90-40 Ma), (b) los del Eoceno-Oligoceno de la región norte-occidente y (c) los de Mioceno-Plioceno de la región centro-sureste. Los números indican las localidades reportadas por [Valencia-Moreno et al. \(2006\)](#).

Estos se depositaron principalmente entre 68-54 Ma. Su origen se ha asociado a la subducción sub-horizontal de la placa Farallón que provocó condiciones de fusión parcial del manto superior, el cual además recibió la influencia de líquidos astenosféricos incorporados a través de las fisuras entre segmentos de la placa Farallón.

Se ha estimado que el cinturón laramídico de pórfidos cupríferos contiene 245 Mt de Cu (20% en México) y 5 Mt de Mo (26% corresponden a depósitos mexicanos). Dentro de los yacimientos más representativos del cinturón se encuentran: (a) Cananea ([Singer et al., 2005](#)), que se presenta en forma de stockwork, skarn y brechas con Cu-Mo-Zn, asociados a la intrusión de granodiorita y monzodiorita (edad K-Ar (phl): 59.9 ± 2.0 Ma) que generaron una mena de pirita, calcopirita, molibdenita y calcosita. Se ha estimado una reserva de 7140×10^6 ton que incluyen 0.42% de Cu, 0.008% de Mo, 0.58 g/ton de Ag y 0.012 g/ton de Au; (b) La Caridad ([Valencia et al., 2006](#)), que incluye stockwork y brecha con Cu-Mo, relacionados con una granodiorita (edad Re-Os (mo): 53.8-53.6 Ma). El yacimiento incluye pirita, calcopirita, molibdenita y calcosita. El depósito es de 1800×10^6 ton con 0.452% de Cu y 0.0247% de Mo; (c) Santo Tomás ([Damon et al., 1983](#)), una estructura de Cu diseminado, asociado a una intrusión granodiorítica (edad K-Ar (bt): 57.2 ± 1.2 Ma). Las principales especies incluyen pirita, calcopirita, bornita y calcosita. El yacimiento incluye 250×10^6 ton con 0.45% de Cu y 0.05 g/ton de Au; (d) Cuatro Hermanos ([Barra et al., 2005](#)), que se presenta como stockwork y brecha con Cu y Mo, relacionado a una granodiorita (edad Re-Os (mo): 55.7 ± 0.3 Ma). La mena incluye pirita, calcopirita, molibdenita y calcosita. Se han reportado 233×10^6 ton de material con 0.431% de Cu y 0.035% de Mo.

Por otra parte, los yacimientos del Eoceno-Oligoceno se distribuyen entre el norte y el centro-occidente de México. Estos incluyen estructuras de stockwork y brechas, pero también skarns. El magmatismo generalmente es de tipo cuarzo-monzodiorítico y granodiorítico con menas de pirita, calcopirita, galena, esfalerita y óxidos de hierro. Algunos ejemplos de localidades incluyen: (a) La Verde ([Solano-Rico, 1995](#)), formada por una estructura de brechas generadas por un intrusivo granodiorítico (edad K-Ar (Hb): 33.4 ± 0.7 Ma). La mena principal es de calcopirita, pirita y schelita. Se han reportado 110×10^6 ton de material con 0.7% de Cu; (b) San Martín ([Damon et al., 1983](#)), que se presenta como stockwork y skarn con Cu, Zn y Au relacionado a una intrusión granodiorítica (edad K-Ar (Bt): 46.2 ± 1.0 Ma). La mena incluye galena, pirita, calcopirita, bornita y esfalerita. Se han reportado 30.5×10^6 ton de material con 1.0% de Cu, 5.0% Zn, 150 g/ton Ag y 0.3-0.7 g/ton Au; (c) Tepalcuatita ([Solano-Rico, 1995](#)), que se presenta como stockwork y brecha con Cu y Au, relacionado a una granodiorita. La mena incluye pirita, calcopirita y Oro. Se han reportado 27×10^6 ton de material con 0.32% de Cu y 0.64 ppm Au; (d) Concepción del Oro ([Barton et al., 1995](#)) que se presenta como skarn de Cu-Au, relacionado a una granodiorita y cuarzomonzodiorita (edad K-Ar (Bt): 40.0 ± 1.2 Ma). La mena incluye pirita, calcopirita, powellita, tetraedrita y esfalerita. Se han reportado 2×10^6 ton de material con 2% de Cu y 1.6 g/ton Au. La mina La Mexicana, objeto de estudio en esta tesis, forma parte de este sistema.

Por último, los yacimientos más recientes (Mioceno-Plioceno) ubicados en la parte centro- sureste de México ocurren como estructuras de skarn, stockwork y diseminados con menas de pirita, calcopirita y óxidos. Algunos ejemplos de localidades incluyen: (a) La Salinas ([Damon et al., 1983](#)) que se presenta como stockwork y diseminados de Cu, relacionado a una cuarzo-monzodiorita (edad K-Ar (Ser): 62.8 ± 1.4 Ma). La mena incluye

pirita, calcopirita y óxidos de Fe. Se han reportado 0.4×10^6 ton de material con 1.0- 1.6% de Cu; (b) Santa Fe (Damon *et al.*, 1983) que se presenta como skarn, stockwork y diseminados de Cu, relacionado a una cuarzo-monzodiorita (edad K-Ar (bi): 2.29 ± 0.1 Ma). La mena incluye calcopirita, bornita y argentita. Se han reportado 0.4×10^6 ton de material con 0.6% de Cu, 120 g/ton Ag y 2.6 g/ton Au y 1.30% Pb; (c) Tolimán (Barton *et al.*, 1995) que se presenta como stockwork y diseminados de Cu, relacionado a una cuarzo-monzodiorita (edad K-Ar (bi): 5.75 ± 0.1 Ma). La mena incluye galena, pirita, calcopirita, bornita y calcocita, que en conjunto incluye un 0.8% Cu.

1.5 Justificación, Objetivo e Hipótesis de Trabajo

El modelo genético de los depósitos de skarn Fe-Cu del Distrito de Concepción del Oro, Zacatecas (Sol y Luna, Aranzazú y Cata Arroyo), se ha documentado recientemente (Ramos-Prado *et al.*, 2025). Sin embargo, en esta región se encuentra el yacimiento La Mexicana, un skarn de Cu que representaría un estado más evolucionado y superficial del sistema. Por otra parte, el modelo para los skarn de Fe-Cu se ha elaborado a partir de datos obtenidos a nivel superficial, teniendo control de la roca sedimentaria, el intrusivo y la mineralización. En este trabajo además de contar con información de superficie, ha habido la posibilidad de tener acceso a barrenos de pozos de exploración para su estudio, proporcionados por Aura360, compañía encargada del minado de La Mexicana.

De esta forma, el objetivo principal de este trabajo fue el realizar la caracterización mineralógica, geoquímica y geocronológica de las litologías involucradas en el sistema de skarn La Mexicana, como base principal para generar un modelo de paragénesis. Para alcanzar este objetivo se planteó: (1) Identificar arreglos de minerales que caracterizan a las etapas progradada y retrogradada del yacimiento, (2) Acotar temporalmente el desarrollo del depósito, (3) Determinar la evolución geoquímica relacionada a la generación del skarn y (4) Proponer un modelo de paragénesis del yacimiento a partir de la interpretación de la información mineralógica y geoquímica del sistema skarn.

Como inicio de la investigación, se ha partido de la siguiente hipótesis de trabajo: la interacción de magmatismo de composición intermedia con carbonatos arcillosos durante el Eoceno dio lugar, a un nivel relativamente somero, a metamorfismo de contacto, metasomatismo y alteraciones hidrotermales, generando el skarn de Cu La Mexicana. Así que la evaluación de la estructura mineralizada, asociaciones minerales, la geoquímica de roca ígnea y de roca encajonante, permitirá generar un modelo evolutivo para este sistema de skarn.

CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO

2.1 Geología Regional

El Distrito Minero de Concepción del Oro –Mazapil se ubica en los límites de las provincias de la Sierra Madre Oriental y de la Mesa Central (**Figura 2.1**). La zona sur de la Mesa Central se encuentra está constituida por una meseta elevada (>2,000 msnm) cubierta por rocas volcánicas cenozoicas, mientras que la región norte se caracterizó por el desarrollo de depresiones que fueron rellenas de sedimentos aluviales y lacustres (**Nieto-Samaniego, 2005; Díaz Bravo et al., 2022**). Al noreste de la Mesa Central se encuentra el contacto con el Sector Transversal de Parras, que forma parte de la provincia de la Sierra Madre Oriental. Ésta es considerada como un rasgo de relieve prominente, producto del levantamiento y deformación del basamento y de los paquetes de rocas mesozoicas que le sobreyacen, formando un frente tectónico plegado y cabalgado (**Eguiluz de Antuñano et al., 2000; González-Guzmán et al., 2023**).

Se ha señalado que el proceso de deformación y cabalgamiento ocurrió en dos etapas principales. La primera se asoció con el cierre de la cuenca de Arperos durante la acreción del terreno de Guerrero y la segunda se caracterizó por el desarrollo de un régimen compresivo durante el Cretácico tardío, relacionado a la subducción de la placa Farallón. Durante este último evento se generaron pliegues de dirección N70°W con vergencia al NNE (**Eguiluz de Antuñano et al., 2000**). Estas unidades también se vieron afectadas por fallas laterales y extensionales de tendencia NE y NW (**Díaz Bravo et al., 2022**), como la falla de San Marcos de actividad post-laramídica (Mioceno tardío-Plioceno temprano) y fallas paralelas o asociadas a ellas que se encuentran al norte del límite de la Mesa Central y paralelas al Sector Transversal de Parras (**Chávez-Cabello et al., 2004; Aranda-Gómez et al., 2005**).

De esta forma, en la región entre Concepción del Oro, Zacatecas y Galeana, N.L. ocurrió el emplazamiento de intrusivos en la secuencia mesozoica de forma episódica (Cretácico tardío y Eoceno-Mioceno) (**Figura 2.2**). Estos cuerpos ígneos se han relacionado a procesos distensivos cercanos al margen y en el interior del continente, lo que provocó la fusión parcial del manto y/o de la corteza inferior, seguida de la asimilación de corteza continental de niveles más someros (**Velasco-Tapia et al., 2011; González-Guzmán et al., 2023**).

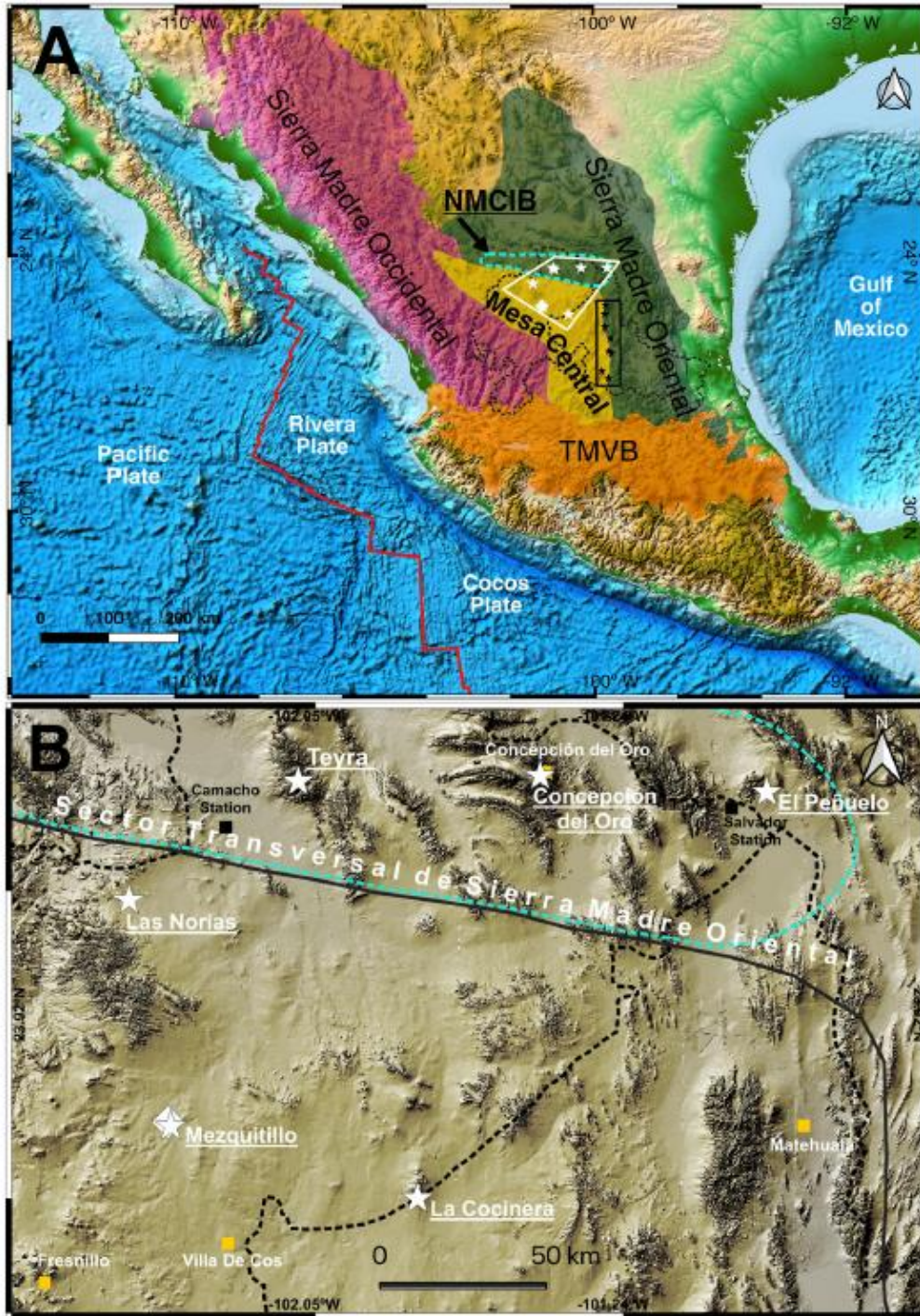


Figura 2.1(A) La región frontera entre las provincias de la Mesa Central y de la Sierra Madre Oriental (Díaz-Bravo *et al.*, 2022), que incluye (B) la ubicación de la zona de estudio, la región de Concepción del Oro-Mazapil y otras localidades del NMCIB = cinturón de intrusivos del norte de la Mesa Central (Northern Mesa Central Intrusive Belt).

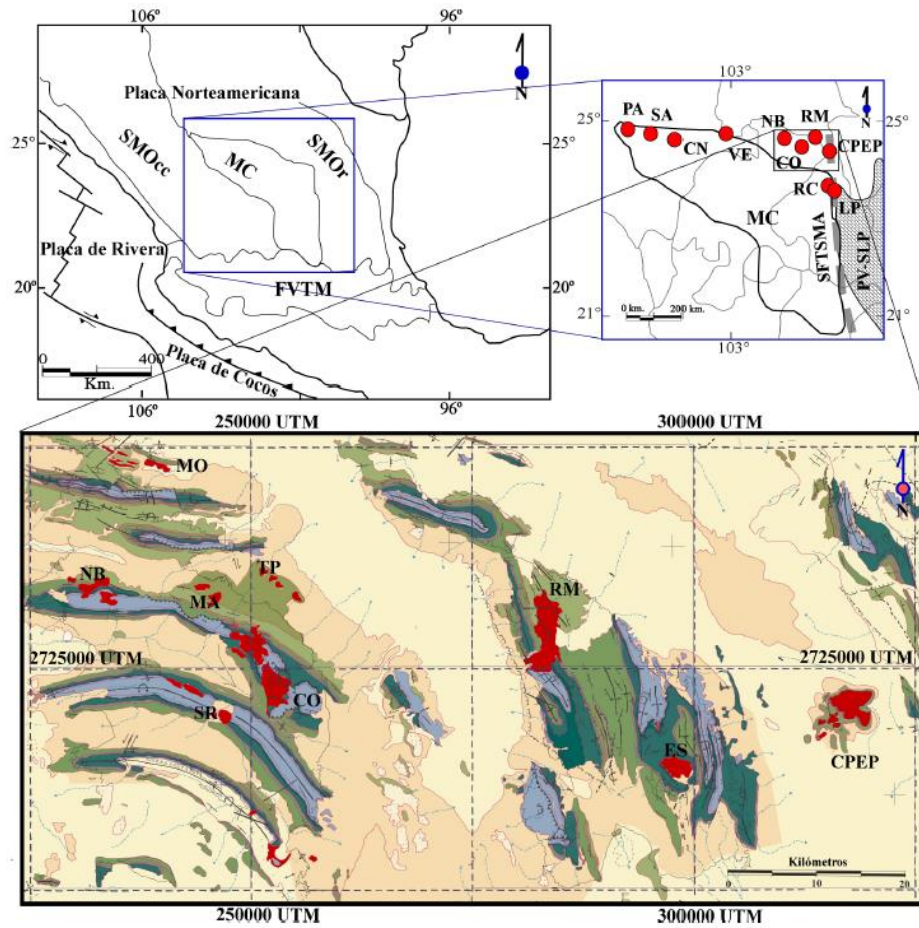


Figura 2.2 Localización regional y mapa geológico del magmatismo entre la región de Concepción del Oro, Zacatecas y Galeana, N.L. (Velasco-Tapia *et al.*, 2011). MC = Mesa Central; FVTM = Faja Volcánica Transmexicana; SMOcc = Sierra Madre Occidental; SMOOr = Sierra Madre Oriental; PVSLP = Plataforma Valles-San Luis Potosí; SFTSMA = Sistema de Fallas Taxco – San Miguel Allende. Localidades de intrusivos de la zona norte de la MC: CN, Coneto de Comonfort; LP, La Paz; PA, Papantón; RC, Real de Catorce; SA: Saporis-América; VE, Velardeña. Localidades que conforman el CICO: CO, Concepción del Oro; CPEP, Complejo plutónico El Peñuelo; ES, El Saltillito; MA, Mazapil; MO, Melchor Ocampo; NB, Noche Buena; RM, Rocamontes; SR, Santa Rosa; TP: Terminal de Providencia.

Clark *et al.* (1982) propusieron un modelo espacio temporal para el magmatismo en esta zona, relacionado a la variación en el ángulo de subducción de la placa Farallón. De acuerdo con este modelo, a medida que disminuía el ángulo de la placa a partir del Cretácico tardío ocurrió una migración del magmatismo hacia el interior continental. Posteriormente, durante el Oligoceno, una condición de *roll-back* de la placa Farallón ocasionó el aumento del ángulo de subducción. En consecuencia, el arco magmático durante un corto tiempo experimentó una regresión hacia la paleo-trinchera. Estas variaciones en espacio y tiempo provocaron variaciones en la composición de los magmas. Aquellos cercanos a la paleo-trinchera muestran características cálcicas a calco-alcalinas, mientras que aquellos alejados del margen son calco-alcalinos con alto contenido de K a alcalinos (González-Guzmán *et al.*, 2023).

Sin embargo, este modelo de migración espacio temporal fue criticado por [Díaz-Bravo et al. \(2022\)](#). Estos autores resaltaron la diversidad composicional de los intrusivos ([Figura 2.3](#)), que incluye monzodiorita, monzonita, sienita, cuarzo monzodiorita, cuarzo monzonita, cuarzo sienita, granodiorita y monzogranito. A partir del análisis de información geocronológica, propusieron que esta actividad magmática ocurrió de forma continua en el margen occidental mexicano entre el Cretácico tardío y el Eoceno, mientras que en la región frontera entre la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental se identificaron dos pulsos (Cretácico tardío y Eoceno), con una pausa en el Paleoceno ([Figura 2.4](#)).

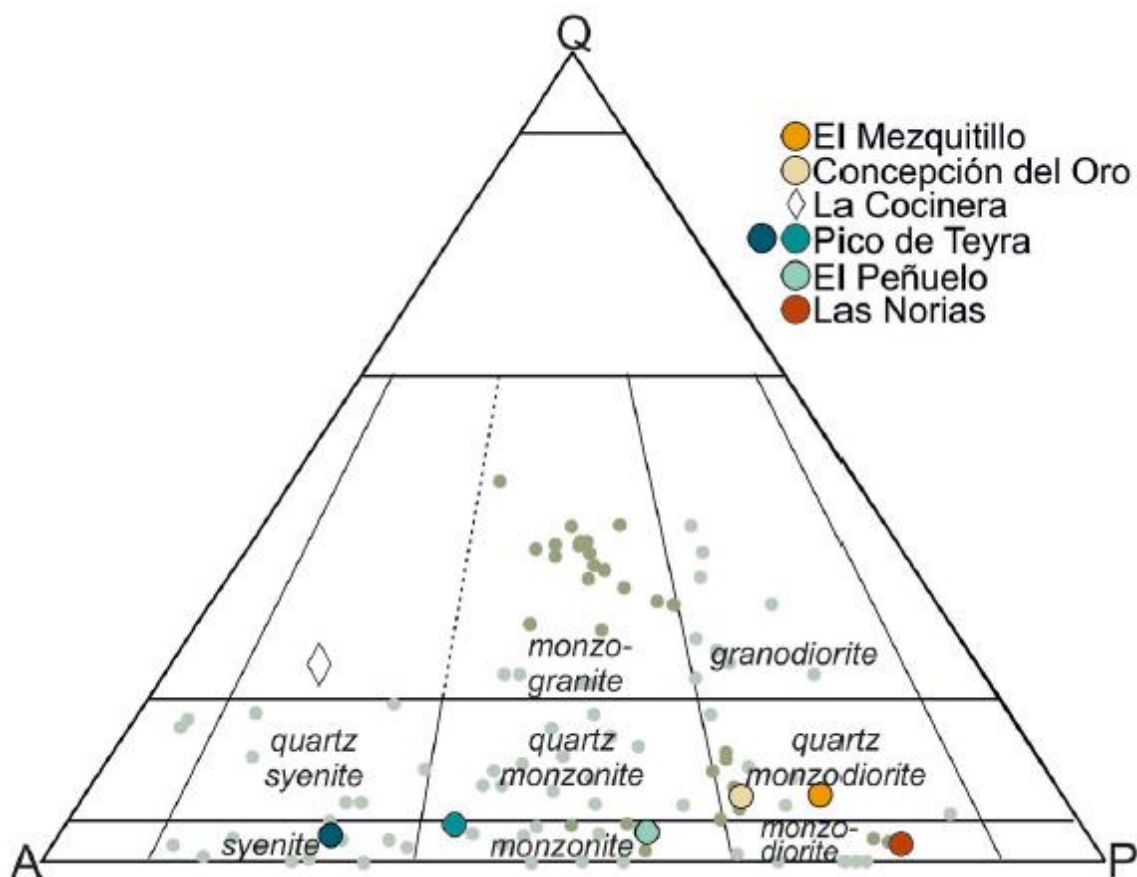


Figura 2.3 Diagrama QAP de clasificación modal de rocas plutónicas del margen occidental mexicano (círculos pequeños verdes) y de la región frontera entre la Sierra Madre Oriental y la Mesa Central (círculos grandes) ([Díaz-Bravo et al., 2022](#)).

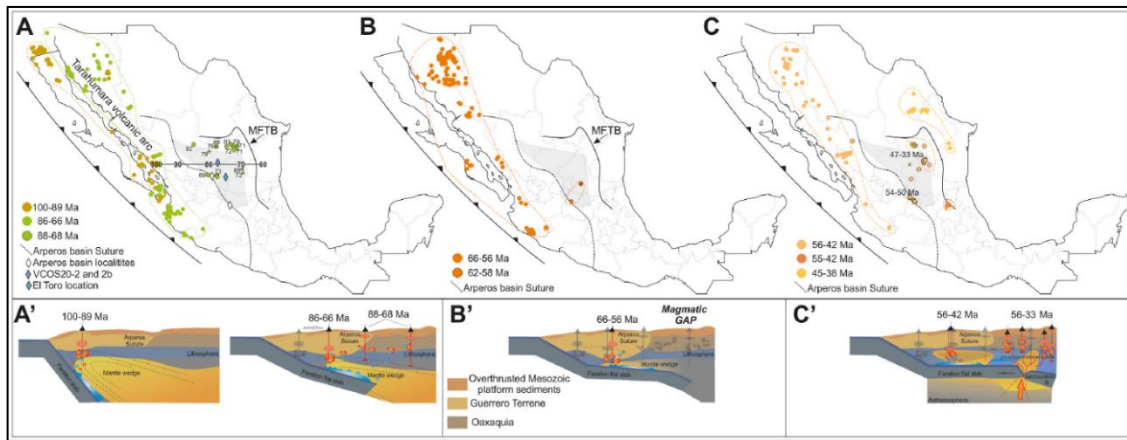


Figura 2.4 (A-C) Desarrollo del arco cretácico asociado a la subducción de la placa Farallón después del cierre de la cuenca tras-arco de Arperos (Díaz-Bravo *et al.*, 2022). El transecto desde 100 a 60 Ma corresponde a la edad de deformación progresiva en esta zona. De igual forma se muestra la temporalidad entre el magmatismo intracontinental y la migración de la deformación. MFTB: Cinturón Mexicano de Pliegues y Cabalgaduras (*Mexicanfold and thrustbelt*). Distribución espacio temporal de: (A-A') Rocas plutónicas del Cretácico Superior, (B-B') Rocas plutónicas del Paleoceno, y (C-C') rocas plutónicas del Eoceno.

2.2 Geología Local

De acuerdo con el INEGI (2010), la mayor parte de la región de Concepción del Oro-Mazapil se encuentra incluida en la provincia de la Sierra Madre Oriental (97.6%), mientras que el resto forma parte de la provincia de la Mesa Central (Figuras 2.5 A y B). De esta forma, la mayor parte de las litologías que afloran corresponden a caliza con diversas proporciones de terrígenos, acompañada de conglomerado y lutita-arenisca con edades del Jurásico Superior (Oxfordiano-Titoniano) al Cretácico Superior (Campaniano). El magmatismo está representado por rocas intrusivas (monzonita, granodiorita y cuarzomonzodiorita) y, en menor cantidad, por basaltos y tobas ácidas. En los contactos entre las rocas sedimentarias y los intrusivos se han desarrollado depósitos de skarn de Fe-Cu y polimetálico. La estratigrafía se complementa con depósitos aluviales del Cuaternario (Pleistoceno-Holoceno) (INEGI, 2010). A continuación, se presenta una breve descripción de las unidades sedimentarias expuestas en el área de estudio.

- (a) *Formación Zuloaga* (Oxfordiano-Titoniano; Figura 2.6A): Esta unidad es la más antigua que aflora en el área de estudio. Fue estudiada originalmente por Burckhart (1906), quien designó como localidad tipo a la Sierra de Sombrerillo, al norte de Melchor Ocampo, Zacatecas. Se le ha descrito como una caliza de color gris oscuro que intemperiza a gris pardo, de estratificación mediana a gruesa con espesores variables de 50 cm hasta 500-600 m. Puede presentar disolución kárstica, estilolitas y nódulos de pedernal gris oscuro. Le sobreyace de forma concordante la Formación La Caja. Durante el presente estudio esta unidad fue identificada parcialmente metamorfozada a mármol y con un espesor de 30 a 80 cm. Sus tonalidades van desde gris a blanco, con algunas zonas intemperizadas de color café y rojo pardo (Figura 2.6).

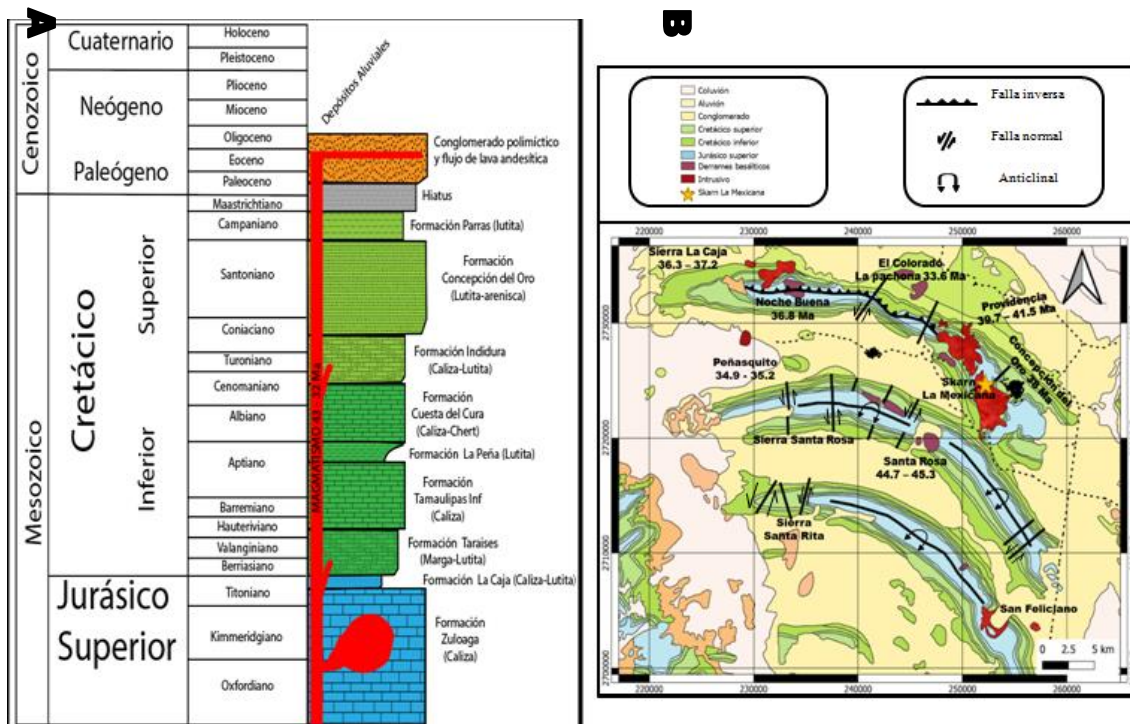


Figura 2.5 (A) Columna estratigráfica y (B) mapa geológico generales para la región de Concepción del Oro-Mazapil, Zacatecas (SGM, 2004).

- (b) *Formación La Caja* (Titoniano; **Figura 2.6B**): fue definida por **Imlay (1937)** como estratos delgados de caliza, marga, lutita oscura y limolita, con algunas intercalaciones de pedernal negro. Su localidad tipo se ubica en Vereda del Quemado, en el flanco meridional de la Sierra La Caja cerca de Mazapil, Zacatecas. Tiene espesores que varían entre 20 y 25 metros, aunque en algunas zonas pueden ser mayores. La unidad se subdivide en cuatro miembros: (A) arcilloso-arenoso (B) calcáreo-fosfático-fosilífero (C) arcillo-arenoso con bandas y nódulos de pedernal negro y (D) calcáreo. La presencia de amonoideos indica un depósito en un ambiente somero con pendiente suave (**Rogers et al., 1961**). En el área de estudio se observa el miembro arcilloso-arenoso con evidencia de metamorfismo a un hornfels mineralizado a especies de Cu. La mena se desarrolla en forma de mantos a lo largo de los planos de debilidad de los estratos sedimentarios. Por otra parte, en la parte superior de la Formación La Caja se identificó un horizonte oscuro con materia orgánica que se extiende 25 metros (**Figura 2.7A**).
- (c) *Formación Taraises* (Berriasiano-Valanginiano): fue definida por **Imlay (1936)** como una unidad calcárea y calcáreo-arcillosa que se puede dividir en un miembro inferior formado por caliza gris con una porción menor de lutita calcárea y poco contenido fósil, y un miembro superior constituido por caliza delgada de color gris claro a oscuro con contenido fosilífero. Su localidad tipo se ubica en el Cañón de Taraises, Sierra de Parras, Coahuila. En el área de estudio, la unidad se presenta en forma de una secuencia de caliza gris oscura marmolizada (espesor ~20-30 cm).

Dentro de este cuerpo se distinguen horizontes de arcillas, algunas vetillas cupríferas y pequeñas acumulaciones de pirita (**Figura 2.7B**)



Figura 2.6 (A) Afloramiento de caliza de la Formación Zuloaga, parcialmente marmolizada (UTM: 14R253332; 2724384); (B) Afloramiento de la Formación La Caja, parcialmente metamorfozada a un hornfels mineralizado con especies de Cu (UTM: 14R253616 E 2724244N).



Figura 2.7 (A) Horizonte carbonoso entre los límites entre las Formaciones La Caja y Taraises (UTM: 14R 253806, 272423); (b) Afloramiento de la Formación Taraises, consistente de caliza parcialmente marmolizada y estratos de arcilla (UTM: 14R253750, 2724394).

- (d) *Formación Tamaulipas Inferior* (Hauteriviano-Aptiano): [Muir \(1936\)](#) la describió como una secuencia de caliza gris que se acompaña de nódulos de pedernal. Su localidad tipo se ubica en el Cañón de la Borrega, SE de Tamaulipas, donde se encuentra concordante y transicional con las Formaciones Taraises y La Peña. [Ramírez-Peña \(2011\)](#) mencionó que en el área de estudio se puede dividir cuatro miembros donde: (1) Miembro 1, que exhibe ~185 m de caliza gris oscura y nódulos de pedernal; (2) Miembro 2, constituido estratos calcáreos de ~25-30 m, acompañados de intercalaciones de margas gris oscura de ~15-20 cm; (3) Miembro 3, conformado por ~65 m de caliza oscura con intercalaciones de lutita negra laminar, y (4) Miembro 4, en contacto transicional con el miembro 3 y constituido por caliza gris claro (espesor ~30-70 cm), intercalada con limolita laminar verdosa (probablemente acumulación de ceniza volcánica). Este miembro representa un espesor total de ~210 m.
- (e) *Formación La Peña* (Aptiano): Esta unidad se conforma de un miembro inferior calcáreo y un miembro superior calcáreo-lutítico, de acuerdo con su exposición en el flanco W de la Sierra de Parras, Coahuila ([Imlay, 1936](#)). Sin embargo, en la región de Concepción del Oro, esta unidad se presenta en forma de margas de ~10-15 cm intercaladas con material arcilloso, alcanzando un espesor total de ~105 m.
- (f) *Formación Cuesta del Cura* (Albiano-Cenomaniano): Su localidad tipo se ubica al W de la Sierra de Parras, Coahuila, en donde ocurre como ~ 64-70 m de una sucesión de caliza ondulosa de color gris oscuro delgada a media con intercalaciones

de arcillas y bandas de pedernal. Sin embargo, [Enciso de la Vega \(1963\)](#) reportó que su contacto con la Formación Indidura está marcado por una discordancia.

- (g) *Formación Indidura* (Turoniano-Coniaciano): Su nombre proviene de las exposiciones al E del Cerro Indidura, al sureste de Las Delicias, Coahuila ([Imlay, 1936](#)). Se conforma una secuencia de ~650 m, la cual se divide en cinco miembros transicionales: (1) El Miembro 1, que consiste de un espesor variable de estratos de yeso, que cubren a la Formación Cuesta del Cura; (2) Miembro 2, que corresponde a lutita, la cual conforma grandes depresiones debido a la erosión; (3) Miembro 3, constituido por una alternancia de lutita y arenisca; (4) **Miembro 4**, constituido por lutita con alternancias de caliza negra; y (5) Miembro 5, conformado por caliza lutítica de estratificación delgada. De acuerdo con [Rogers et al. \(1961\)](#), en la región de Concepción del Oro ocupa las partes bajas de las laderas con un espesor de ~180 m y se compone de (1) una unidad inferior constituida de caliza arcillosa y limolita calcárea dispuestas en lajas y capas delgadas y (2) una unidad superior conformada por lutita gris oscura.
- (h) *Formación Concepción del Oro* (Santoniano): inicialmente [Imlay \(1936\)](#) consideró a estos estratos en el área de estudio como Formación Caracol. Sin embargo, [Ocampo-Díaz et al. \(2016\)](#) la reconocieron como una unidad distinta y conformada por dos miembros: (1) el Miembro Tierras Blancas, un depósito clástico de costa deltaica, que consiste en una intercalación de estratos finos y fracturados de lutita y arenisca de grano fino a grueso, que en conjunto cubren un espesor de ~800 m; y (2) Miembro Rancho Viejo (espesor ~400 m), constituido por alternancias de conglomerado, arenisca de grano medio a muy grueso y lutita. Puede incluir fósiles de amonites, por lo que se ha interpretado como un sistema de depósito profundo de abanico submarino.
- (i) *Formación Parras* (Campaniano): Se ha definido como una lutita carbonosa de color gris oscuro, la cual está intercalada por arenisca calcárea en forma de estratos o lentes, la cual ocurre al W de la sierra de Parras, Coahuila ([Imlay, 1936](#)). [Rogers et al. \(1961\)](#) reportaron ~1,300 m de espesor máximo para esta unidad en el área de estudio, aunque en muchos sitios se encuentra cubierta parcialmente por sedimentos del Paleógeno y Cuaternario.

Por otra parte, en el área de estudio se ha ubicado un cuerpo intrusivo masivo de composición posiblemente intermedia (**Figura 2.8a**). Este se caracteriza por una textura fanerítica en la que se distinguen a simple vista fenocristales de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico. El emplazamiento de este plutón provocó metamorfismo de contacto (generación de hornfels con calcosilicatos) y metasomatismo (skarn de Cu) en los estratos de la Formación La Caja (**Figura 2.8b-c**). Como ya se ha señalado, el objetivo de este trabajo es el proponer un modelo paragenético para este depósito cuprífero.

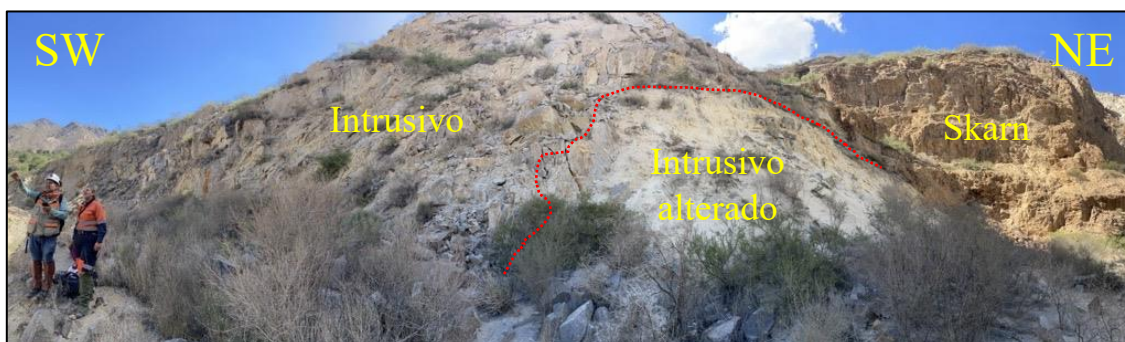


Figura 2.8 (A) Intrusivo masivo de composición intermedia. Su emplazamiento dio lugar a (B) la generación de un hornfels de calcosilicatos y (C) al desarrollo del skarn cuprífero La Mexicana, Distrito Minero de Concepción del Oro.

2.3 Complejo minero Aranzazú-La Mexicana

La compañía *Aura Minerals / Aura 360 Mining* posee 10,000 hectáreas de derechos mineros y nuevas extensiones de minas, que incluyen nuevos objetivos en el Distrito Minero de Concepción del Oro – Mazapíl (Figura 2.9; <https://www.auraminerals.com/es/>). El proyecto de minado de Fe-Cu (Au-Ag) está situado en una región de clima semiárido con una alta evaporación. El complejo no incluye áreas naturales protegidas, regiones terrestres prioritarias o áreas de importancia para la conservación de la vida silvestre.



Figura 2.9 Foto panorámica de complejo minero Aranzazú-La Mexicana.

La operación en esta región se inició en 1962, asumiendo *Aura Minerals* el control desde 2008. En 2015, la compañía cerró el minado a fin de rediseñar y reestructurar la entrada a minas y a las zonas de producción. A través de un programa de perforación exploratoria, la compañía logró confirmar y expandir el minado histórico a partir de 2018. Desde entonces, se han reportado las condiciones geotécnicas, el plan minero y los recursos minerales inferidos y reservas, además de características adicionales (información de pozos de exploración y barrenos) del área concesionada.

En los reportes de la empresa se indica que, en el área se localiza un complejo intrusivo de composición que varía de monzonita a granodiorita. Este plutón se emplazó en calizas del Jurásico y Cretácico, formando hornfels y mármol, así como chimeneas, mantos, *stockworks* y diseminados que constituyen sistemas de exoskarn y endoskarn. Además, han reportado el desarrollo de alteración de tipo propilitica, fílica y potásica asociada a la evolución de la mineralización.

La mina “La Mexicana” cuenta particularmente con una mena de calcopirita, con una producción diaria de ~3,350 toneladas de Cu, las cuales se obtienen principalmente a profundidad utilizando una combinación de métodos de minería longitudinal y transversal de pozo largo para la mayor parte del depósito. Por otra parte, en 2023 se alcanzó además una producción activa de 106,118 onzas de oro equivalente, estimando una reserva probada y probable de 915 mil onzas de oro equivalente. Se ha estimado una vida útil de la mina subterránea y tajos abiertos de ~8 años.

Los materiales extraídos son tratados en una planta de tipo convencional, que incluye sistemas de chancado, molienda, flotación y filtración, alcanzando una concentración final promedio de 23 %Cu/ton. Los relaves de lodos convencionales se eliminan en una nueva instalación de almacenamiento, designada TD5. El diseño metodológico de la planta de tratamiento también incluyó la construcción de presas aguas abajo y terraplenes con tierra zonificada con drenaje interno, a fin de controlar el nivel freático y aumentar la estabilidad de las estructuras.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Considerando una combinación de diferentes técnicas de campo y laboratorio, se estableció un esquema de trabajo con la finalidad de resolver los objetivos principales del trabajo: (a) determinar la mineralogía y geoquímica de las litologías sedimentarias, ígneas y metamórficas involucradas en el desarrollo del depósito cuprífero La Mexicana, (b) construir un modelo paragenético del yacimiento y (c) acotar los periodos de emplazamiento magmático y del inicio de la mineralización. A continuación se describen las diferentes etapas que conformaron el esquema de trabajo.

3.1 Muestreo

Durante el trabajo de campo se realizó un muestreo extensivo (~5 kg/muestra) en la mina La Mexicana (**Figura 3.1**), donde se recolectaron 10 muestras en superficie y 8 adicionales de núcleos de un barreno que corta las litologías asociadas al sistema de skarn. De esta forma, se cuenta con (a) una muestra de mármol (Formación Zuloaga), un horizonte carbonoso (Formación La Caja) y una caliza arcillosa (Formación Taraises), (b) 8 muestras de roca plutónica de composición intermedia (3 de superficie y 5 de barrenos), (c) una muestra de roca sedimentaria con una alteración intensa, (d) 5 muestras de skarn (2 de superficie y 3 de barrenos) y (e) una muestra de mica en contacto con la mineralización. Adicionalmente, para efectos de comparación, se colectaron 25 muestras asociadas al depósito Aranzazú. Estas incluyeron 3 rocas sedimentarias (Formación Zuloaga; 2 de superficie y una de barreno), 12 rocas intrusivas de composición intermedia (una de superficie y 11 de barrenos), 7 muestras de skarn (4 de superficie y 3 de barrenos) y 3 jasperoides recuperados en superficie.

3.2 Petrografía

Para un grupo de muestras representativas de los sistemas de skarn, se prepararon láminas delgadas con pulido espejo en el *Laboratorio de Preparación, Instituto de Geofísica, UNAM*. Las muestras fueron cortadas en fragmentos más pequeños, para después descostrar y pulir con la finalidad de eliminar impurezas. A partir de este material se prepararon prismas (de aproximadamente de 4 cm × 3 cm × 3 cm). Los bloques se montaron sobre un portaobjetos de vidrio y se cortaron hasta dejar un espesor de unos milímetros. A continuación la capa adherida al vidrio fue pulida con polvos abrasivos hasta obtener el acabado requerido para efectuar el análisis petrográfico y de microscopía de barrido electrónico.



Figura 3.1 Distribución de puntos de muestreo (estrellas) en superficie para los yacimientos Aranzazú y La Mexicana, Concepción del Oro, Zacatecas. Las muestras procedentes de barrenos comparten la misma coordenada.

Con ayuda de un microscopio de luz transmitida Zeiss Axioplan 2 acoplado a una cámara digital (**Figura 3.2**) del *Laboratorio de Petrografía y Microtermometría, Instituto de Geofísica, UNAM*, en cada lámina delgada se determinó la textura y el arreglo de minerales, considerando las propiedades ópticas particulares de cada especie (índice de refracción, birrefringencia, pleocroísmo, ángulos de extinción, relieve y color) y las guías documentadas en la literatura (*MacKenzie et al., 1996*). Por otra parte, las láminas delgadas también fueron utilizadas para realizar una revisión de fases metálicas, con ayuda de un microscopio de luz reflejada *Motic Panthera Scientific*.



Figura 3.2 Microscopio de luz transmitida Zeiss Axioplan 2; Laboratorio de Petrografía y Microtermometría, Instituto de Geofísica, UNAM.

3.3 Microscopía Electrónica de Barrido

Esta técnica (*Scanning Electron Microscopy*, SEM) permite la obtención de imágenes de alta resolución de la superficie de la muestra para determinar textura, relación entre granos, forma y tamaño. Además, es posible la caracterización de especies minerales por su contenido elemental (González Mancera y Noguéz Amaya, 2024). Durante el presente estudio, se utilizó un equipo Hitachi TM-1000 (Figura 3.3) del *Laboratorio de Petrografía y Microtermometría, Instituto de Geofísica, UNAM*, con el que se efectuaron en promedio 30 puntos por lámina para obtener la química semicuantitativa de minerales. El análisis SEM se centró en especímenes de granate, debido a que su caracterización es importante para reconocer la naturaleza cálcica o magnésica del skarn y establecer su clasificación. Adicionalmente, se analizaron granos de minerales metálicos para su identificación.

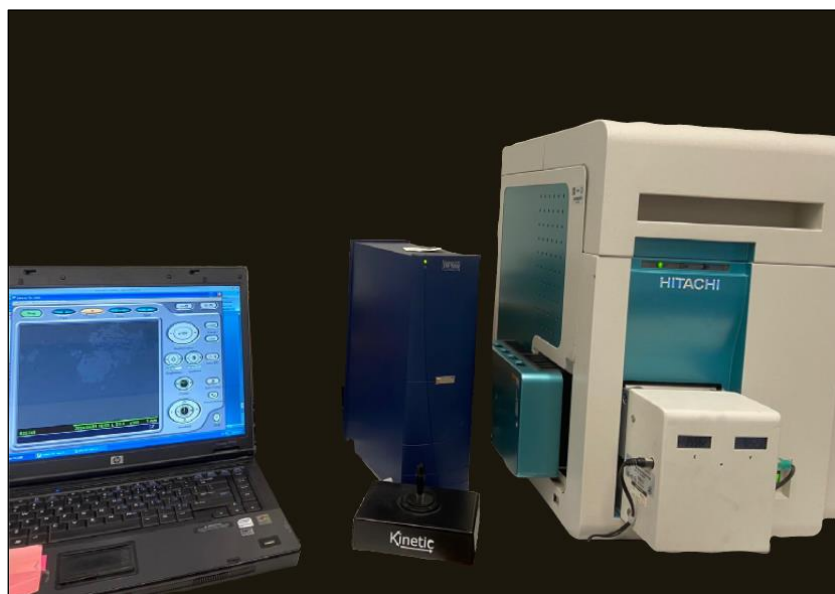


Figura 3.3 Microscopio de Barrido Electrónico Hitachi TM-1000; Laboratorio de Petrografía y Microtermometría, Instituto de Geofísica, UNAM.

3.4 Análisis Infrarrojo de Onda Corta

Este análisis (*Short Wave Infrared*, SWIR) permite identificar minerales a partir de su capacidad de absorción de longitud de onda específica. Esto hace a la técnica especialmente útil en el estudio de minerales de arcilla, carbonatos (1300 – 2500 nm) y sulfatos (Zhou *et al.*, 2022). En el presente estudio, se utilizó un equipo portátil *LabSpecPro* (Figura 3.4) del *Laboratorio de Petrografía y Microtermometría, Instituto de Geofísica, UNAM*. El equipo fue dirigido sobre muestras de mano, realizando un enfoque sobre puntos específicos, incluyendo a la matriz de la muestra. Los materiales que la conforman regularmente no son reconocibles a través de la petrografía, por lo que el análisis SWIR permitió complementar la información obtenida con el microscopio.

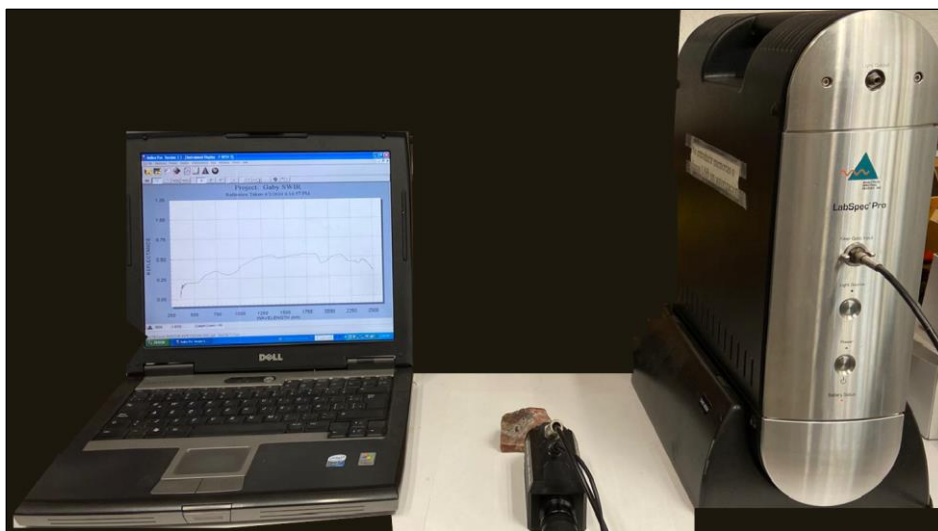


Figura 3.4 Equipo LabSpecPro para análisis SWIR; Laboratorio de Petrografía y Microtermometría, Instituto de Geofísica, UNAM.

3.5 Análisis de Difracción de Rayos X

Este método (*X-Ray Diffraction*, XRD) fue aplicado para el estudio de muestras seleccionadas y sirvió como complemento para la identificación de minerales arcillosos. La interacción de un haz de electrones en un plano hkl de una estructura cristalina específica permite la generación de un haz difractado de acuerdo con la ley de Bragg ($n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta$; n = integrador unitario, λ = longitud de onda, d_{hkl} = distancia interplanar entre planos hkl , θ = ángulo de haz incidente y difractado). Un conjunto de haces difractados representa una “*huella digital*” de una especie mineral. La intensidad de las reflexiones XRD se utiliza para cuantificar la abundancia relativa de los minerales que componen a la muestra (Bunaciu *et al.*, 2015).

La caracterización de la mineralogía se realizó utilizando un método de polvos en el laboratorio comercial *DiffractLab, S.A.* (Monterrey, N.L.). Se utilizó un equipo *Rigaku, modelo Mini Flex 600* (Figura 3.5). Este sistema incluye un tubo de Cu (Radiación $\text{CuK}\alpha$, 1.5418 Å), que fue operado a un voltaje 40 kV y a una corriente 15 mA. Los patrones se obtuvieron efectuando barridos de 2θ de 2 a 60° con una velocidad de barrido de 1°/min. La identificación de las especies minerales se efectuó utilizando el software *PDLX*, el cual comparó las señales obtenidas con los patrones estándar reportados por el JCPDS (*Joint Committee of Powder Diffraction Standards*) del ICDD (*International Centre for Diffraction Data*; <http://www.icdd.com/index.php/pdfsearch/>).

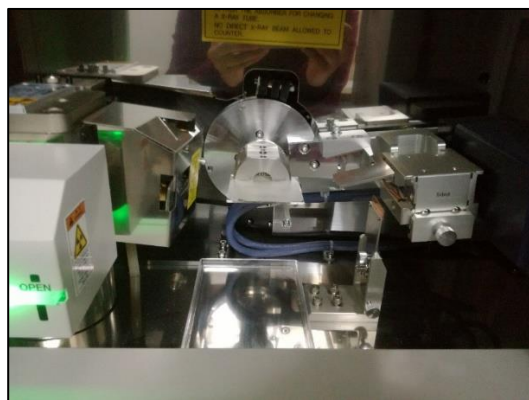


Figura 3.5 (A) Difractómetro Rigaku Mini Flex 600. (B) Detalle del sistema de tubo de rayos-X, porta-muestras y detector. DifractLab, S.A.

3.6 Análisis de microsonda electrónica

La composición química de especies minerales se estableció por microsonda electrónica (Reed, 2005) utilizando un sistema *WDS JEOL JXA-8900R* del *Laboratorio Universitario de Petrología, Instituto de Geofísica, UNAM* (Figura 3.6). En general, los análisis se desarrollaron aplicando un voltaje de 20 keV, una corriente eléctrica de 20 nA, un diámetro de haz de 1 μm y un tiempo de conteo de 30 s. La calibración del sistema se efectuó utilizando minerales de referencia internos y del *Smithsonian Institution*.



Figura 3.6 Microsonda Electrónica WDS JEOL JXA-8900R. Laboratorio Universitario de Petrología, Instituto de Geofísica, UNAM.

3.7 Análisis geoquímico de roca total

La composición química (elementos mayores y traza) de las diferentes litologías involucradas en el desarrollo del skarn cuprífero La Mexicana se estableció a través de la metodología *4Litho* de *Actlabs* (<https://actlabs.com/geochemistry/lithogeochemistry-and-whole-rock-analysis/lithogeochemistry-litho/>; Ancaster, Canadá). La muestra fue mezclada con metaborato de litio ($\text{LiBO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y tetraborato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) y fundida a 600-700°C. El fundido resultante fue disuelto con HNO_3 diluido.

La concentración de los elementos mayores (% peso) se determinó por un método de espectrometría de emisión óptica acoplada inductivamente a plasma (*inductively coupled plasma - optical emission spectrometry*, ICP-OES; Potts, 1987). El análisis se basa en la emisión de señales características de cada elemento desde átomos térmicamente excitados en un ambiente de plasma. Los límites de detección son en general de ~0.01%.

El contenido de los elementos traza (ppm; incluyendo a los lantánidos [*rare earth elements*, REE; La-Lu]) se determinó por espectrometría de masas acoplada inductivamente a plasma (*inductively coupled plasma-mass spectrometry*, ICP-MS; Potts, 1987). En esta técnica los elementos son identificados por un detector en función de su relación carga/masa (e/m) y en donde la intensidad de la señal es directamente proporcional a su concentración. Los límites de detección varían en función del tipo de elemento, aunque de forma general son <2 ppm para los incompatibles y 20-30 ppm para los compatibles. Es importante señalar que para muestras con alta mineralización cuprífera fue necesario realizar un procedimiento especial de fusión con peróxido de sodio seguido del análisis ICP-MS para determinar la composición de Cu.

Para la calibración de los métodos ICP-OES y ICP-MS se utilizaron materiales de referencia geoquímica (basalto BE-N; diabasa W-2b; vidrio NIST 694; concentrado de REE USZ-25-2006).

3.8 Análisis geocronológico

Uno de los aspectos importantes en la elaboración del modelo de mineralización cuprífera La Mexicana fue el establecer las edades de cristalización-enfriamiento del intrusivo y la de inicio de la mineralización.

Para tal efecto, se seleccionó una roca intrusiva de composición intermedia (ARAG23-16), la cual fue procesada en el *Departamento de Geología, CICESE*. Inicialmente, fue triturada hasta alcanzar un tamaño de grava y arena y posteriormente se tamizó para concentrar ~1 kg de material con <250 μm . La muestra fue lavada en una mesa *Holman-Wilfley*, con el propósito de separar gravimétricamente los diferentes grupos de minerales. La fracción de mayor densidad fue tratada con un separador magnético *Frantz* en cuatro etapas, que permitió recuperar concentrados paramagnéticos y diamagnéticos.

A partir del concentrado paramagnético, se separaron especímenes de circón utilizando una solución acuosa de politungstato de sodio ($\delta = 2.85\text{-}2.90 \text{ g/cm}^3$). A partir del concentrado de circón, granos individuales se separaron con ayuda de un microscopio binocular. Los cristales de circón fueron montados en una resina epóxica y, posteriormente, recibieron un pulido. Se obtuvieron imágenes de cátodo-luminiscencia con ayuda de un microscopio electrónico de barrido *JEOL JSM-35C*. El análisis isotópico U-Pb de los circones se efectuó en el *Laboratorio de Estudios Isotópicos, Centro de Geociencias, UNAM*, con un sistema de ablación láser acoplado a un espectrómetro de masas (LA-ICP-MS; Woodhead *et al.*, 2006; Paton *et al.*, 2010; Solari *et al.*, 2010). La datación U-Pb se basa en el decaimiento de los isótopos radioactivos ^{238}U y ^{235}U hacia ^{206}Pb y ^{207}Pb respectivamente dentro de circón (temperatura de cierre $\sim 900^\circ\text{C}$; Cherniak y Watson, 2001) y que al momento de su formación no contiene plomo. Esta estimación se considera la edad de emplazamiento del plutón. El procedimiento de ablación se llevó a cabo con un sistema láser de excímero *Resonetics Resolution M-50* con un diámetro de 23-35 μm y una profundidad de 15-20 μm . La masa evaporada fue recuperada con una mezcla de $\text{He} + \text{N}_2$ y conducida al sistema ICP-MS *Thermo X Serie II* de cuadrupolo. El procesamiento analítico se efectuó con ayuda del software *Geostar 10.13*. Para corregir la deriva instrumental se utilizaron un estándar de vidrio NIST 610 y dos estándares de circón [el 91500 ($1062 \pm 0.4 \text{ Ma}$; Wiendenbeck *et al.*, 1995) y el Plešovice ($337.13 \pm 0.37 \text{ Ma}$; Sláma *et al.*, 2008)]. Los resultados obtenidos fueron corregidos de acuerdo con el método de Petrus y Kamber (2012). La distribución de edad, sus incertidumbres y los diagramas convencionales se construyeron utilizando el software *IsoplotR* (v. 3.8; Vermeesch, 2018). Adicional a la datación U-Pb, la composición en elementos traza, incluyendo REE, P, Ti, Nb, Y y Hf, fue determinada en los circones separados aprovechando el acoplamiento con el sistema ICP-MS *IcapQ*. El estándar de vidrio NIST 612 fue utilizado para recalcular las concentraciones elementales considerando al ^{29}Si como estándar interno.

Por otra parte, los especímenes de biotita férrica fueron datados por un método K-Ar. En este caso, la edad del mineral estaría relacionada a la cantidad de argón ^{40}Ar que se pueda acumular a partir del inicio del decaimiento del potasio ^{40}K . En general, las temperaturas de cierre de micas son de $\sim 400^\circ\text{C}$, por lo que la datación se puede considerar una edad de enfriamiento del plutón. Las relaciones isotópicas de Ar fueron medidas con un espectrómetro *VG5400*. A través de un proceso de fusión con un sistema *Laser Coherent J-Series* y utilizando una solución de *spike* para ^{38}Ar enriquecido artificialmente con una pureza de 99.999 %, se obtuvo el porcentaje de ^{40}Ar radiogénico. La concentración de K se obtuvo mediante fluorescencia de rayos-X (*X-ray fluorescence*, XRF) en un *Tiger S8 (Agilent)*. Además de las concentraciones de K y Ar, los cálculos para la obtención de la edad se realizaron utilizando una calibración a largo plazo de la solución *spike* de ^{38}Ar , las relaciones atmosféricas de Ar según Lee *et al* (2006), los valores de los pesos atómicos avalados por la IUPAC y los valores del standard *HD B1* según Hess y Lippolt (1994). La incertidumbre fue reportada como 1 sigma.

Por otra parte, una mica en contacto con la mineralización de cobre (ARAG23-MI), fue datada por un método K-Ar en el *Instituto de Geología, UNAM*, lo que sería evidencia

del inicio del proceso hidrotermal que genera la mineralización. Se aplicó una técnica de datación por ablación, la cual combina una espectroscopía de rompimiento inducida por láser (*laser-induced breakdown spectroscopy*, LIBS) con un espectrómetro de masas *MM1200B* para el análisis de gases nobles. De esta forma, se efectúa la medición de K y Ar en la misma muestra ([Bermúdez *et al.*, 2024](#)).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Se reporta la información generada durante el trabajo de laboratorio, de acuerdo con el esquema analítico descrito en la sección previa (Tablas 4.1-4.2). Se dio preferencia en la petrografía (PETRO) y la geoquímica (GEOQ) a las muestras de intrusivos y skarns, mientras que las técnicas de caracterización mineralógica (SEM, SWIR, XRD y EMPA) se aplicaron preferentemente en las muestras que mostraban alteración. Los métodos geocronológicos (GEOCRON) se aplicaron con el propósito de inferir la edad de emplazamiento y enfriamiento del magmatismo intermedio y el inicio de la mineralización cuprífera.

Tabla 4.1 Relación de muestras colectadas en el sistema de skarn La Mexicana y esquema de análisis.

Muestra	Coordenadas UTM		Litología	Esquema analítico						GEOCRON	
	E	N		PETRO	SEM	SWIR	XRD	EMPA	GEOQ	K-Ar Micas	U-Pb Circón
ARAG23-12	14R253806	2724230	Caliza oscura						•		
ARAG23-13	14R253750	2724394	Caliza alterada			•			•		
ARAG23-02	14R253332	2724384	Mármol				•				
ARAG23-11	14R253513	2724259	Granitoide	•					•		
ARAG23-15	14R253589	2724177	Granitoide	•					•		
ARAG23-16	14R253589	2724177	Granitoide	•					•	•	•
BMEX-486	14R253759	2724152	Granitoide	•					•		
BMEX-487	14R253759	2724152	Granitoide	•					•		
BMEX-492	14R253759	2724152	Granitoide	•	•				•		
BMEX-482	14R253759	2724152	Endoskarn	•	•			•	•		
ARAG23-10	14R253616	2724244	Endoskarn	•	•		•		•		
ARAG23-17	14R253590	2724177	Endoskarn	•	•	•			•		
D23-1223	14R253759	2724152	Endoskarn	•	•			•			
D23-1195	14R253759	2724152	Endoskarn	•	•			•			
ARAG23-14	14R253589	2724177	Caliza alterada			•	•		•		
D23-1208	14R253759	2724152	Exoskarn	•	•			•			
BMEX-485	14R253759	2724152	Estrato arcilloso	•	•				•		
ARAG23-MI	14R253759	2724152	Mica		•	•	•		•	•	

Tabla 4.2 Relación de muestras colectadas en el sistema de skarn Aranzazú y esquema de análisis.

Muestra	Coordenadas UTM		Litología	Esquema analítico						GEOCRON	
	E	N		PETRO	SEM	SWIR	XRD	EMPA	GEOQ	K-Ar Micas	U-Pb Circón
ARAG23-4	14R250866	274589	Granitoide	•							
B1286-12	14R250867	2724847	Granitoide	•	•						
B1286-02	14R250867	2724847	Granitoide	•	•						
B1286-21	14R250867	2724847	Granitoide	•	•						
B1286-29	14R250867	2724847	Granitoide	•							
B1286-20	14R250867	2724847	Granitoide	•	•						
B1286-31	14R250867	2724847	Granitoide	•							
B1286-23	14R250867	2724847	Granitoide	•	•						
B1286-25	14R250867	2724847	Granitoide	•	•						
ARAG23-7	14R 250934	2725134	jasperoide	•	•	•	•		•		
ARAG23-8	14R 250936	2725132	jasperoide	•			•		•		
ARAG23-9	14R 250955	2725153	jasperoide	•			•		•		

4.1 Análisis mineralógico

4.1.1 Rocas intrusivas

Estas litologías, asociadas al skarn La Mexicana (e.g., BMEX492), se caracterizan por mostrar textura porfídica (Figura 4.1A) o fanerítica (Figura 4.1B). El arreglo mineral incluye fenocristales subhedrales a anhedrales de plagioclasa (zonada o con textura de tamiz; en ocasiones mostrando macla polisintética) + cuarzo (con extinción ondulosa) + feldespato de potasio (en ocasiones mostrando macla Carlsbad), acompañados de fenocristales a microcristales de biotita (en hábito subhedral tabular a hojoso y clivaje) ± titanita (en forma de fibras; Figura 4.1B) + clorita ± clinopiroxeno ± apatito + sericita. En algunos sectores de estas rocas se observa una matriz dominada por cuarzo y feldespato de potasio, con algunos parches de carbonato.

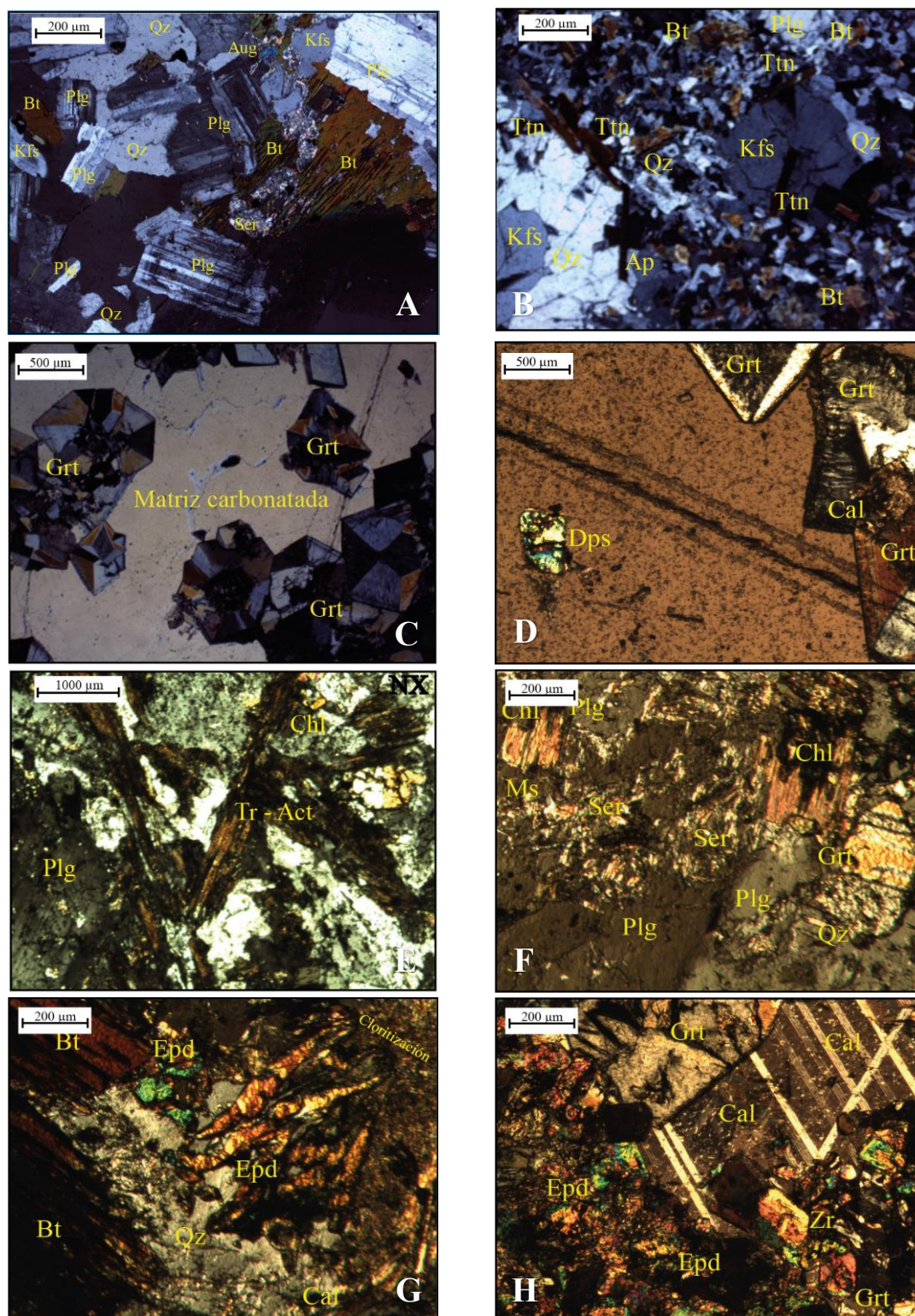


Figura 4.1 Imágenes de petrografía de luz transmitida (NX) para el sistema La Mexicana: (a) granitoide BMEX-492 de textura porfírica que incluye un arreglo de Qz + Plg + Kfs + Bt + Aug + Ser; (b) granitoide BMEX-492 de textura fanerítica con un arreglo similar al observado en la zona porfírica que incluye además Ttn y Ap; (c) y (d) Exoskarn D23-1208 en la que ocurre Grt + Dps ± Cal, embebidos en una matriz de carbonatos; (e) estrato arcilloso BMEX-485 que incluye restos de Plg, en algunos casos cloritizada, y espículas de Tr-Act; (f) exoskarn D23-1208 que incluye Grt + Plg con evidencia de alteración a Chl + Qz + Ms (alteración filica); (g) endoskarn D23-1223 que incluye Epd + Bt + Cal + Qz + Chl embebidos en una matriz calcareo-silícica (alteración subpropilítica); (h) endoskarn D23-1223 que incluye Epd + Cal + restos de Grt + Zrn embebidos en una matriz calcareo-silícica (alteración propilítica). Abreviaturas: Act = actinolita, Aug = augita, Bt = biotita, Cal = calcita, Chl = clorita, Dps = diópsida, Grt = granate, Kfs = feldespato potásico, Ms = muscovita, Plg = plagioclasa, Qz = cuarzo, Ser = sericita, Tr = tremolita, Zrn = circón.

De acuerdo con la clasificación QAPF (Streckeisen, 1976; Figura 4.2), la composición dominante del magmatismo es de cuarzo-monzodiorita, acompañada de granodiorita. Las composiciones son comparables a las reportadas para parte del magmatismo en el Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil (DMCOM; González-Guzmán et al., 2023), que también incluye cuarzo-monzonita y granito. La inspección de las láminas de las rocas intrusivas bajo el microscopio de luz reflejada ha revelado la presencia de pequeños granos o espículas dispersos de óxidos de hierro y pirita.

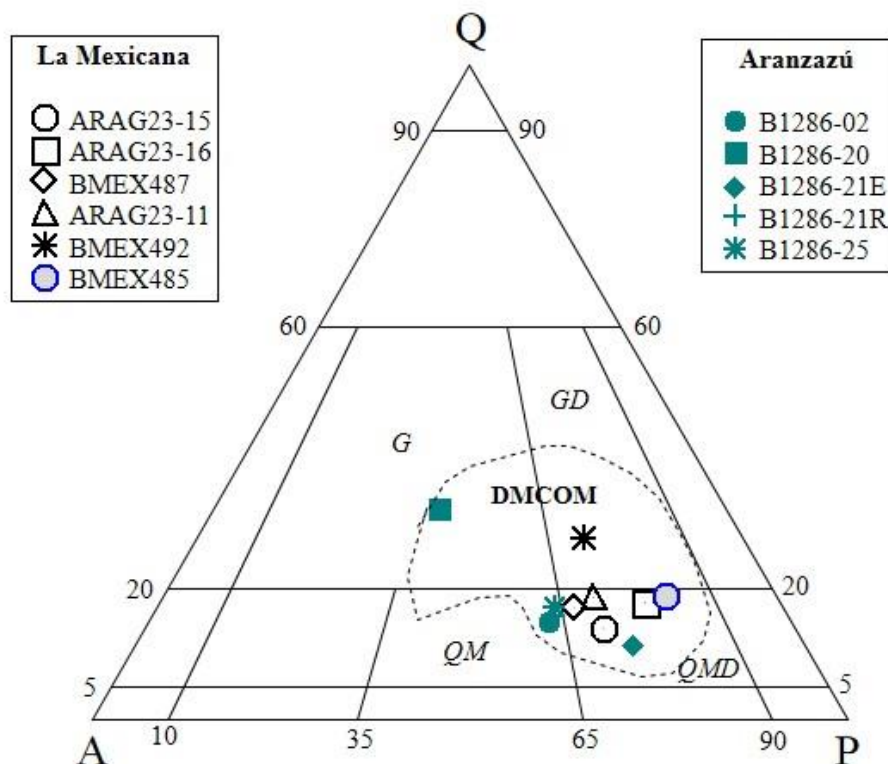


Figura 4.2 Diagrama QAP (Streckeisen, 1976) para rocas intrusivas de los sistemas de skarn La Mexicana y Aranzazú. En el gráfico se ha incluido a la roca plutónica alterada BMEX485. La línea discontinua representa el campo composicional que cubren las rocas intrusivas del Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil (DMCOM). Abreviaturas de litologías: G = granito, GD = granodiorita, QM = cuarzo-monzonita y QMD = cuarzo-monzodiorita.

4.1.2 Asociación mineral progradada

Esta etapa se caracteriza por la generación de granate en forma de prismas idiomorfos zonados que ocurren como acumulaciones masivas, vetillas y/o parches sobre una matriz de carbonato (muestra D-1208; Figura 4.1C). Los granates incluidos en estas muestras se caracterizan por un intervalo composicional de $An_{41-70}Gr_{55-30}$ (Tabla 4.3; Figura 4.3), asociados a un skarn de Cu-Fe (Meinert, 2020).

Tabla 4.3 Composición química y cálculo de fórmula para granate en el sistema La Mexicana

Muestra	Endoskarn BMEX482									
Punto	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10
SiO ₂	35.81	35.58	35.72	35.35	35.32	35.46	35.78	35.62	35.47	35.45
TiO ₂	1.50	1.45	1.46	1.47	1.46	1.55	1.49	1.46	1.55	1.47
Al ₂ O ₃	7.84	7.23	7.08	7.25	6.88	7.54	7.44	6.99	7.56	7.22
Cr ₂ O ₃										
FeO	17.94	18.54	19.31	18.63	19.88	19.31	18.0	19.68	19.31	18.93
MnO	0.29	0.28	0.23	0.29	0.26	0.27	0.28	0.26	0.27	0.29
MgO	0.04	0.02	0.04	0.04	0.04	0.03	0.06	0.04	0.03	0.04
CaO	35.73	35.58	35.72	35.56	35.61	35.70	35.77	35.62	35.70	35.57
Suma	99.15	98.69	99.55	98.59	99.45	99.86	98.82	99.66	99.89	98.96
Si	2.872	2.872	2.862	2.857	2.837	2.832	2.881	2.854	2.831	2.856
Ti	0.090	0.088	0.088	0.089	0.088	0.093	0.090	0.088	0.093	0.089
Al	0.741	0.688	0.668	0.691	0.651	0.710	0.706	0.660	0.711	0.686
Cr										
Fe	1.203	1.251	1.294	1.259	1.336	1.290	1.212	1.319	1.289	1.275
Mn	0.019	0.019	0.016	0.020	0.018	0.018	0.019	0.018	0.018	0.020
Mg	0.005	0.003	0.005	0.004	0.004	0.004	0.007	0.004	0.004	0.004
Ca	3.070	3.078	3.067	3.080	3.065	3.054	3.085	3.058	3.054	3.070
%An	63.9	66.7	68.0	67.4	70.0	67.0	65.4	68.7	67.0	67.5
%Gr	35.5	33.0	31.8	32.6	30.0	33.0	34.1	31.1	33.0	32.5
%Pyr	0.6	0.3	0.2				0.5	0.2		
Muestra	Endoskarn BMEX482									
Punto	2.1	2.2	2.3	2.4	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3
SiO ₂	37.16	36.29	36.04	36.59	36.39	36.29	35.55	35.33	34.63	36.38
TiO ₂	1.47	1.19	1.17	1.30	1.09	1.11	1.01	1.30	1.47	1.00
Al ₂ O ₃	7.82	7.52	7.48	8.36	9.40	9.51	12.00	12.38	12.13	13.74
Cr ₂ O ₃										
FeO	17.9	18.28	18.12	17.96	16.99	16.99	16.52	15.44	15.65	15.94
MnO	0.26	0.30	0.20	0.33	0.32	0.32	0.36	0.27	0.21	0.48
MgO	0.05	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.04	0.04	0.02
CaO	34.97	34.53	34.32	34.53	33.98	33.92	33.55	32.93	32.84	34.34
Suma	99.64	98.12	97.36	99.10	98.18	98.15	99.01	97.68	96.97	101.90
Si	2.966	2.944	2.946	2.934	2.935	2.928	2.828	2.845	2.811	2.802
Ti	0.88	0.072	0.072	0.079	0.066	0.068	0.060	0.079	0.090	0.058
Al	0.736	0.719	0.720	0.791	0.893	0.904	1.125	1.174	1.161	1.247
Cr										
Fe	1.115	1.241	1.239	1.205	1.145	1.147	1.099	1.039	1.062	1.027
Mn	0.018	0.020	0.014	0.023	0.022	0.022	0.024	0.18	0.014	0.032
Mg	0.006	0.002	0.003	0.003	0.003	0.001	0.002	0.005	0.005	0.003
Ca	2.991	3.002	3.006	2.967	2.936	2.932	2.860	2.840	2.856	2.833
%An	57.1	60.9	60.8	56.8	52.4	52.1	47.6	42.6	44.6	43.8
%Gr	36.0	35.1	35.2	37.9	42.3	42.6	48.8	51.1	50.0	52.8
%Pyr	6.9	4.0	4.0	5.3	5.3	5.3	3.6	6.3	5.4	3.4
Muestra	Endoskarn BMEX482									
Punto	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	6.10	6.11	1.1	1.2
SiO ₂	35.38	34.84	35.07	35.67	36.48	36.53	36.81	36.68	34.91	36.18
TiO ₂	1.40	1.11	1.31	1.18	1.13	1.14	1.08	0.97		
Al ₂ O ₃	12.22	12.90	12.47	12.11	12.27	12.50	14.24	9.47	9.31	11.75
Cr ₂ O ₃			0.01			0.01				
FeO	15.62	14.48	14.43	14.00	14.88	13.26	12.14	12.98	22.37	18.73
MnO	0.27	0.24	0.25	0.30	0.31	0.35	0.46	0.44	0.29	0.39
MgO	0.04	0.03	0.02	0.03	0.04	0.01	0.02	0.01	0.04	0.02
CaO	34.39	33.64	34.03	34.32	34.34	34.64	35.01	34.95	30.72	31.26
Suma	99.31	97.24	97.59	97.61	99.45	98.44	99.76	95.50	97.64	98.31
Si	2.802	2.807	2.819	2.865	2.879	2.904	2.873	3.017	2.856	2.908
Ti	0.083	0.067	0.079	0.071	0.067	0.068	0.063	0.060		
Al	1.141	1.225	1.181	1.147	1.142	1.172	1.310	0.918	0.898	1.113
Cr			0.001			0.001				
Fe	1.035	0.976	0.970	0.941	0.983	0.880	0.793	0.893	1.520	1.259
Mn	0.018	0.017	0.017	0.020	0.021	0.023	0.030	0.030	0.020	0.026
Mg	0.004	0.004	0.003	0.004	0.005	0.001	0.002	0.002	0.005	0.003
Ca	2.918	2.905	2.931	2.953	2.904	2.950	2.928	3.080	2.692	2.692
%An	47.6	44.7	45.3	44.9	43.8	41.3	37.2	48.7	57.3	45.4
%Gr	49.9	53.4	52.3	52.4	51.8	54.7	59.6	48.2	37.0	47.2
%Pyr	2.5	1.9	2.4	2.7	4.4	4.0	3.2	3.1	5.7	7.4
Muestra	Skarn D23-1223									

Tabla 4.3 (Cont.)

Muestra	Skarn D23-1223									
Punto	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
SiO ₂	35.92	34.99	35.11	35.65	34.85	35.43	36.23	35.66	36.38	34.96
TiO ₂		0.01	0.01		0.02		0.02		0.02	
Al ₂ O ₃	10.13	10.22	9.19	9.87	9.09	15.44	18.16	15.08	18.32	12.14
Cr ₂ O ₃		0.01	0.01							
FeO	21.77	21.99	24.73	23.80	24.91	13.65	9.19	14.47	9.15	18.32
MnO	0.30	0.34	0.25	0.21	0.20	0.70	0.71	0.39	0.71	0.43
MgO	0.01	0.05	0.04	0.03	0.01	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02
CaO	30.65	31.32	30.89	31.14	31.11	32.03	32.81	32.19	32.54	31.71
Suma	98.78	98.93	100.23	100.71	100.19	97.27	97.16	97.82	97.15	97.59
Si	2.897	2.817	2.809	2.830	2.790	2.835	2.866	2.842	2.877	2.826
Ti					0.001		0.001		0.001	
Al	0.963	0.970	0.866	0.924	0.858	1.456	1.693	1.416	1.707	1.157
Cr		0.001	0.001							
Fe	1.469	1.481	1.654	1.580	1.667	0.914	0.608	0.964	0.605	1.238
Mn	0.020	0.023	0.017	0.014	0.013	0.047	0.048	0.026	0.048	0.030
Mg	0.001	0.005	0.005	0.003	0.001	0.003	0.005	0.004	0.005	0.002
Ca	2.649	2.702	2.648	2.648	2.669	2.745	2.780	2.748	2.757	2.747
%An	51.5	56.5	59.9	56.6	61.6	36.4	24.5	37.6	22.9	49.3
%Gr	40.0	39.3	34.2	37.0	33.9	60.5	72.4	59.1	72.9	47.9
%Prp	8.5	4.2	5.9	6.4	4.5	3.1	3.1	3.3	4.2	2.8

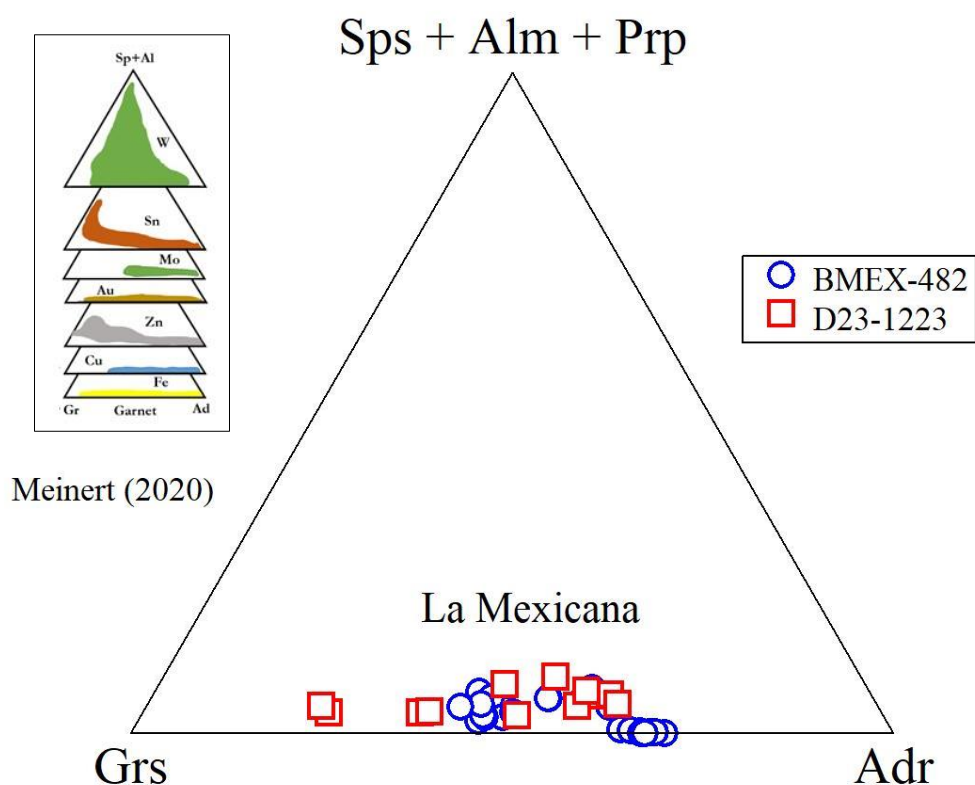


Figura 4.3 Diagrama de clasificación de granates del sistema La Mexicana en función de sus miembros finales: Adr = andradita, Alm = almandino, Grs = grosularia, Prp = piropo y Sps = espesartina. En la parte superior izquierda se presenta el tipo de depósito metálico esperado de acuerdo con la composición de granate (Meinert, 2020).

Otros minerales identificados incluyen: (a) augita con colores de birrefringencia intensos (Figura 4.1D), (b) vesuvianita grisácea en forma de granos pequeños prolongados, (c) cristales euhedrales tubulares y alargados de titanita en color marrón y con alto relieve y (d) tremolita-actinolita (Figura 4.1E) en forma de fibras de color pardo y en algunas zonas verde pálido. La titanita se caracteriza por mostrar

composiciones con relaciones Al:Fe de 1:1 a 1:2 (Tabla 4.4), que son típicas de ambiente magmático o hidrotermal (Figura 4.4).

Tabla 4.4 Composición química y cálculo de fórmula estructural para titanita del sistema de skarn La Mexicana (endoskarn BMEX-482).

Punto	5.8	5.9	5.10	5.11	5.12	5.13
SiO ₂	30.220	30.079	30.939	30.692	30.459	30.501
TiO ₂	34.177	34.232	33.901	33.224	33.209	33.441
Al ₂ O ₃	2.617	2.300	2.340	2.613	2.911	2.870
FeO	2.569	2.737	2.136	2.124	2.231	2.810
MnO	0.007	0.008	0.046	0.056	0.067	0.059
MgO	0.411	0.034	0.023	0.022	0.031	0.039
CaO	28.717	28.851	28.551	27.957	28.009	28.231
Na ₂ O	0.008	0.006	0.168	0.063	0.099	0.078
K ₂ O	0.008	0.009	0.011	0.022	0.031	0.045
La ₂ O ₃	0.511	0.517	0.500	0.541	0.565	0.549
Ce ₂ O ₃	0.203	0.213	0.204	0.203	0.212	0.233
F	0.003	0.008	0.010	0.024	0.029	0.027
Sum	99.451	98.994	98.829	97.541	97.853	98.883
Si	1.004	1.006	1.031	1.034	1.025	1.019
Ti	0.855	0.862	0.850	0.842	0.840	0.840
Al	0.103	0.091	0.092	0.104	0.115	0.113
Fe	0.071	0.077	0.060	0.060	0.063	0.078
La	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007	0.007
Ce	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003	0.003
Ca	1.023	1.034	1.019	1.009	1.009	1.010
Mg	0.020	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002
Mn			0.001	0.002	0.002	0.002
Na	0.001		0.011	0.004	0.006	0.005
K				0.001	0.001	0.002
F		0.001	0.001	0.003	0.003	0.003

Punto	5.14	5.15	5.16	5.17	5.18	5.19
SiO ₂	30.511	30.489	30.491	30.788	30.810	30.799
TiO ₂	33.204	33.272	33.491	33.099	33.089	33.087
Al ₂ O ₃	2.790	2.990	2.891	2.799	2.901	2.871
FeO	2.273	2.199	2.201	2.301	2.400	2.210
MnO	0.063	0.066	0.071	0.059	0.045	0.051
MgO	0.034	0.038	0.037	0.041	0.042	0.049
CaO	28.341	28.119	28.112	28.239	28.201	28.356
Na ₂ O	0.079	0.089	0.079	0.092	0.091	0.088
K ₂ O	0.029	0.031	0.028	0.021	0.023	0.024
La ₂ O ₃	0.561	0.589	0.599	0.529	0.560	0.569
Ce ₂ O ₃	0.245	0.239	0.288	0.239	0.301	0.299
F	0.027	0.200	0.020	0.019	0.029	0.031
Sum	98.157	98.321	98.308	98.226	98.492	98.434
Si	1.024	1.019	1.022	1.032	1.030	1.030
Ti	0.839	0.837	0.844	0.834	0.832	0.833
Al	0.110	0.118	0.114	0.111	0.114	0.113
Fe	0.064	0.061	0.062	0.064	0.067	0.062
La	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Ce	0.003	0.003	0.004	0.003	0.004	0.004
Ca	1.020	1.007	1.009	1.014	1.010	1.016
Mg	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Mn	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001
Na	0.005	0.006	0.005	0.006	0.006	0.006
K	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
F	0.003	0.021	0.002	0.002	0.003	0.003

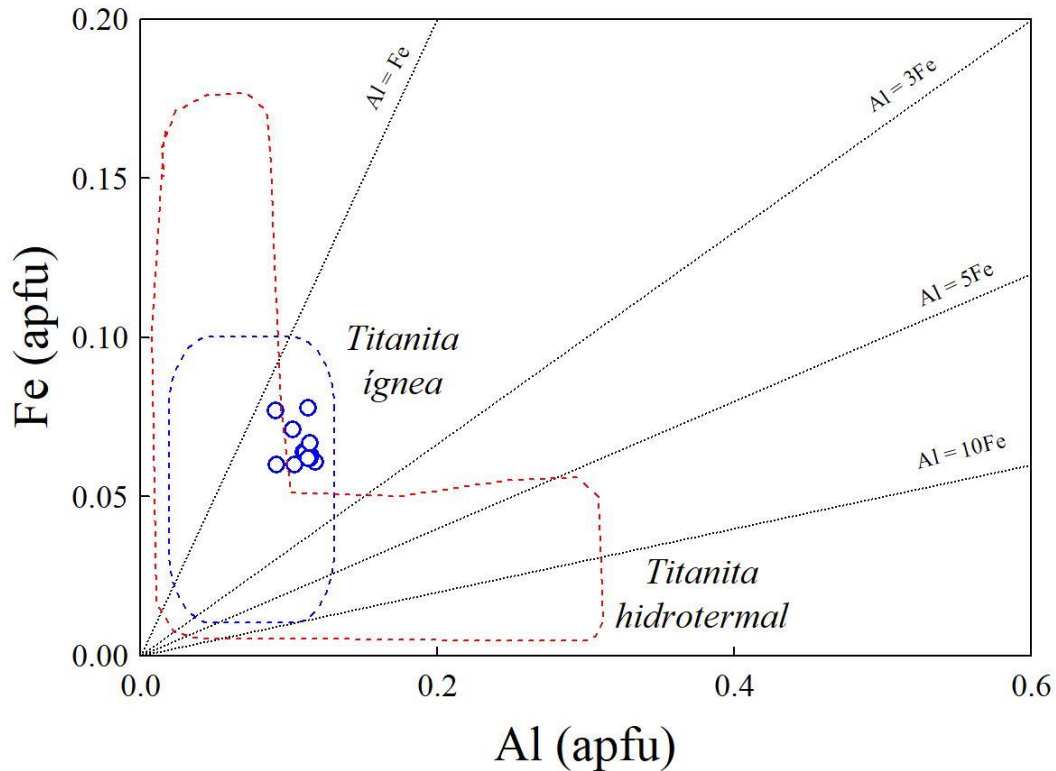


Figura 4.4 Diagrama atómico Fe-Al (Kowallis *et al.*, 2022) para las titanitas del skarn La Mexicana. Se incluyen los campos donde se distribuye el mineral con un origen ígneo o hidrotermal (skarn).

Por otra parte, el análisis petrográfico de luz reflejada confirmó la presencia de granate parcialmente reemplazado por hematita (Figura 4.5A), así como cristales subhedrales de este último mineral (Figura 4.5B) y espículas de covelina (Figura 4.5C). Adicionalmente, se han observado granos de calcopirita diseminada en micropartículas de tonalidad amarilla (Figura 4.5D).

Adicionalmente, se efectuó el estudio mineralógico de las muestras ARAG23-13 y ARAG23-14, que corresponden a calizas alteradas. El análisis SWIR reveló las siguientes señales de reflectancia (Figura 4.6A-B): (a) hierro (Fe^{+2} , Fe^{+3}) en posible asociación a actinolita o tremolita; (b) hidroxilo (OH), agua (H_2O), hidroxilo ligado a Al o Mg (Al-OH, Mg-OH) como resultado de la presencia de clorita, montmorillonita, actinolita, tremolita y yeso; (c) carbonato (CO_3) asociado a calcita y (d) sulfato (SO_4) asociada a yeso.

El análisis de difracción de rayos-X para la muestra ARAG23-14 (Figura 4.7) arroja un arreglo de minerales que incluyen cuarzo (Qz) + yeso (Gy) + albita (Ab) + montmorillonita (Mn) + microclina (Mi). De acuerdo con estas observaciones, estas muestras se podrían interpretar como calizas parcialmente marmolizadas, las cuales se podrían considerar como parte de la etapa progradada del sistema skarn.

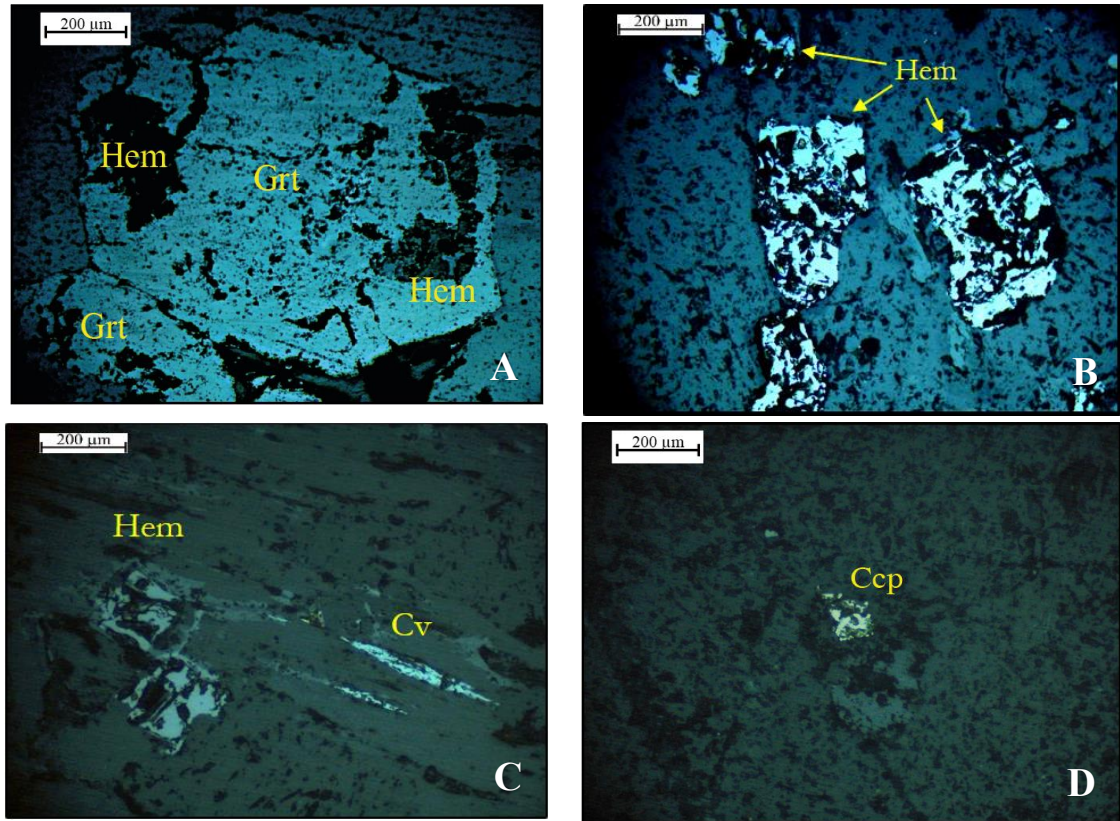


Figura 4.5 Imágenes de petrografía de luz reflejada (NX) para el sistema La Mexicana – etapa progradada: (a) Hem sobre granos de Grt en muestra de barreno D23-1223; (b) granos de Hem primaria subhedral barreno D23-1208; (c) fragmentos de Hem subhedral primaria acompañada de espículas de covelina en barreno D23-1195; (d) grano de Cpy anhedral de color crema, incluido en la muestra D23-1208. Abreviaturas: Ccp = calcopirita, Cv = covelina, Grt = granate, Hem = hematita, Mgt = magnetita.

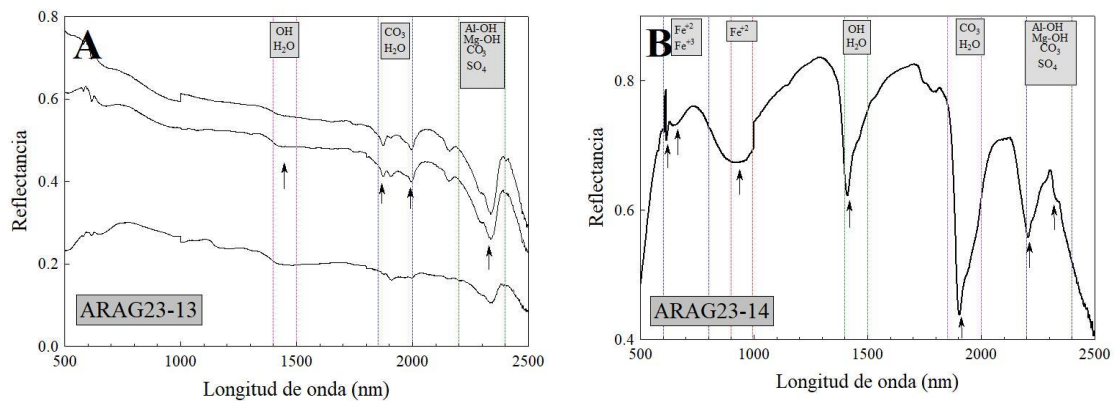


Figura 4.6 Patrones de infrarrojo de onda corta (SWIR, short-wave infrared) para calizas alteradas (A) ARAG23-13 y (B) ARAG23-14. En cada patrón se incluye la posición de señales asociadas a especies de hierro (Fe^{+2} , Fe^{+3}), agua (H_2O), hidroxilo (OH), hidroxilo unido a Al o Mg (Al-OH , Mg-OH), carbonatos (CO_3) y sulfatos (SO_4) (Clark et al., 1990).

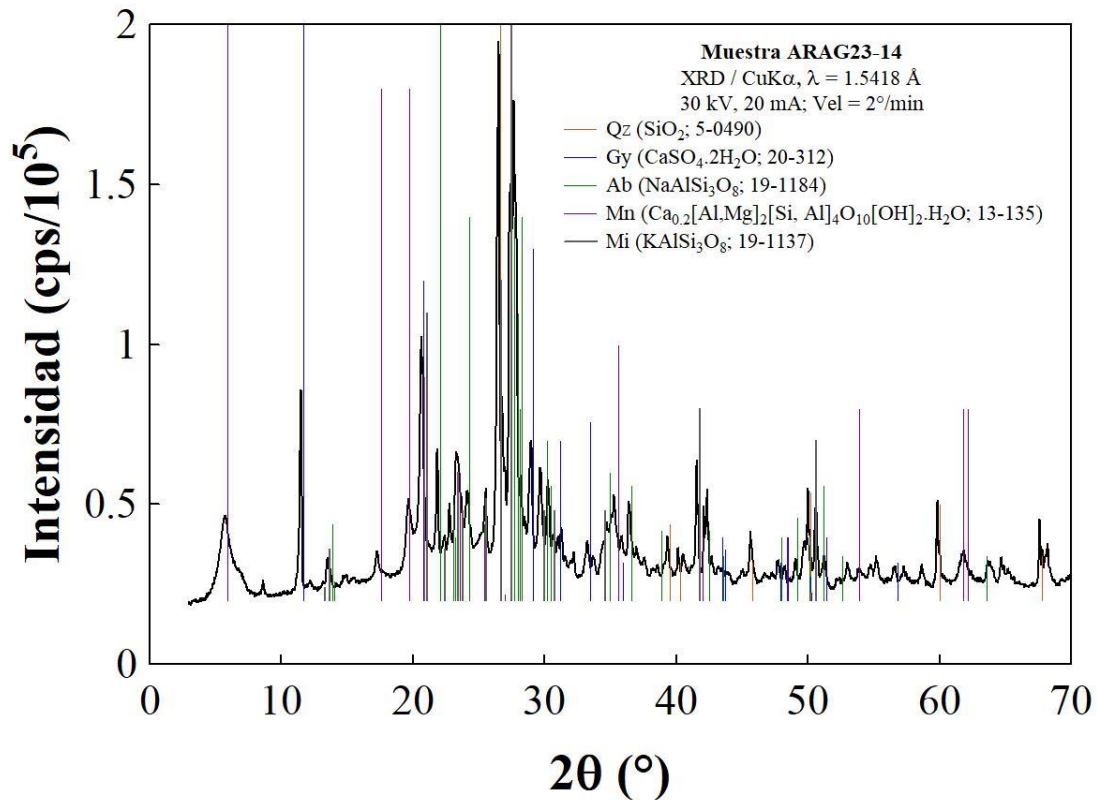


Figura 4.7 Espectro de XRD para la muestra ARAG23-14, la cual incluye un arreglo de cuarzo (Qz) + yeso (Gy) + albita (Ab) + montmorillonita (Mn) + microclina (Mi). Se incluyen los patrones JCPDS utilizados para efectuar la comparación.

4.1.3 Asociación mineral retrograda

Esta etapa se encuentra marcada por el desarrollo de minerales como epidota en forma de prismas alargados de color verdoso pálido, con relieve alto y en algunas zonas maclado de forma lamelar (**Fig 4.1G**). La composición química representativa de epidota y su clasificación se reportan en la **Tabla 4.5** y la **Figura 4.8**. Además se observan escasos cristales de granate, comúnmente reemplazados por calcita (**Figura 4.1H**).

En algunas zonas también se aprecia a biotita y plagioclasa alteradas a clorita en forma de láminas de color verde claro con extinción recta y bajo relieve. El análisis de microsonda electrónica (**Tabla 4.6**) indica que la clorita es de tipo trioctahédrica relativamente cercana a la composición del clinocloro (**Figura 4.9**).

Tabla 4.5 Composición química y cálculo de fórmula para epidota en el sistema La Mexicana (skarn D23-1223).

Punto	2.22	2.23	2.24	2.25	2.26	2.27	3.1	3.2	3.4	3.5
SiO ₂	34.223	34.099	34.011	34.021	34.110	34.104	34.315	34.038	34.511	34.291
TiO ₂	0.012	0.010	0.019	0.020	0.017	0.014	0.015		0.011	
Al ₂ O ₃	9.561	9.441	9.321	9.291	9.391	9.991	10.662	10.557	9.445	9.500
FeO	29.459	29.501	28.999	28.771	29.099	28.939	29.787	30.509	32.124	32.156
MnO	0.454	0.309	0.389	0.401	0.399	0.378	0.342	0.450	0.397	0.359
MgO	0.039	0.044	0.038	0.034	0.029	0.031	0.044	0.012	0.036	0.005
CaO	24.649	23.894	23.601	23.841	23.405	23.312	21.649	21.894	21.700	21.605
Na ₂ O	0.011	0.023	0.018	0.016	0.018	0.023		0.018	0.010	
K ₂ O		0.002				0.003		0.002		
Suma	98.408	97.323	96.396	96.395	96.468	96.795	96.814	97.480	98.234	97.916
Si	2.867	2.883	2.900	2.902	2.904	2.889	2.890	2.858	2.882	2.873
Ti	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001		0.001	
Al	0.944	0.941	0.937	0.934	0.942	0.997	1.058	1.045	0.930	0.938
Fe	2.064	2.086	2.068	2.052	2.072	2.050	2.098	2.142	2.244	2.253
Mn	0.032	0.022	0.028	0.029	0.029	0.027	0.024	0.032	0.028	0.025
Mg	0.005	0.006	0.005	0.004	0.004	0.004	0.006	0.002	0.004	0.001
Ca	2.213	2.164	2.156	2.179	2.135	2.116	1.954	1.969	1.942	1.940
Na	0.002	0.004	0.003	0.003	0.003	0.004		0.003	0.002	
K										

Punto	3.6	6.15	6.16	6.17	6.18	6.19	6.20	7.1	7.2	7.3
SiO ₂	34.436	34.079	34.056	34.101	34.231	34.199	34.200	34.505	34.511	34.523
TiO ₂	0.014	0.012	0.013	0.014	0.019	0.020	0.021	0.121	0.123	0.118
Al ₂ O ₃	9.879	9.450	9.390	9.331	9.401	9.591	9.091	14.150	14.191	14.183
FeO	32.296	32.101	32.101	32.088	32.156	32.099	32.011	25.579	25.589	25.581
MnO	0.493	0.501	0.499	0.478	0.432	0.431	0.359	0.093	0.099	0.007
MgO	0.02	0.009	0.008	0.004	0.004	0.100	0.011	0.001	0.002	
CaO	21.712	21.720	21.840	21.909	21.888	21.990	22.069	23.246	23.251	2.057
Na ₂ O	0.017	0.030	0.019	0.023	0.027	0.033	0.022	0.001		
K ₂ O	0.003		0.003	0.001	0.001	0.002	0.001		0.001	
Suma	98.852	97.902	97.929	97.949	98.159	98.465	97.785	97.696	97.767	97.757
Si	2.859	2.861	2.860	2.863	2.866	2.854	2.876	2.851	2.849	2.851
Ti	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.008	0.008	
Al	0.967	0.935	0.929	0.923	0.928	0.943	0.901	1.378	1.381	1.380
Fe	2.242	2.254	2.254	2.253	2.252	2.241	2.251	1.768	1.767	1.766
Mn	0.035	0.036	0.035	0.034	0.031	0.030	0.026	0.007	0.007	0.007
Mg		0.001	0.001	0.001		0.012	0.001			
Ca	1.931	1.954	1.965	1.971	1.964	1.967	1.988	2.058	2.057	2.057
Na	0.003	0.005	0.003	0.004	0.004	0.005	0.004			
K										

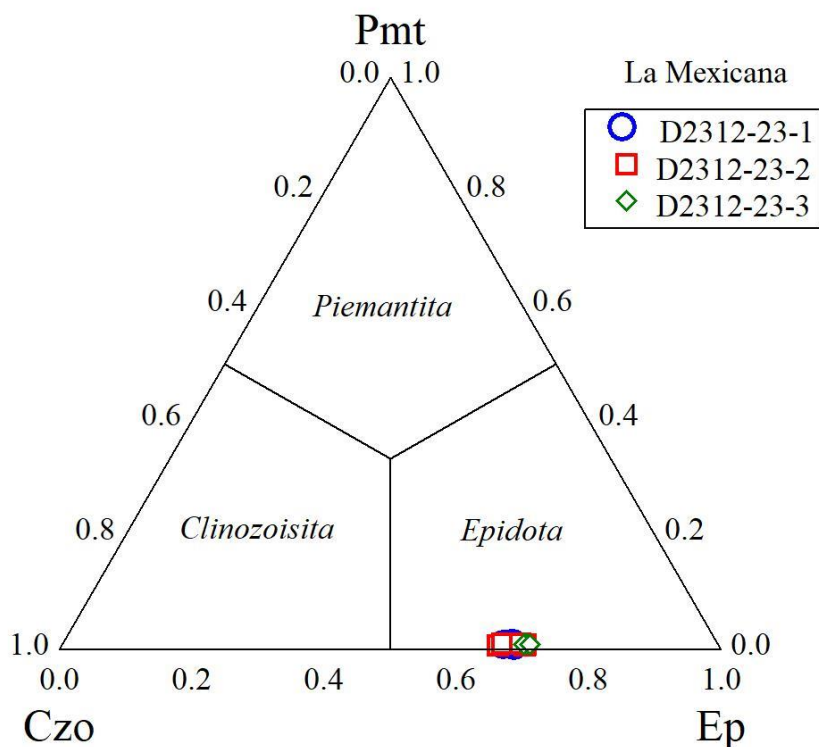


Figura 4.8 Diagrama de clasificación de epidotas del sistema La Mexicana en función de sus miembros finales: Czo = clinzoisita, Ep = epidota y Pmt = piemantita.

Tabla 4.6 Composición química y cálculo de fórmula estructural para clorita del sistema de skarn La Mexicana (skarn BMEX-482). Temperatura calculada utilizando el geotermómetro de Cathelineau y Nieva (1995).

Punto	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10
SiO ₂	31.544	31.458	31.483	32.633	32.485	32.350	31.991	32.066	32.110	31.688
Al ₂ O ₃	17.438	17.633	17.842	17.91	18.355	17.198	17.344	17.230	17.119	17.489
TiO ₂		0.009		0.002	0.020	0.012	0.009	0.011	0.009	0.012
CaO	0.222	0.221	0.222	0.165	0.232	0.193	0.202	0.201	0.199	0.189
Na ₂ O	0.046	0.037	0.073	0.052	0.096	0.076	0.055	0.066	0.057	0.051
K ₂ O	0.091	0.047	0.120	0.057	0.136	0.090	0.100	0.111	0.099	0.097
MnO	0.071	0.085	0.085	0.075	0.126	0.129	0.101	0.099	0.099	0.111
FeO	15.162	15.205	15.523	14.916	14.864	14.799	15.799	15.330	15.399	15.431
MgO	18.982	19.94	18.743	20.860	18.678	19.796	18.941	19.005	19.115	19.105
Cl	0.061	0.014	0.043	0.071	0.062	0.070	0.055	0.037	0.040	0.040
F	0.022	0.011	0.018	0.023	0.020	0.025	0.021	0.021	0.017	0.018
H ₂ O	16.361	15.340	15.848	13.236	14.296	15.262	15.382	15.823	15.737	15.769
Si	3.26	3.22	3.24	3.24	3.29	3.29	3.28	3.30	3.30	3.26
Al ^{IV}	0.74	0.78	0.76	0.76	0.71	0.71	0.72	0.70	0.70	0.74
Al ^{VI}	1.39	1.34	1.41	1.34	1.48	1.36	1.38	1.38	1.37	1.38
Ti										
Ca	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
K	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe ⁺²	1.31	1.30	1.34	1.24	1.26	1.26	1.35	1.32	1.32	1.33
Mg	2.93	3.04	2.88	3.09	2.82	3.01	2.90	2.91	2.93	2.93
Cl	0.01		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
F	0.01		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
OH ⁻	7.98	7.99	7.99	7.98	7.98	7.98	7.98	7.99	7.99	7.99
T(°C)	239	245	238	244	231	239	239	237	238	240

Tabla 4.6 (Cont.)

Punto	4.11	4.12	4.13	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	5.10
SiO ₂	31.889	31.995	31.999	31.395	31.551	31.992	31.947	31.540	31.780	31.891
Al ₂ O ₃	17.651	17.553	17.631	17.788	17.862	18.666	17.907	17.436	17.532	17.488
TiO ₂	0.008	0.009	0.011	0.095	0.008			0.005	0.005	0.009
CaO	0.191	0.204	0.211	0.127	0.196	0.388	0.113	0.231	0.287	0.256
Na ₂ O	0.040	0.060	0.039	0.061	0.038	0.157	0.011	0.056	0.067	0.077
K ₂ O	0.102	0.111	0.089	0.029	0.026	0.126	0.103	0.133	0.121	0.129
MnO	0.104	0.109	0.129	0.461	0.310	0.300	0.564	0.421	0.411	0.433
FeO	15.201	15.303	15.441	14.332	14.741	14.211	14.342	15.123	15.231	15.321
MgO	19.905	19.107	18.995	19.904	19.912	19.973	19.935	19.399	19.456	19.503
Cl	0.051	0.048	0.069	0.045	0.041	0.039	0.048	0.089	0.099	0.092
F	0.019	0.019	0.025	0.008	0.009	0.008	0.037	0.045	0.047	0.049
H ₂ O	14.839	15.482	15.361	15.755	15.306	14.140	14.993	15.522	14.964	14.752
Si	3.24	3.28	3.27	3.22	3.22	3.21	3.24	3.24	3.25	3.25
Al ^{IV}	0.76	0.72	0.73	0.78	0.78	0.79	0.76	0.76	0.75	0.75
Al ^{VI}	1.35	1.39	1.40	1.36	1.37	1.42	1.38	1.35	1.36	1.35
Ti				0.01						
Ca	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.04	0.01	0.03	0.03	0.03
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03		0.01	0.01	0.02
K	0.01	0.01	0.01			0.02	0.01	0.02	0.02	0.02
Mn	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04
Fe ⁺²	1.29	1.31	1.32	1.23	1.26	1.19	1.22	1.30	1.30	1.31
Mg	3.02	2.92	2.90	3.04	3.03	2.99	3.02	2.97	2.96	2.96
Cl	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
F	0.01	0.01	0.01				0.01	0.01	0.02	0.02
OH ⁻	7.99	7.99	7.98	7.99	7.99	7.99	7.98	7.97	7.97	7.97
T(°C)	243	238	238	243	244	237	242	242	241	241

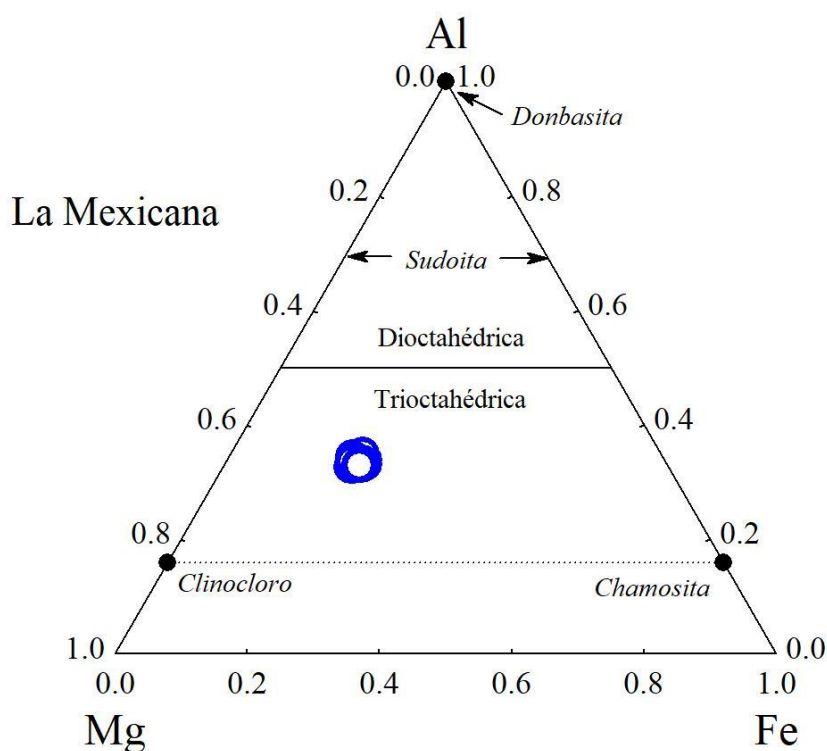


Figura 4.9 Diagrama de clasificación de clorita del sistema La Mexicana en función de su relación atómica de Mg, Fe y Al.

La mena representativa de la etapa retrograda corresponde a calcopirita euhedral de color amarillo y con un brillo metálico característico, la cual es acompañada por hematita y magnetita (Figura 4.10A-B). Cabe destacar que la calcopirita presenta acumulaciones de As, Au y Pb que son superiores a las reportadas como máximo para este mineral en sistemas de skarn (Figura 4.11; George et al., 2018).

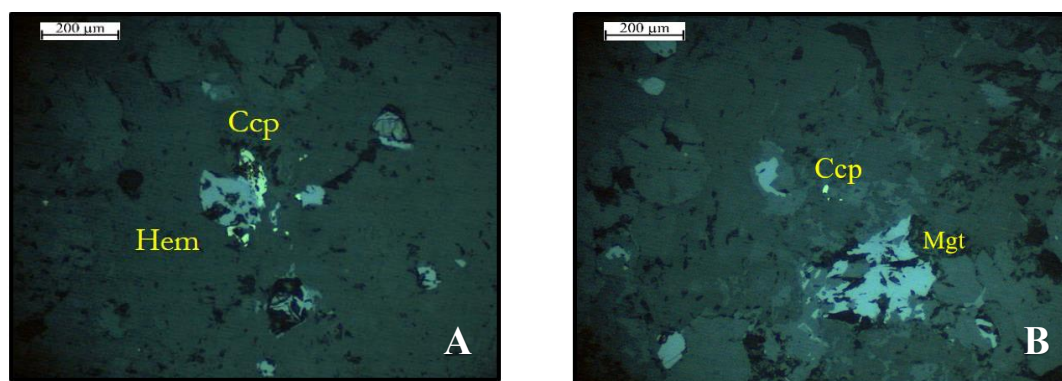


Figura 4.10 Imágenes de petrografía de luz reflejada (NX) para el sistema La Mexicana – Etapa retrograda: (a) grano de Hem secundaria sobre Cpy de color crema, dentro de una matriz de carbonatos barreno D23-1195; (b) granos de Cpy primaria en color crema acompañado de Mgt primaria barreno D23-1208. Abreviaturas: Ccp = calcopirita, Cv = covelina, Grt = granate, Hem = hematita, Mgt = magnetita.

Tabla 4.7 Composición química de calcopirita del sistema de skarn La Mexicana (endoskarn BMEX-482).

Punto	5.20	5.21	5.22	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3
S	34.701	34.723	34.718	34.783	34.830	34.811	34.776	34.781	34.801	34.833
Cu	34.26	34.243	34.209	34.393	34.211	34.378	34.278	34.299	34.309	34.260
Co	0.002	0.001	0.001	0.026	0.027	0.029	0.024	0.021	0.023	0.021
Zn	0.069	0.071	0.077	0.059	0.041	0.050	0.044	0.043	0.051	0.040
Bi	0.003	0.002	0.002	0.001	0.002	0.006	0.008	0.007	0.009	0.004
Au	0.044	0.045	0.048	0.039	0.041	0.055	0.051	0.053	0.061	0.043
Fe	29.799	28.809	29.991	28.871	29.876	29.905	29.981	29.991	29.985	29.999
Pb	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001			0.001	0.001	0.001
Ni				0.001			0.001	0.001	0.001	0.001
Mo	0.078	0.081	0.072	0.099	0.086	0.079	0.081	0.084	0.077	0.073
Se	0.011	0.009	0.012	0.017	0.019	0.024	0.022	0.025	0.024	0.019
As		0.001	0.001		0.001	0.001		0.001	0.001	0.002
Suma	98.969	98.987	99.132	99.290	99.135	99.338	99.266	99.307	99.343	99.296

Punto	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	4.1	4.2	4.3
S	34.739	34.819	34.709	34.806	34.822	34.801	34.810	34.701	34.709	34.721
Cu	34.199	34.176	34.211	34.254	34.243	34.239	34.241	34.251	34.261	34.259
Co	0.019	0.015	0.014	0.011	0.018	0.010	0.011	0.012	0.010	0.009
Zn	0.030	0.030	0.021	0.024	0.021	0.018	0.019	0.009	0.008	0.008
Bi	0.002	0.002	0.005	0.004	0.005	0.003	0.006	0.003	0.004	0.005
Au	0.049	0.043	0.015	0.019	0.017	0.016	0.018	0.014	0.015	0.077
Fe	29.978	29.979	29.981	29.988	29.979	29.984	29.958	29.967	29.958	29.961
Pb	0.001	0.001	0.001	0.001		0.011	0.009	0.008	0.006	0.005
Ni	0.001	0.001	0.001			0.003	0.002			0.002
Mo	0.077	0.067	0.069	0.071	0.063	0.065	0.070	0.008	0.006	0.1
Se	0.015	0.011	0.015	0.021	0.19	0.024	0.028	0.018	0.017	0.020
As	0.001	0.001		0.001			0.001	0.001		0.001
Suma	99.111	99.145	99.042	99.200	99.358	99.174	99.173	98.992	98.994	99.168

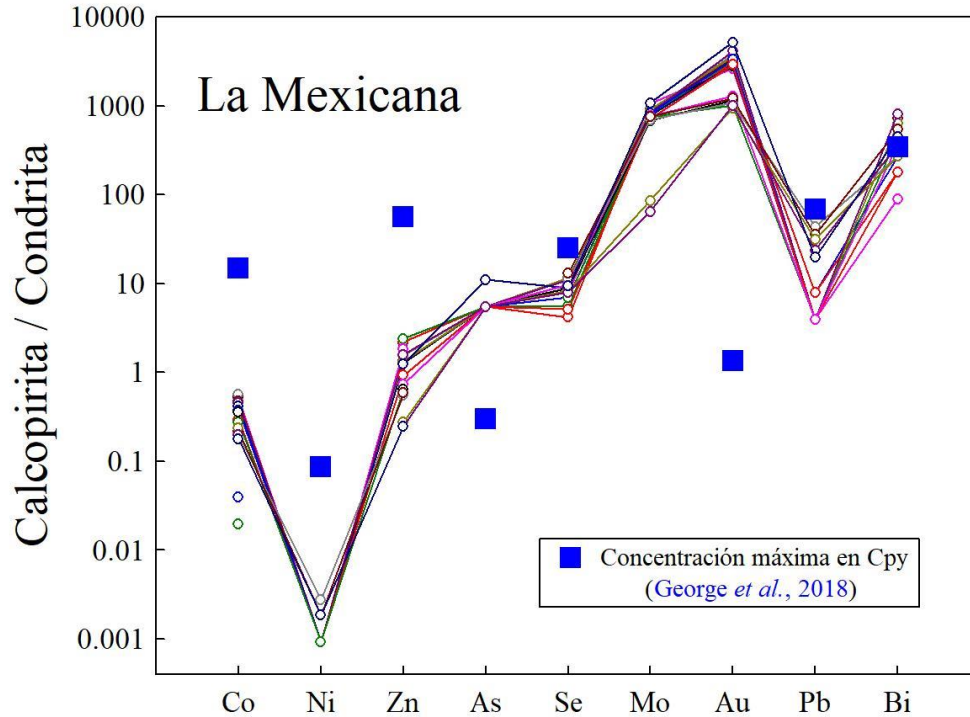


Figura 4.11 Diagrama de especies metálicas en calcopirita normalizado a condrita para especímenes en el skarn La Mexicana. Se incluye la concentración máxima reportada en calcopirita por [George et al. \(2018\)](#).

Otro mineral de cobre, identificado en una muestra colectada en superficie (ARAG23-17) cercana a la bocamina de La Mexicana, es la malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3[\text{OH}]_2$). La identificación de la malaquita [$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$] se efectuó a través del análisis SWIR con señales en (a) ~ 1900 nm ligada a carbonatos y (b) ~ 2300 nm asociado al enlace Cu-OH ([Figura 4.12a](#); [Liggins et al., 2022](#)). Además, la presencia del mineral se corroboró comparando su espectro de rayos-X en polvo con respecto al patrón de referencia JCPDS 10-399 ([Figura 4.12b](#)). Las cuatro reflexiones principales [2θ ($^\circ$): I_0/I : hkl] para la identificación de la especie mineral incluyen: [31.3: 100: $\bar{2}01$, 140], [24.1: 65: 220], [17.5: 75: 120], [11.9: 12: 110]. Algunos minerales que acompañan a la malaquita incluyen calcita, cuarzo, epidota y esmectita.

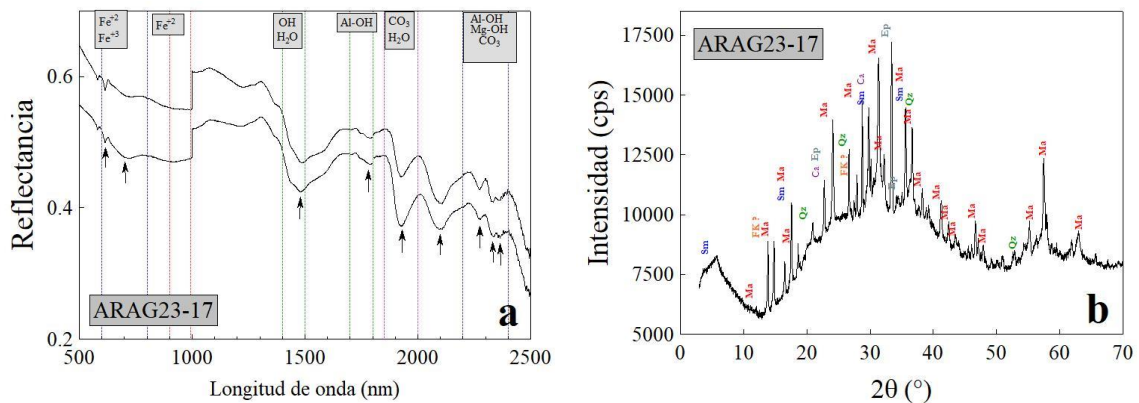


Figura 4.12 Patrones (a) SWIR y (b) de difracción de rayos-X para la muestra ARAG23-17.

Por otra parte, en el estudio se incluyó la muestra ARAG23-MI (Figura 4.13A) que representa una mica laminar que se encuentra intercalada con una zona de mineralización cuprífera (calcopirita). Este material fue triturado y preparado para su caracterización (Figura 4.13B). El esquema de análisis incluyó la identificación de fase por difracción de rayos-X (Figura 4.13D) y SWIR (Figura 4.14), el análisis químico y su datación por el método K-Ar (Figura 4.13C).

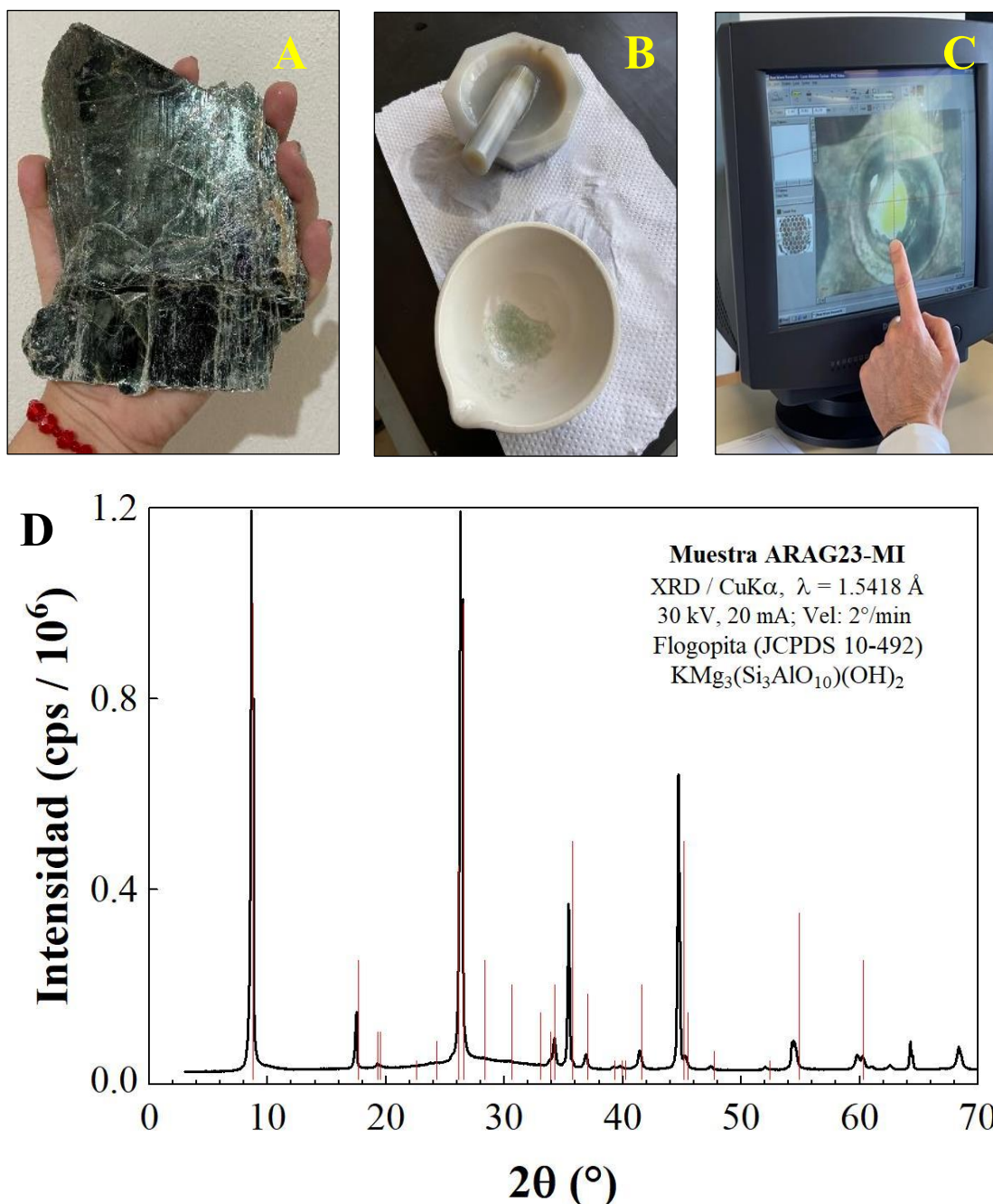


Figura 4.13 (A) Muestra de mano de la muestra ARAG23-MI, la cual se colectó en contacto con el endoskarn. La muestra fue triturada (B), datada por un método K-Ar (C) y caracterizada por XRD (D). Se determinó que correspondía a una flogopita.

El espectro de difracción de rayos-X en polvo ha revelado que la mica es una flogopita [$\text{KMg}_3(\text{SiAl}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$], de acuerdo con el patrón de referencia JCPDS 10-492 (Figura 4.13D). Las cuatro reflexiones principales [2θ ($^\circ$): I_0/I : hkl] para la identificación de la especie mineral incluyen: [8.75: 100: 003], [26.57: 100: 004], [35.75: 50: 101], [45.13: 50: 001]. El análisis SWIR (Figura 4.12d) ha revelado las señales reportadas para flogopita (Clark et al., 1990): (a) ~ 1400 nm ligada a hidroxilo (OH) y (b) el triplete en 2243, 2322 y 2379 asociado al enlace Mg-OH. Por otra parte, los resultados de la caracterización química y la datación radiométrica se discuten en los siguientes apartados.

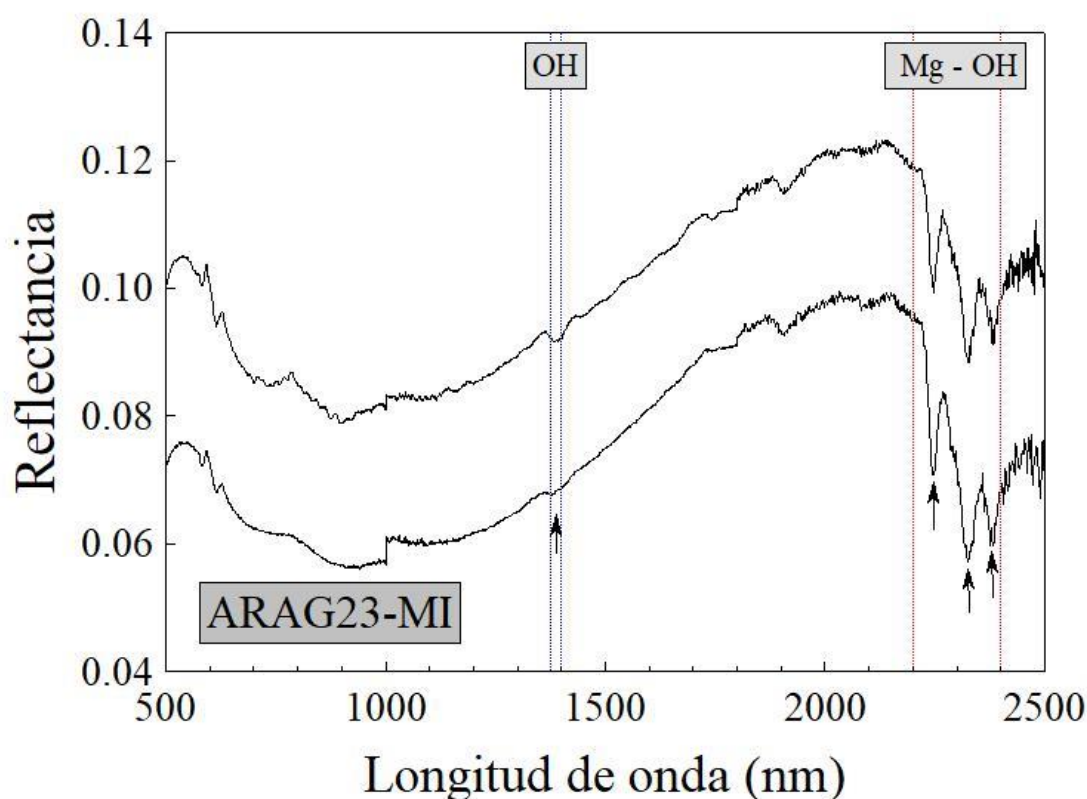


Figura 4.14 Patrones de infrarrojo de onda corta (SWIR, short-wave infrared) para (b) endoskarn ARAG23-17 y (d) mica ARAG23-MI. En cada patrón se incluye la posición de señales asociadas a especies de hierro (Fe^{+2} , Fe^{+3}), agua (H_2O), hidroxilo (OH), hidroxilo unido a Al o Mg (Al-OH, Mg-OH), carbonatos (CO_3) y sulfatos (SO_4) (Clark et al., 1990).

4.1.4 Análisis de espectroscopía de reflectancia de testigos de perforación

Durante el estudio se tuvo acceso a información de identificación de especies minerales en el barreno BMEX del depósito La Mexicana, en un intervalo de 30 a 90 m de profundidad (Figura 4.15). Para cumplir con este propósito se utilizó el sistema *CoreScanX*. Este integra espectroscopía de reflectancia, fotografía y un perfilador de superficie 3D para entregar una solución de identificación mineralógica y logueo para núcleos de perforación (Página web: corescan.com.au).

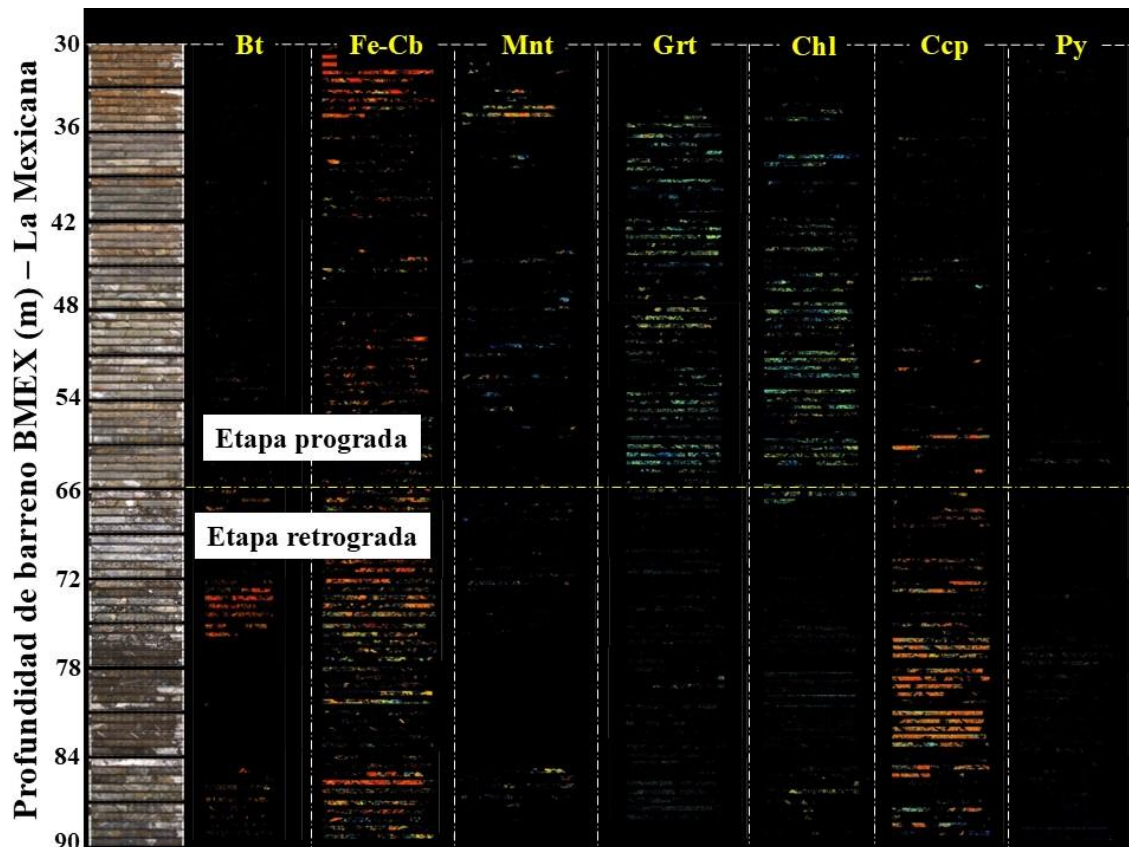


Figura 4.15 Análisis mineralógico *CoreScanX* para el barreno BMEX del sistema de skarn La Mexicana, en el intervalo de 30 a 90 m. Minerales: Bt = biotita, Fe-Cb = carbonato de hierro, Mnt = montmorillonita, Grt = granate, Chl = clorita, Ccp = calcopirita, Py = pirita.

El análisis de *CoreScanX* permitió distinguir en este barreno las etapas de evolución del yacimiento de skarn La Mexicana. De esta forma, la etapa progradada (30-66 m) se caracterizó por incluir principalmente granate y clorita, acompañados de forma intermitente por carbonato de hierro y montmorillonita. Hacia el final de la etapa progradada (~60 m) se inicia la aparición de minerales de cobre (calcopirita y pirita). Durante la etapa retrograda (66 – 90 m) ocurre el desarrollo de la mena de cobre por acumulación de calcopirita, la cual es acompañada de carbonatos de Fe, biotita (solo en su parte inicial) y montmorillonita y clorita (en su parte final).

4.2 Análisis geoquímico

En la **Tabla 4.8** se reporta la composición química (elementos mayores [% en peso] y traza [ppm]) de los diversos tipos de litologías involucradas en el desarrollo del skarn La Mexicana. Se incluyen también los límites de detección de los métodos utilizados (ICP-OES y ICP-MS).

Como es de esperarse, las muestras representativas de carbonatos se caracterizan por un alto porcentaje de CaO (44.6 y 53.2) y de pérdida por ignición (36.4 y 39.6 %) con una composición variable en %SiO₂ (4.8 y 15.7). Esta observación se encuentra en concordancia con las señales observadas en el espectro SWIR (**Figura 4.12a**), que indican la presencia de carbonatos (CO₃), asociada a la calcita, y de hidroxilo (OH) y agua (H₂O), asociada a arcillas. Sin embargo, existe un notable contraste en la composición de los elementos traza. La muestra ARAG23-12 incluye altos contenidos

de metales de transición (V, Cr, Cu, Ni, Zn, Mo y Pb) en comparación a la caliza ARAG23-13.

Por otra parte, una inspección inicial indica que el magmatismo ($n = 7$) cubre composiciones intermedias a ácidas ($\%SiO_2 = 55.1 - 70.39$; mediana = 62.19) con contenidos relativamente altos de $Fe_2O_3^t$ ($1.11 - 11.68$ %; mediana = 5.07), CaO ($4.78 - 8.87$ %; mediana = 6.56) y de álcalis ($Na_2O + K_2O = 2.69 - 8.24$ %; mediana = 6.77). En cuanto a los elementos traza, los granitoides presentan concentraciones relativamente moderadas a bajas de REE, elementos de campo electrostático fuerte (por ejemplo, Zr, Nb, Hf, Th) y metales de transición (por ejemplo, V, Cr, Cu). Sin embargo, considerando el contenido de litófilos (Ba, Sr y Rb) se dividen en dos grupos: (a) las muestras BMEX-482 y BMEX-486 muestran concentraciones relativamente bajas (Ba = 10-20 ppm, Sr = 70-84 ppm, Rb = 10-21 ppm) y (b) las muestras ARAG23-11, ARAG23-15, ARAG23-16, BMEX-487 y BMEX-492 se caracterizan por contenidos relativamente altos (Ba = 650-916 ppm, mediana = 805; Sr = 520-588 ppm, mediana 530; Rb = 88-156 ppm, mediana = 111).

Las muestras BMEX-485, ARAG23-10 y ARAG23-17 se pueden considerar como representativas de la alteración que da lugar al depósito cuprífero. Las dos últimas se caracterizan por una composición en elementos mayores con $\%SiO_2 = 36.2-41.6$, $\%Fe_2O_3 = 22.4-22.8$, $\%CaO = 25.7-28.1$ y $\%Na_2O + \%K_2O = 0.1-0.7$. Es destacable su alto contenido en metales de transición (V = 37-369 ppm, Cr = 90-190 ppm, Ni = 40-80 ppm, Zn = 90-260 ppm, As = 141-265 ppm), y en especial de Cu (2.14-3.50%) y Mo (2480 ppm). En contraste, la muestra BMEX-485 muestra un mayor contenido de SiO_2 (52.6%) y álcalis (7.33%), pero más bajo de $Fe_2O_3^t$ (8.13%) y CaO (8.39%). Sus contenidos de metales son comparables o inferiores a las muestras ARAG23-10 y ARAG23-17, pero son superiores a lo observado en las rocas intrusivas (V = 203 ppm, Cr = 50 ppm, Zn = 80 ppm, As = 5 ppm, Cu 100 ppm, Mo = 9 ppm).

Finalmente, la muestra ARAG23-MI corresponde a una mica rica en K en contacto con la mineralización cuprífera. Como se ha señalado anteriormente, el análisis de difracción de rayos-X la ha identificado como una flogopita. La composición química reportada en la [Tabla 4.8](#) se utilizó para efectuar el cálculo de la fórmula mineral de acuerdo con el esquema de [Brady y Perkins \(2017\)](#) y que se reporta en la [Tabla 4.9](#).

4.3 Análisis geocronológico

En la [Tabla 4.10](#) se reportan los resultados de la datación U-Pb en circón para el granitoide ARAG23-16, cuyo emplazamiento generó el depósito cuprífero La Mexicana. De esta forma, 29 granos de características homogéneas fueron analizados mostrando contenidos de U = 274 – 802 ppm y Th = 65 – 631 ppm, con una relación Th/U = 0.25 – 0.79. Los valores de la relación son típicos de circón de origen magmático (Th/U > 0.1). El análisis isotópico U-Pb ha revelado una edad consistente de 43.51 ± 0.67 Ma ($n = 27$; MSWD = 0.86), que se puede interpretar como edad de emplazamiento del plutón. El sistema se complementa con un circón heredado de edad jurásica (156.9 ± 4.41 Ma).

Tabla 4.8 Composición en elementos mayores y traza para litologías relacionadas al skarn La Mexicana (PPI = Pérdida por Ignición a 700°C; Métodos analíticos: ICP = ICP-OES, MS = ICP-MS; LD = Límite de detección).

Muestra Tipo	ARAG23-12 Caliza oscura	ARAG23-13 Caliza	BMEX-485 Estrato arcilloso	ARAG23-11 Granitoide	ARAG23-15 Granitoide	ARAG23-16 Granitoide	BMEX-482 Granitoide
<i>Elementos mayores (% en peso)</i>							
SiO ₂	15.690	4.820	52.630	62.310	55.100	57.220	70.390
TiO ₂	0.058	0.023	1.202	0.707	1.271	0.980	0.585
Al ₂ O ₃	1.360	0.600	17.060	15.790	14.360	16.200	5.500
Fe ₂ O ₃ [†]	0.430	0.220	8.130	5.880	11.680	8.110	2.960
MnO	0.105	0.017	0.179	0.133	0.223	0.176	0.318
MgO	0.090	0.860	4.080	2.170	3.720	3.380	0.890
CaO	44.610	53.200	8.390	5.170	6.710	6.560	8.920
Na ₂ O	0.020	0.080	3.950	3.400	3.190	3.650	2.520
K ₂ O	0.020	0.280	3.380	3.370	3.050	2.430	0.170
P ₂ O ₅	1.490	0.040	0.620	0.350	0.710	0.340	0.260
PPI	36.350	39.600	1.330	0.990	0.950	0.950	6.090
Suma	100.223	99.740	100.393	100.270	100.964	99.996	98.603
<i>Elementos traza (ppm)</i>							
Sc	3		20	11	23	20	13
V	1146	9	203	108	233	171	52
Cr	160		50	40	180	30	50
Co			23	9	16	15	21
Ni	20						
Cu	50		100	80	10	20	30
Zn	840		80	250	130	90	
Ga	3	1	20	18	22	20	6
Ge	3		1	1	2	2	
As	20	5	5	12	5	6	75
Rb		9	119	107	111	88	10
Sr	695		753	588	531	523	70
Y	42		25	25	42	35	20
Zr	24		160	185	394	171	184
Nb			9	10	16	13	11
Mo	19		9	6	7	8	
Sb	22.7		3.5	0.5			6.5
Cs	0.6	0.5	6.1	4.3	6.7	6.3	1.3
Ba	60	29	1184	916	805	650	50
La	24.1	5.0	38.3	30.1	53.9	31.6	62.1
Ce	13.8	4.5	75.4	60.7	117	66.2	98.7
Pr	4.17	0.91	9.35	7.55	14.9	8.57	9.67
Nd	18.2	3.9	37.5	30	61.2	36.2	32.2
Sm	3.3	0.8	7.3	5.9	12.4	7.8	4.8
Eu	0.75	0.2	1.85	1.33	1.96	1.62	0.74
Gd	4	0.9	6.4	4.7	10.0	6.9	3.8
Tb	0.6	0.1	0.9	0.7	1.5	1.1	0.6
Dy	3.5	0.8	4.8	3.9	7.8	6.0	3.6
Ho	0.8	0.2	0.9	0.8	1.5	1.2	0.7
Er	2.6	0.4	2.6	2.2	4.3	3.6	2.0
Tm	0.36	0.06	0.36	0.32	0.63	0.50	0.32
Yb	2.3	0.4	2.2	2.2	4.1	3.4	2.1
Lu	0.34	0.06	0.35	0.35	0.65	0.54	0.33
Hf	0.4		4.2	4.6	9.7	4.1	5.1
Ta			0.4	0.8	0.9	0.8	1.2
W	10		2	16	18	19	4
Tl		0.1	0.6	0.6	0.6	0.5	0.1
Pb	101		15	33	19	18	22
Th	1.1	0.3	5.4	8.7	7.4	5.5	1.0
U	8.8	0.5	2.4	2.5	4.4	2.8	4.9

Tabla 4.8 (Cont.)

Muestra Tipo	BMEX-486 Granitoide	BMEX-487 Granitoide	BMEX-492 Granitoide	ARAG23-10 Endoskarn	ARAG23-17 Endoskarn	ARAG23-MI Mica	Método LD
<i>Elementos mayores (% en peso)</i>							
SiO ₂	57.040	62.190	63.770	36.230	41.620	38.86	ICP / 0.01 %
TiO ₂	0.484	0.671	0.632	0.140	0.073	0.057	ICP / 0.001 %
Al ₂ O ₃	15.130	15.560	15.910	4.810	3.620	17.19	ICP / 0.01 %
Fe ₂ O ₃ ¹	1.110	5.070	4.900	22.380	22.870	4.91	ICP / 0.01 %
MnO	0.268	0.075	0.112	0.383	0.292	0.235	ICP / 0.005 %
MgO	0.660	2.250	2.080	0.230	0.120	22.87	ICP / 0.01 %
CaO	8.870	5.210	4.780	28.070	25.720	0.98	ICP / 0.01 %
Na ₂ O	7.920	3.450	3.360	0.020	0.270	0.18	ICP / 0.01 %
K ₂ O	0.320	3.820	4.050	0.080	0.420	9.86	ICP / 0.01 %
P ₂ O ₅	0.220	0.350	0.300	0.340	0.270		ICP / 0.01 %
Cu				3.500	2.140		MS / 0.001 %
Mo					0.248		MS / 0.001 %
Rb						0.120	MS / 0.001 %
PPI	7.070	1.430	0.920	3.010	2.220	5.540	
Suma	99.092	100.076	100.814	99.193	99.883	100.802	
<i>Elementos traza (ppm)</i>							
Sc	9	12	11	4	1		ICP / 1 ppm
V	71	101	91	369	37	8	ICP / 5 ppm
Cr	20	30	20	90	190		MS / 20 ppm
Co	8	11	11	14	23	21	MS / 1 ppm
Ni				80	40		MS / 20 ppm
Cu		30	30			110	MS / 10 ppm
Zn		50	70		260	280	MS / 30 ppm
Ga	15	18	19		14	17	MS / 1 ppm
Ge					5		MS / 1 ppm
As	6	5			265	7	MS / 5 ppm
Rb	21	143			12		MS / 2 ppm
Sr	84	520	530	12	16	11	MS / 2 ppm
Y	21	22	24	55	21		MS / 1 ppm
Zr	161	200	198	46	23	2	MS / 1 ppm
Nb	11	11	12	2	1		MS / 1 ppm
Mo	23	5	5			7.0	MS / 2 ppm
Sb	2.1	0.5	0.5	2.7	3.4	0.6	MS / 0.5 ppm
Cs	2.4	6.8	8.7	1.8	2.5	139	MS / 0.5 ppm
Ba	10	880	803	15	48	1669	MS / 0.1 ppm
La	21.4	28.1	38.9	22	11.4	1.4	MS / 0.1 ppm
Ce	43.1	55.2	76.2	28.7	22.4	1.9	MS / 0.1 ppm
Pr	5.06	6.83	9.03	5.5	4.44	0.22	MS / 0.05 ppm
Nd	21.4	27.0	34.5	27.5	18.4	0.9	MS / 0.1 ppm
Sm	4.5	5.6	6.5	6.8	3.5	0.2	MS / 0.1 ppm
Eu	0.51	1.31	1.43	2.00	0.93		MS / 0.05 ppm
Gd	3.7	4.5	5.4	6.8	3.2	0.2	MS / 0.1 ppm
Tb	0.6	0.7	0.8	1.1	0.5		MS / 0.1 ppm
Dy	3.9	3.9	4.6	6.6	2.8	0.2	MS / 0.1 ppm
Ho	0.8	0.8	0.9	1.3	0.6		MS / 0.1 ppm
Er	2.3	2.3	2.6	3.7	1.6	0.1	MS / 0.1 ppm
Tm	0.38	0.33	0.40	0.53	0.21		MS / 0.05 ppm
Yb	2.7	2.1	2.7	3.4	1.2	0.1	MS / 0.1 ppm
Lu	0.44	0.34	0.44	0.55	0.17	0.02	MS / 0.01 ppm
Hf	4.4	5.3	5.7	0.9	0.4		MS / 0.2 ppm
Ta	1.1	1.0	1.2				MS / 0.1 ppm
W	5.0	2.0	4.0	15	84	1.0	MS / 1 ppm
Tl	0.3	0.8	0.8		0.3	3.7	MS / 0.1 ppm
Pb		16	22	16	10	81	MS / 5 ppm
Th	20.5	15.8	18.8	3.5	1.2		MS / 0.1 ppm
U	9.3	5.4	8.8	6.6	6.0	0.8	MS / 0.1 ppm

Tabla 4.9 Cálculo de fórmula mineral para la mica ARAG23-MI aplicando el esquema propuesto por [Brady y Perkins \(2017\)](#). n = %peso/pfg, pfg = peso fórmula gramo.

Óxido	pfg	% peso	n	Cationes	Cationes normalizados	Oxígeno	Átomos	Elem
SiO ₂	60.084	38.86	0.647	0.647	3.000	6.000	3.000	Si
TiO ₂	79.866	0.06	0.001	0.001	0.003	0.007	0.003	Ti
Al ₂ O ₃	101.961	17.19	0.169	0.337	1.564	2.346	1.564	Al
FeO	71.844	4.42	0.061	0.061	0.285	0.285	0.285	Fe ⁺²
MnO	70.937	0.24	0.003	0.003	0.015	0.015	0.015	Mn
MgO	40.304	22.87	0.567	0.567	2.632	2.632	2.632	Mg
CaO	56.077	0.98	0.017	0.017	0.081	0.081	0.081	Ca
Na ₂ O	61.979	0.18	0.003	0.006	0.027	0.013	0.027	Na
K ₂ O	94.196	9.86	0.105	0.209	0.971	0.486	0.971	K
H ₂ O							2.000	H
Suma		94.65	1.573	0.647	8.579	11.865	10.579	

Tabla 4.10 Datos de geocronología U-Pb en circón para el granitoide ARAG23-16, asociado a la mineralización cuprífera La Mexicana.

Zrn	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2se	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2se	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2se	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±2se	Edad (Ma)	±2se
01	467.5	127.1	0.27	0.06678	0.00751	0.05714	0.00595	0.00631	0.00022	0.00300	0.00023	40.5	1.40
02	509.0	129.5	0.25	0.05143	0.00547	0.04389	0.00374	0.00645	0.00020	0.00220	0.00022	41.4	1.26
03	655.6	208.2	0.32	0.05028	0.00362	0.04281	0.00277	0.00634	0.00019	0.00201	0.00014	40.7	1.19
04	508.8	174.5	0.34	0.04959	0.00490	0.04533	0.00430	0.00665	0.00018	0.00225	0.00015	42.7	1.14
05	394.5	132.9	0.34	0.05364	0.00549	0.04708	0.00453	0.00643	0.00017	0.00254	0.00021	41.3	1.08
06	492.9	156.1	0.32	0.04829	0.00430	0.04299	0.00361	0.00654	0.00017	0.00184	0.00020	42.0	1.11
07	545.7	287.9	0.53	0.05641	0.00797	0.05063	0.00713	0.00648	0.00023	0.00273	0.00029	41.7	1.45
08	637.4	364.6	0.57	0.04937	0.00390	0.04271	0.00323	0.00632	0.00018	0.00193	0.00014	40.6	1.17
09	539.0	221.9	0.41	0.04514	0.00419	0.04012	0.00346	0.00651	0.00018	0.00215	0.00023	41.8	1.16
11	403.6	242.6	0.60	0.05133	0.00537	0.04535	0.00452	0.00645	0.00018	0.00201	0.00017	41.4	1.17
12	737.1	469.7	0.64	0.04967	0.00384	0.04391	0.00329	0.00643	0.00016	0.00201	0.00011	41.3	1.05
13	378.3	143.3	0.38	0.04820	0.00574	0.04200	0.00491	0.00633	0.00018	0.00171	0.00020	40.7	1.18
14	670.7	422.6	0.63	0.04755	0.00398	0.04312	0.00351	0.00659	0.00017	0.00221	0.00014	42.4	1.11
15	689.3	314.0	0.46	0.04812	0.00347	0.04302	0.00314	0.00647	0.00016	0.00216	0.00014	41.6	1.00
16	801.7	630.7	0.79	0.04850	0.00296	0.04424	0.00252	0.00663	0.00014	0.00210	0.00009	42.6	0.93
17	452.4	211.1	0.47	0.05419	0.00936	0.04828	0.00800	0.00650	0.00023	0.00227	0.00039	41.7	1.49
18	578.8	201.7	0.35	0.04887	0.00391	0.04354	0.00348	0.00648	0.00015	0.00217	0.00022	41.6	0.94
19	620.7	231.2	0.37	0.04706	0.00418	0.04251	0.00366	0.00656	0.00017	0.00225	0.00014	42.2	1.09
20	520.2	318.9	0.61	0.04550	0.00438	0.04114	0.00419	0.00642	0.00017	0.00212	0.00015	41.2	1.10
21	274.2	65.7	0.24	0.04939	0.00617	0.04387	0.00530	0.00653	0.00024	0.00238	0.00032	41.9	1.54
22	636.4	238.9	0.38	0.04790	0.00325	0.04386	0.00288	0.00663	0.00017	0.00205	0.00016	42.6	1.08
23	650.5	212.5	0.33	0.04917	0.00387	0.04509	0.00339	0.00666	0.00015	0.00218	0.00016	42.8	0.99
24	512.0	165.5	0.32	0.05183	0.00391	0.04675	0.00359	0.00651	0.00018	0.00226	0.00016	41.8	1.13
25*	333.4	214.3	0.64	0.05134	0.00337	0.17478	0.01084	0.02464	0.00070	0.00867	0.00049	156.9	4.41
26	536.1	337.9	0.63	0.05072	0.00453	0.04534	0.00373	0.00650	0.00017	0.00199	0.00013	41.8	1.10
27	485.3	246.3	0.51	0.05019	0.00464	0.04520	0.00407	0.00652	0.00016	0.00222	0.00015	41.9	1.02
28	668.5	313.1	0.47	0.04898	0.00437	0.04444	0.00369	0.00669	0.00017	0.00223	0.00016	43.0	1.12
29	565.9	195.4	0.35	0.04604	0.00360	0.04237	0.00345	0.00655	0.00016	0.00218	0.00019	42.1	1.02
30	421.2	174.3	0.41	0.04671	0.00441	0.04323	0.00394	0.00670	0.00017	0.00211	0.00019	43.0	1.08

Adicionalmente, en la [Tabla 4.11](#) se reporta la composición de elementos traza para los 29 circones separados del granitoide ARAG23-16. Los circones eocénicos (n = 27) se caracterizan por mostrar un enriquecimiento en Hf, U, REE pesadas y P, presentando los siguientes intervalos composicionales: P = 11.6 – 489 ppm, mediana = 124; Ti = 1.0 – 6.7 ppm, mediana = 2.7; Nb = 1.7-7.7 ppm, mediana = 3.5; La = 0.001-4.7 ppm, mediana = 0.01; Eu = 0.3-3.5 ppm, mediana = 1.2; Yb = 177-540 ppm, mediana = 380; Hf = 10380-12390 ppm, mediana = 11235; U = 274-802 ppm, mediana = 538. El circón jurásico heredado se caracteriza por un mayor enriquecimiento en P (2768 ppm) y La (17.1 ppm), con niveles comparables para el resto de los elementos.

Tabla 4.11 Composición en elementos traza (ppm) para circones separados del granitoide ARAG23-16.

Zr	P	Sc	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
01	43.1	190.6	1.7	745.5	2.7	0.076	18.4	0.083	1.1	2.1	1.0
02	38.3	190.6	3.9	765.1	3.9	0.003	21.6	0.048	0.6	1.5	0.7
03	72.2	203.4	3.3	1028.5	5.2	0.232	32.0	0.107	1.3	3.0	1.2
04	45.1	209.6	2.0	893.9	2.7	0.089	19.0	0.109	1.5	3.3	1.2
05	42.5	188.5	2.4	779.2	4.0	0.166	23.3	0.063	1.1	1.9	0.9
06	36.3	205.4	3.3	834.6	2.8	0.009	17.8	0.052	1.1	2.3	1.2
07	51.9	209.7	2.6	1061.5	3.1	0.020	24.8	0.080	2.0	3.4	1.6
08	47.4	198.3	3.6	1026.0	3.9	0.025	26.7	0.109	1.9	3.8	1.6
09	44.3	182.9	2.4	656.3	2.0	0.011	12.3	0.060	0.9	2.0	0.9
11	78.2	194.0	4.0	779.5	3.7	0.006	21.2	0.047	0.8	1.9	0.8
12	200.9	190.6	4.6	1064.4	3.2	4.712	37.1	1.462	9.3	5.9	2.0
13	11.6	198.7	2.3	605.8	3.4	0.001	13.6	0.020	0.4	1.2	0.5
14	85.5	213.4	1.3	1107.7	3.6	0.010	27.7	0.109	1.8	3.9	1.5
15	104.9	215.8	6.7	1141.9	7.7	0.004	36.3	0.018	1.2	2.9	1.2
16	182.9	238.2	6.0	1628.0	6.1	0.012	42.8	0.269	4.2	8.9	3.5
17	131.6	213.7	3.6	804.4	4.2	0.005	22.0	0.044	0.7	2.0	0.8
18	116.2	199.9	1.7	667.3	3.9	0.005	19.8	0.040	0.4	1.6	0.6
19	323.4	195.1	6.1	920.6	4.1	0.015	23.7	0.069	1.2	3.3	1.3
20	472.9	191.1	6.4	979.1	3.8	0.008	25.1	0.058	0.9	3.1	1.2
21	162.7	179.9	2.2	365.5	1.7	0.009	8.5	0.022	0.3	0.9	0.3
22	397.5	192.4	1.0	950.0	3.0	0.001	19.9	0.081	1.3	3.4	1.4
23	388.5	203.3	2.7	896.2	4.7	0.015	23.3	0.046	0.8	2.0	0.9
24	370.0	193.7	2.4	679.1	2.8	0.018	17.4	0.039	0.7	1.8	0.8
25*	2768.3	150.1	6.1	1724.6	7.2	17.182	70.6	6.362	33.1	16.7	1.4
26	457.2	180.1	2.5	1294.4	3.1	0.047	31.8	0.172	3.0	6.1	2.2
27	489.1	193.2	6.2	917.8	2.8	0.009	22.9	0.096	1.9	3.9	1.5
28	411.0	205.6	4.8	1058.9	3.0	0.075	24.0	0.153	2.3	4.3	1.7
29	401.4	199.5	2.1	737.0	2.8	0.004	16.0	0.056	0.8	2.0	0.9
30	374.4	209.7	2.1	768.8	4.5	1.335	26.9	0.341	2.2	1.9	0.9

Zr	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U
01	11.7	4.1	54.4	22.4	120.0	325.6	71.0	10715.7	3.4	127.1	467.5
02	11.1	3.9	56.0	23.4	129.7	356.3	75.0	10748.5	3.2	129.5	509.0
03	15.6	5.6	74.3	30.2	165.5	445.1	95.2	10937.5	4.3	208.2	655.6
04	17.5	5.3	70.0	27.8	143.9	376.3	77.8	11898.7	3.0	174.5	508.8
05	11.8	4.2	57.6	23.0	125.9	341.7	69.3	11590.2	2.9	132.9	394.5
06	14.6	4.8	62.6	25.1	132.3	360.1	76.4	12125.6	3.1	156.1	492.9
07	18.9	6.3	78.9	31.7	160.1	408.8	91.2	12046.0	3.9	287.9	545.7
08	19.7	6.3	78.7	32.1	167.7	434.5	91.9	10696.4	4.0	364.6	637.4
09	10.7	3.6	47.5	19.6	105.8	294.6	63.0	11338.6	2.8	221.9	539.0
11	11.9	4.3	58.5	23.8	128.7	341.2	71.0	10472.6	2.3	242.6	403.6
12	23.5	7.2	90.8	32.9	167.1	439.3	86.2	10638.5	4.0	469.7	737.1
13	7.5	3.1	42.6	17.7	98.2	281.0	64.3	11811.9	2.5	143.3	378.3
14	21.4	7.0	88.5	34.5	177.8	454.7	94.5	11132.8	4.3	422.6	670.7
15	17.8	6.2	84.4	35.2	191.3	512.6	105.2	10986.2	4.1	314.0	689.3
16	45.0	13.6	155.3	54.3	248.1	540.2	104.4	10937.9	5.3	630.7	801.7
17	12.4	4.3	61.1	24.4	134.3	374.9	74.7	11759.2	2.1	211.1	452.4
18	8.7	3.2	44.3	19.5	110.0	324.5	70.2	11824.8	3.2	201.7	578.8
19	16.4	5.4	70.1	28.4	149.6	397.9	81.2	11110.3	3.7	231.2	620.7
20	16.1	5.8	76.1	30.8	158.0	388.3	76.9	10379.5	3.0	318.9	520.2
21	5.4	1.9	25.1	11.1	59.8	177.7	38.1	12390.6	1.6	65.7	274.2
22	16.6	5.6	72.7	28.4	148.7	392.4	82.6	10741.3	3.6	238.9	636.4
23	12.6	4.5	62.2	26.3	145.7	403.4	87.1	10421.9	3.6	212.5	650.5
24	10.1	3.6	50.1	20.3	111.9	317.3	68.8	11408.8	3.0	165.5	512.0
25*	58.8	15.2	180.5	63.0	280.9	442.2	78.2	9675.1	9.8	214.3	333.4
26	28.9	9.2	109.1	41.0	202.8	465.2	92.3	10816.5	3.5	337.9	536.1
27	17.7	5.9	72.5	28.5	145.2	382.7	77.0	11640.5	3.1	246.3	485.3
28	20.5	6.6	83.9	32.7	171.2	442.2	92.0	12066.9	4.1	313.1	668.5
29	11.4	3.8	53.6	22.1	120.1	331.7	73.4	11516.0	3.4	195.4	565.9
30	11.7	4.4	56.9	23.8	128.6	341.8	71.4	11671.7	2.7	174.3	421.2

Por otra parte, se realizó la separación de un concentrado de biotita del granitoide ARAG23-16 y su datación por el método K-Ar. El proceso ha revelado una edad de 39.4 ± 1.5 Ma (MSWD = 1.4), la cual se interpreta como edad de enfriamiento (Tabla 4.12).

Tabla 4.12 Datación radiométrica K-Ar de biotita separada de la muestra ARAG23-16.

Muestra	Edad (Ma)	σ (Ma)	$^{40}\text{Ar}^*$ (ccSTP/g)* 10^{-5}	$\sigma^{40}\text{Ar}^*$ (ccSTP/g)* 10^{-7}	$^{40}\text{Ar}^*$ (%)	K (%)	σK
ARAG2316-01	40.89	1.17	1.16	2.82	99.03	8.69	0.1
ARAG2316-02	38.32	1.40	1.09	2.64	100.34	8.69	0.1
ARAG2316-03	38.37	1.40	1.09	2.64	97.02	8.69	0.1
Promedio	39.40	1.50					
MSWD	1.4						
p(χ^2)	0.25						

Finalmente, se realizó la datación K-Ar de la flogopita ARAG23-MI, la cual ocurre en contacto con la mineralización cuprífera. El proceso ha revelado una edad de 39.8 ± 0.9 Ma, la cual se interpreta como una aproximación de la edad de inicio de la mineralización (Tabla 4.13).

Tabla 4.13 Datación radiométrica K-Ar de la flogopita ARAG23-MI.

Muestra	Edad (Ma)	σ (Ma)	$^{40}\text{Ar}^*$ (mol/g)	$^{40}\text{Ar}^*$ (%)	K (%)
ARAG23-MI	39.8	0.9	5.843×10^{-10}	90.1	8.37

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

Se propone un modelo paragenético preliminar para el yacimiento La Mexicana, Distrito de Concepción del Oro, Zacatecas como objetivo principal de la tesis. Este se ha elaborado integrando la información mineralógica, geoquímica y geocronológica de las litologías involucradas en la generación del depósito: (a) carbonatos (unidad, ambiente y edad de depósito), (b) rocas intrusivas (clasificación, origen, ambiente tectónico y edad) y (c) skarn cuprífero (arreglos y química de minerales, edad de inicio del depósito).

5.1 Carbonatos

Durante el presente estudio se estableció la composición química de dos rocas carbonatadas asociadas al skarn La Mexicana: la ARAG23-12, representativa de la Formación La Caja (Kimmerigdiano-Tithoniano), y la ARAG23-13, colectada de un afloramiento de la Formación Taraies (Berriasiano-Valanginiano). De acuerdo con la clasificación de Dunham (1962), estas rocas se consideran como carbonatos de grano fino (*mudstone*), siendo las litologías que son penetradas por las rocas plutónicas. Como es de esperar, su composición está dominada por el CaO, aunque la asociada a La Caja incluye detritos arcillosos que se reflejan en una mayor proporción de SiO₂ y Al₂O₃ (Figura 5.1). Imlay (1938) describió a Formación La Caja como una secuencia de caliza-marga con intercalaciones arcillosas. Barboza-Gudiño *et al.* (2004) describieron a la Formación Taraies como una secuencia de capas medianas a delgadas de *mudstone-wackstone* arcillosa. La composición en componentes mayores es comparable a la observada en los carbonatos de la Formación Zuloaga y La Caja asociados al yacimiento de Fe-Cu de Sol y Luna (González Bernal, 2018).

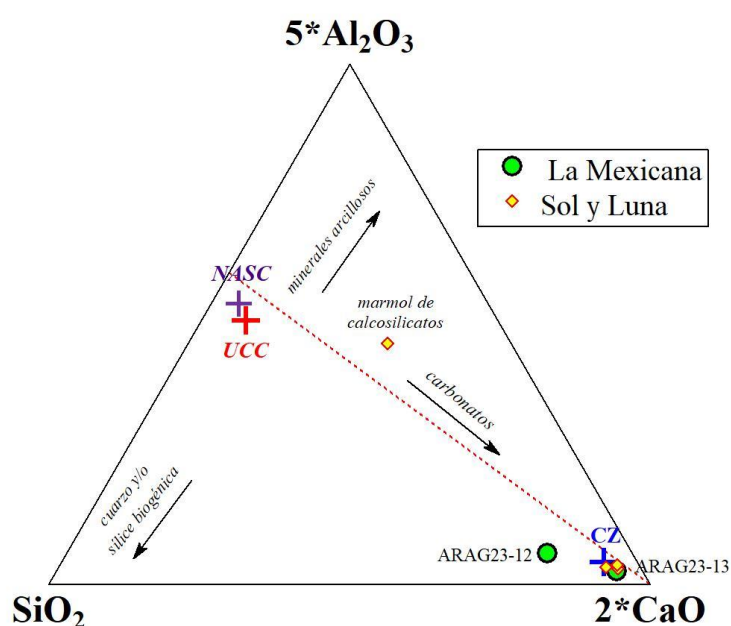


Figura 5.1 Diagrama ternario SiO₂-CaO-Al₂O₃ para carbonatos y mármoles en el Distrito de Concepción del Oro-Mazapil que incluyen los sistemas La Mexicana (este trabajo) y Sol y Luna (González-Bernal, 2018). (UCC: corteza continental superior, NASC: North America Shale Composite; Rollinson, 1993).

Por otra parte, de acuerdo con la composición de elementos mayores y lantánidos (Figura 5.2a-d; Zhang et al., 2017), los carbonatos asociados al skarn La Mexicana fueron depositados en un ambiente de mar abierto en zona somera con una influencia continental limitada. Esto implica un aporte bajo de detritos. En contraste, las calizas asociadas al depósito Sol y Luna se caracterizan por relaciones más cercanas a los componentes UCC y NASC (Rudnick y Gao, 2005). Esto sería indicativo de un mayor ingreso de detritos continentales.

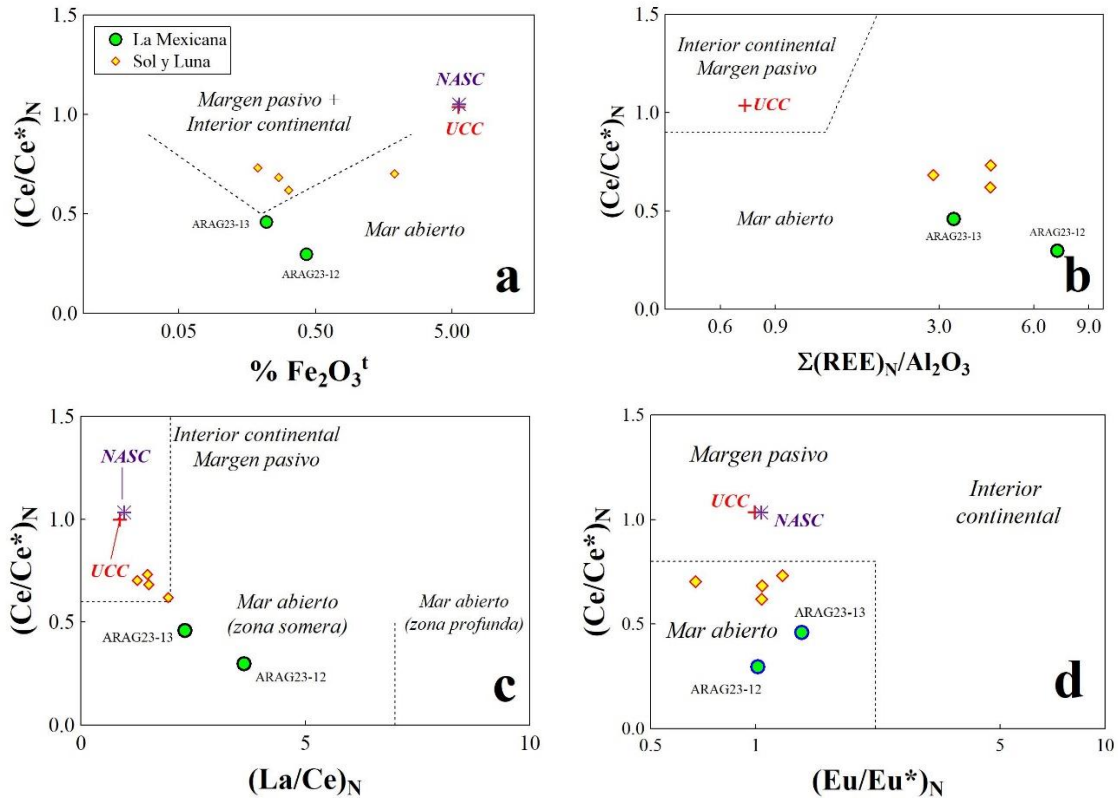


Figura 5.2 Diagramas de discriminación para carbonatos (Zhang et al., 2017) del Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil: La Mexicana (este trabajo) y Sol y Luna (González-Bernal, 2018). Los lantánidos normalizados respecto a PAAS (*post-Archean American Shale*), representativo de la corteza superior. Para comparación se incluye la composición de la corteza continental superior (UCC y NASC, North America Shale Composite; Rudnick y Gao, 2005).

Los patrones de lantánidos, normalizados a condrita, de los carbonatos asociados a La Mexicana se caracterizan por (Figura 5.3): (a) un enriquecimiento en lantánidos ligeros ($15\times$ para la Formación Taraises y $75\times$ para la Formación La Caja en La_N); (b) una anomalía negativa marcada en Ce ($[Ce/Ce^*]_N = 0.25-0.50$), la cual puede haber sido transferida desde el agua marina (Rollinson, 1993); (c) una pequeña anomalía negativa en Eu ($[Eu/Eu^*]_N = 1.0-2.0$), posiblemente ligada a fraccionación de plagioclasa; y (d) un patrón plano para lantánidos medianos y pesados. La composición en lantánidos de los carbonatos asociados al depósito Sol y Luna (González-Bernal, 2018) es intermedia entre la de los carbonatos de La Mexicana. La anomalía en Ce y Eu es menos marcada, salvo en una muestra parcialmente marmolizada.

Con todo lo descrito anteriormente se pueden reconocer diferencias en composición y condiciones de precipitación en las litologías carbonatadas en el distrito minero de Concepción del Oro-Mazapil. Este puede ser un factor que puede marcar variaciones durante la generación de depósitos metálicos. En el caso de la mina Sol y Luna las litologías carbonatadas involucradas son la Formación Zuloaga y La Caja. Estas fueron penetradas por cuarzo monzodioritas que dieron lugar a un depósito de Fe-Cu. En contraste, en la zona del skarn La Mexicana los carbonatos de la Formación La Caja y Taraises fueron afectados por metamorfismo de contacto, desarrollando una zona de corneanas que en contacto con el intrusivo permitieron la generación de una mena rica en Cu.

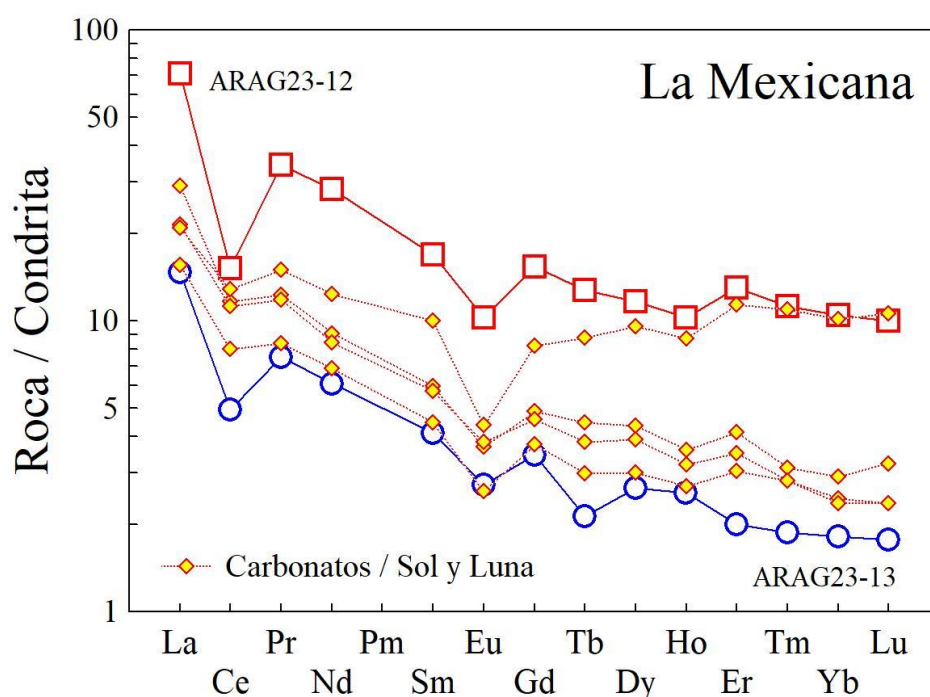


Figura 5.3 Diagrama de lantánidos normalizado a condrita para carbonatos del Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil: La Mexicana ([este trabajo](#)) y Sol y Luna ([González Bernal, 2018](#)). Datos de normalización de [Rollinson \(1993\)](#).

5.2 Rocas intrusivas

De acuerdo con el diagrama de clasificación de álcalis totales – sílice (TAS, *total alkali-silica*; [Cox et al., 1979](#)), las rocas plutónicas asociadas al depósito La Mexicana se consideran sienodioritas y granodioritas sub-alcálicas ([Figura 5.4](#)). El emplazamiento del magmatismo en la secuencia sedimentaria dio lugar al desarrollo del skarn cuprífero.

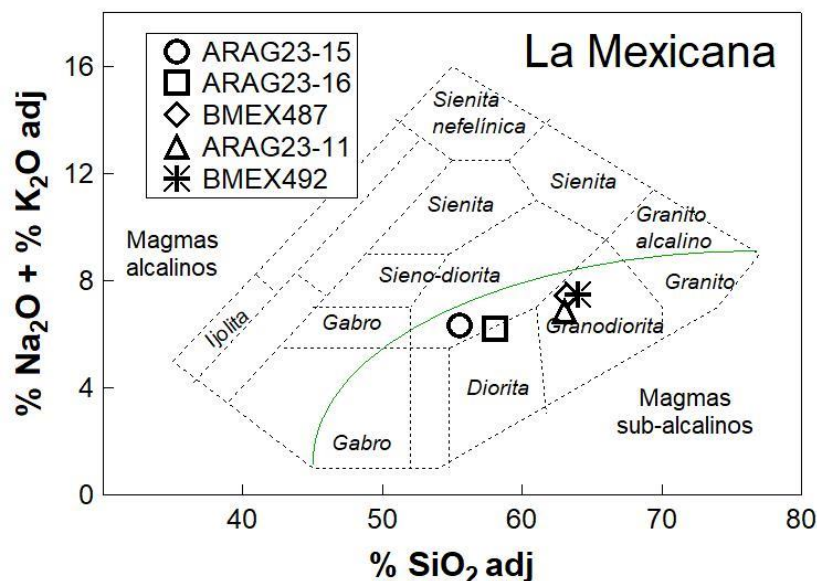


Figura 5.5 Diagrama de clasificación de álcalis totales – sílice (TAS, total alkali-silica; Cox *et al.*, 1979) para rocas intrusivas asociadas al depósito La Mexicana, Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil. La línea verde define la frontera entre magmas sub-alcálinos y alcalinos.

Con base en su composición de Fe y Mg, se les puede considerar como granitoides tipo I de afinidad cordillerana ($\text{FeO}^t/[\text{FeO}^t + \text{MgO}] = 0.6-0.7$; Figura 5.6a; Frost y Frost, 2008), calco-alcálinos ($[\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}] = -5 - 0$; Figura 5.6b; Frost *et al.*, 2001) y meta-aluminosos ($[\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}]/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.5-0.7$ y $\text{Al}_2\text{O}_3/[\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}] < 1.0$; Figura 5.6c; Maniar y Piccolli, 1989). Es importante resaltar que muestran composiciones en elementos mayores que pueden asociarse a la generación de depósitos Fe ($[\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}]/\text{K}_2\text{O} \sim 7.0$) y Au-Cu ($[\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}]/\text{K}_2\text{O} \sim 3.0-4.0$) (Figura 5.6d; Meinert, 1992).

Las rocas plutónicas del sistema de skarn La Mexicana muestran patrones de lantánidos normalizados a condrita caracterizados por (Figura 5.7): (a) un enriquecimiento en lantánidos ligeros (90-200× en La_N), (b) una anomalía negativa de Eu pequeña o ausente ($[\text{Eu}/\text{Eu}^*]_N = 0.7-0.8$) y (c) un patrón plano para elementos pesados. El análisis combinado de relaciones de elementos inmóviles indica un origen entre la corteza continental inferior a superior (Figuras 5.8a,b), mientras que la aplicación de diagramas de discriminación tectónica (Figuras 5.8c,d) señalan una afinidad a un ambiente de arco continental, en específico en condiciones post-orogénicas. Este tipo de ambientes geotectónicos son ideales para la formación de depósitos tipo pórfido, VMS, epitermales y skarn, que suelen ser ricos en Cu y representan el mayor aporte de este elemento y de Fe, Mo, Ag y Au en México (Tabelin *et al.*, 2021). Estas asociaciones se han reportado para el magmatismo del Distrito Concepción del Oro-Mazapil (Velasco-Tapia *et al.*, 2011; González-Guzmán *et al.*, 2023).

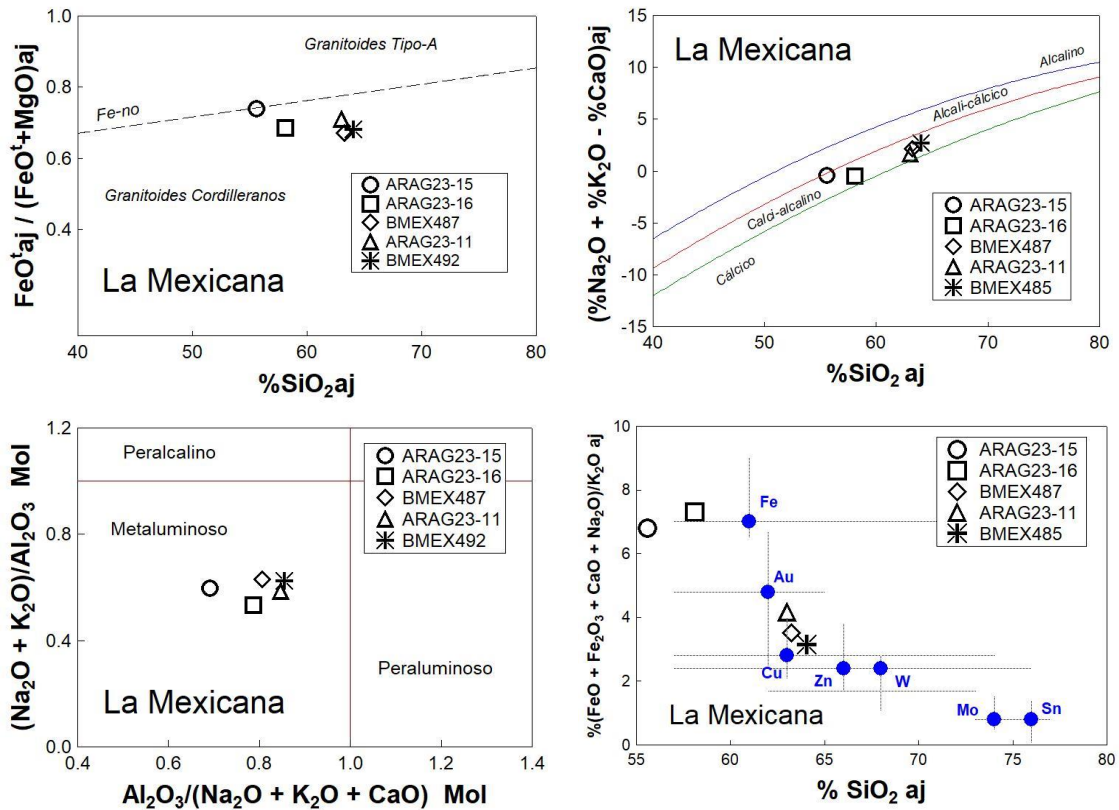


Figura 5.6 Diagramas de variación de elementos mayores para rocas intrusivas asociadas al depósito La Mexicana, Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil: (a) diagrama $\text{FeO}^{\text{aj}}/(\text{MgO} + \text{FeO}^{\text{aj}}) - \text{SiO}_2$ (Frost y Frost, 2008); (b) diagrama $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$ (Frost et al., 2001); (c) diagrama $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ (Maniar y Piccoli, 1989); (d) diagrama $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})/\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (Meinert, 1992).

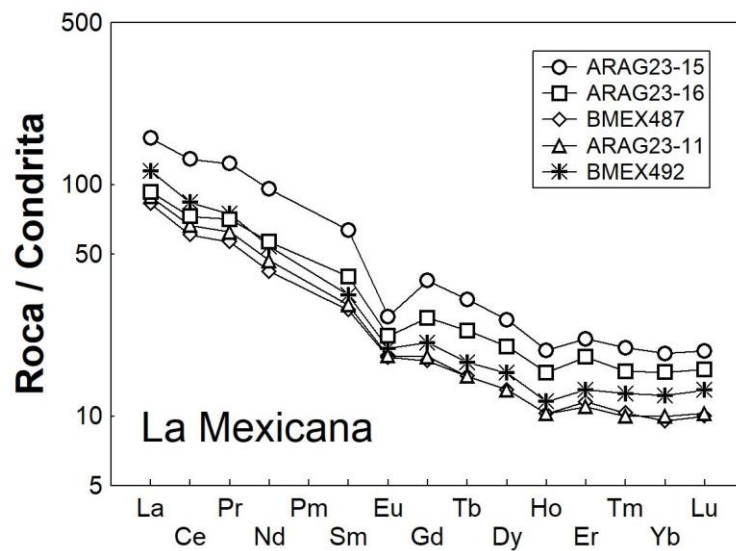


Figura 5.7 Diagrama de lantánidos normalizado a condrita para rocas plutónicas asociadas al depósito La Mexicana del Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil. Datos de normalización de Rollinson (1993).

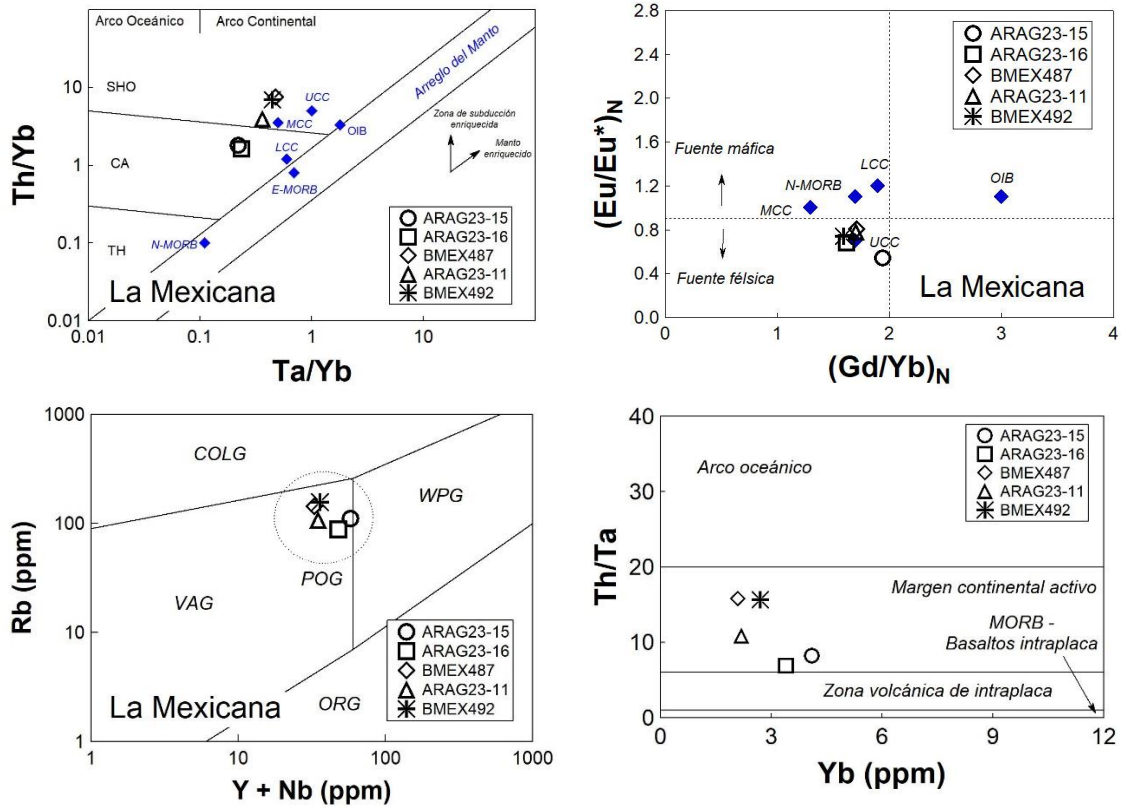


Figura 5.8 Diagramas de variación para rocas plutónicas asociadas al depósito La Mexicana en el Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil: (a) diagrama Th/Yb – Ta/Yb (Pearce *et al.*, 1984); (b) diagrama $(Eu/Eu^*)_N$ – $(Gd/Yb)_N$ (Taylor y McLennan, 1985); (c) diagrama Rb – Yb + Nb (Pearce *et al.*, 1984; Pearce, 1996); (d) diagrama Th/Ta – Yb (Gorton y Schandl, 2000). Fuentes magmáticas: N-MORB = cresta medio-oceánica normal, E-MORB = cresta medio-oceánica enriquecida, OIB = basalto de isla oceánica, LCC = corteza continental inferior, MCC = corteza continental media, UCC = corteza continental superior.

La aplicación de métodos radiométricos ha permitido acotar los procesos de emplazamiento – enfriamiento de la intrusión magmática asociada al desarrollo del depósito La Mexicana. La datación geocronológica U-Pb en circón para la cuarzo-monzodiorita ARAG23-16 ha revelado una edad concordante de emplazamiento de 43.51 ± 0.67 Ma (MSWD = 0.86) (Figura 5.9).

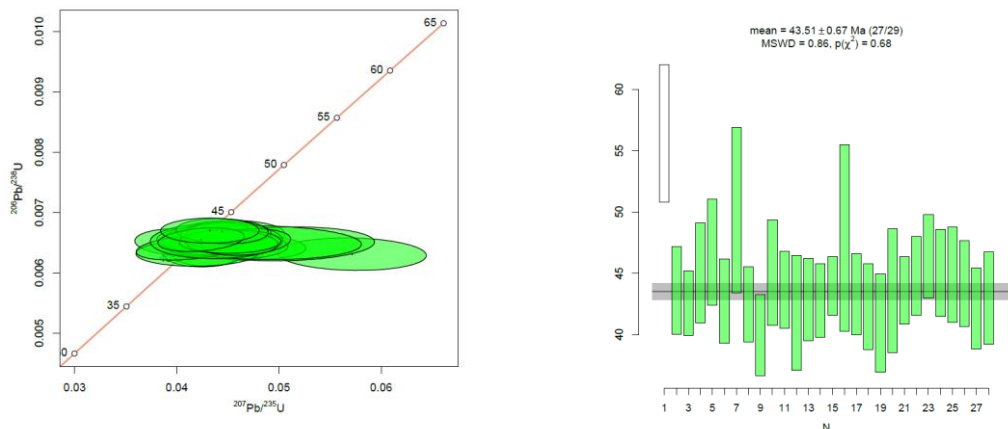


Figura 5.9 Geocronología U-Pb en circón para granitoide ARAG23-16: (a) diagrama de concordia de Wetherill y (b) diagrama de edad ponderada (sobre la base del análisis de 27 granos de 29 totales) con un promedio de 43.51 ± 0.67 Ma (MSWD = 0.86).

Sobre la base de una datación K-Ar en biotita, se puede sugerir una edad de enfriamiento magmático de 39.8 ± 0.9 Ma para la cuarzo-monzodiorita ARAG23-16 (Figura 5.10).

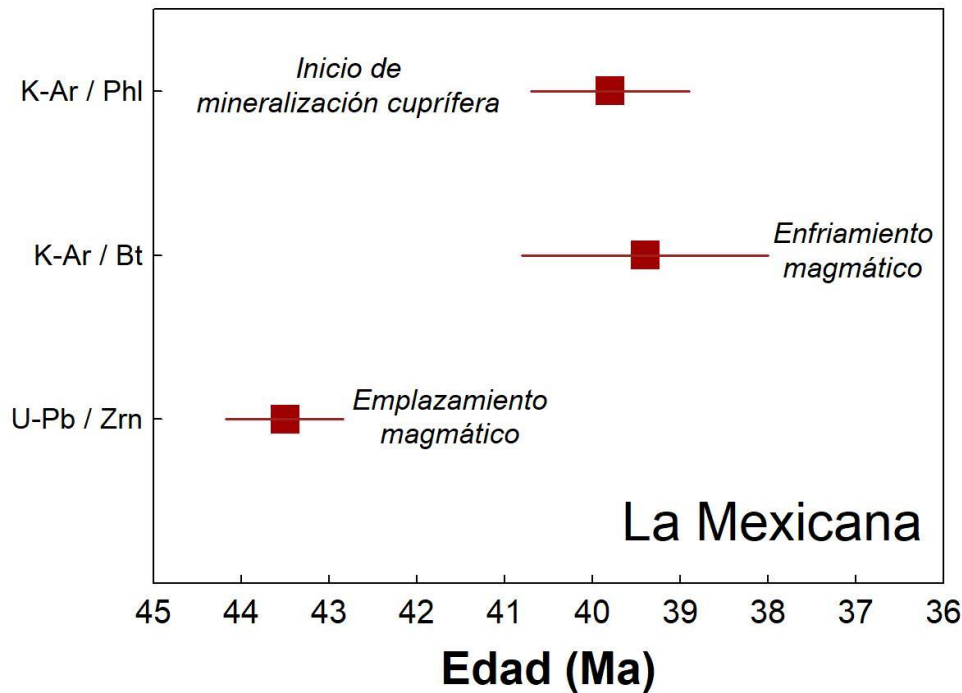


Figura 5.10 Secuencia de eventos asociados al desarrollo del skarn cuprífero La Mexicana.

Estas edades son similares con las reportadas por Ramos-Prado et al. (2025) para el distrito minero de Concepción del Oro-Mazapil, quienes mencionan intrusiones en el intervalo de 43.0 a 41.1 Ma y una mineralización alrededor de 41.3 en los depósitos Sol y Luna y Aranzazú El Cobre (Figura 5.11).

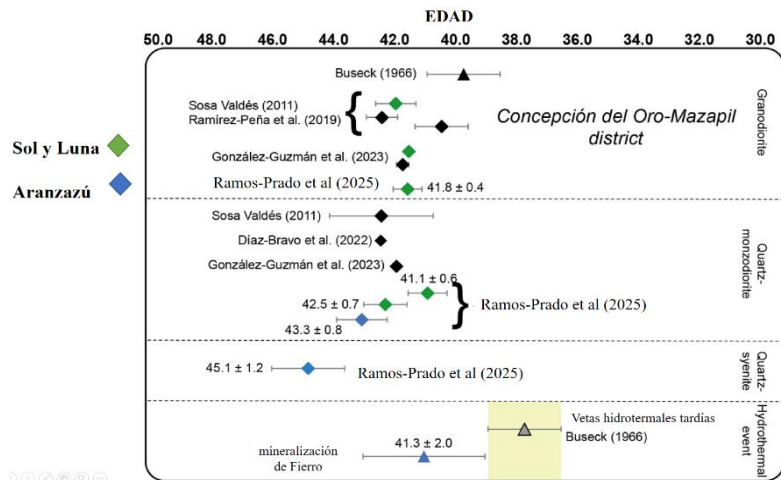


Figura 5.11 Esquema temporal de eventos magmáticos (granodiorita, cuarzo monzodiorita y cuarzo sienita) y de generación de mineralización Fe-Cu en los depósitos Sol y Luna y Aranzazú El Cobre (Ramos-Prado et al., 2025). Los símbolos de rombo indican dataciones U-Pb en circón y los triángulos indican datación K-Ar en micas.

Por otra parte, la geoquímica de los circones eocénicos (43.51 ± 0.67 Ma; $n = 28$) separados de la cuarzo-monzodiorita ARAG23-16 (Tabla 4.10) ha permitido confirmar las inferencias realizadas desde la química de roca total. La mayor parte de los especímenes presentan patrones de lantánidos típicos de circones magmáticos (Hoskin y Schaltegger, 2003): (a) un incremento general de la concentración con el número atómico, (b) una anomalía positiva de Ce y (c) una pequeña anomalía negativa en Eu (Figura 5.12a). Sin embargo, se han detectado algunos granos que muestran un patrón semi-plano en lantánidos ligeros, una característica de circones que han experimentado alteración hidrotermal (Hoskin, 2005; Ramos-Prado et al., 2025).

La asociación de los circones a rocas magmáticas intermedias y félsicas subalcalinas se ha confirmado con contenidos de Hf = 1.0-1.5% e Y = 400 – 900 ppm (Figura 5.12b; Belousova et al., 2003). Los especímenes magmáticos presentan bajos contenidos de La (< 1 ppm) y relaciones $(\text{Sm/La})_N$ elevadas (>10) (Figura 5.12c; Hoskin, 2005). En contraste, aquellos que han experimentado alteración hidrotermal muestran concentraciones de La > 1 ppm y relaciones $(\text{Sm/La})_N$ relativamente bajas (< 5). Finalmente, la población de circones define un arreglo similar al de especímenes procedentes de arcos continentales y sistemas post-colisionales (Figura 5.12d; Grimes et al., 2015).

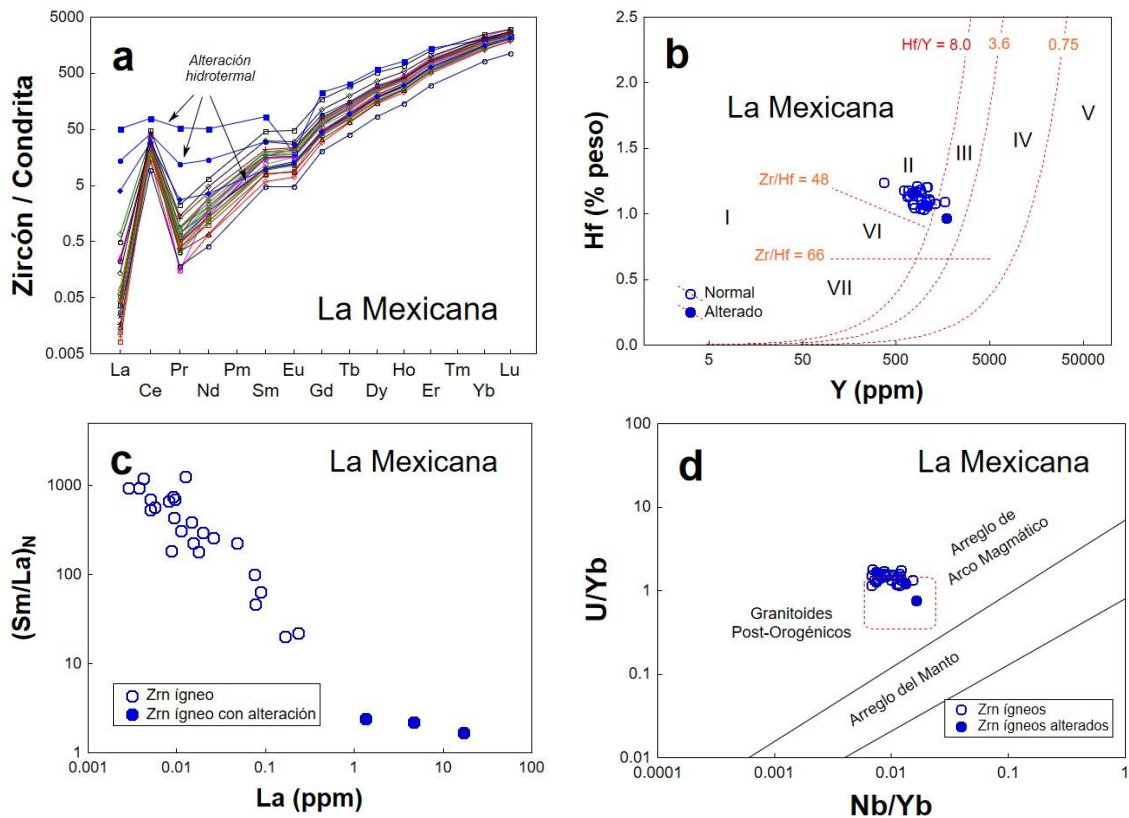


Figura 5.12 Geoquímica de circones separados de la cuarzo-monzodiorita ARAG23-16: (a) diagrama de lantánidos normalizado a condrita (Rollinson, 1993); (b) diagrama Hf – Y (Belousova et al., 2003), I = kimberlitas, II = rocas ultramáficas, máficas e intermedias, III = rocas intermedias y félsicas que incluyen cuarzo, IV = rocas félsicas con alto contenido de SiO₂, V = greisen, VI = rocas alcalinas y VII = carbonatitas; (c) diagrama $(\text{Sm/La})_N$ – La (Hoskin, 2005); diagrama U/Yb – Nb/Yb (Grimes et al., 2015).

5.3 Skarn cuprífero

El skarn cuprífero de La Mexicana se ha generado por la interacción de carbonatos con cantidades variables de arcilla con rocas plutónicas de composición intermedia a ácida. El metamorfismo de contacto de las margas dio lugar a la acumulación de granate y piroxeno, que caracterizan a la etapa progradada del sistema. El metasomatismo generó alteraciones fílica, propilitica y potásica en la roca caja durante la etapa retrogradada. Esto derivó en la formación de una mena de calcopirita. Posteriormente, en una etapa supergénica, el cobre se presenta en malaquita.

Esta evolución del sistema se puede apreciar en diagramas de variación de relaciones de elementos mayores y traza en función de SiO_2 (Figura 5.13a-f). Cabe destacar el incremento significativo en la relación $\text{Fe}_2\text{O}_3^t/\text{MgO}$ desde los carbonatos y la roca plutónica (<10) hacia el skarn (~ 100) (Figura 5.13b). Esta observación se correlaciona con un incremento de magnetita y hematita al inicio de la etapa retrogradada. En contraste, el sistema se caracteriza por presentar relaciones relativamente bajas de elementos litófilos (Ba/La y Sr/Y ; Figura 5.13e-f). Es evidente un control de K_2O sobre el Na_2O , con relaciones $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} < 2$ para todas las muestras (Figura 5.13d). Esto se refleja por la acumulación de flogopita y muscovita durante la etapa retrogradada.

La fugacidad de oxígeno es uno de los factores que controlan el enriquecimiento de Fe y Cu en un skarn (Yao *et al.*, 2017). Condiciones de baja fugacidad de oxígeno limitan la cristalización de óxidos de Fe-Ti, mientras que permiten la formación de silicatos con una abundancia relativamente baja de Fe (por ejemplo, olivino o plagioclasa). En contraste, un ambiente con una alta fugacidad de oxígeno provoca que los elementos calcófilos permanezcan en el fluido y favorezca su mineralización como sulfuros.

La relación $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_N$ en circón ha sido utilizada como un indicador de óxido-reducción en líquidos magmáticos. Los circones incluidos en la cuarzo-monzodiorita ARAG23-16 se caracterizan por mostrar relaciones de $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_N = 2.5 - 457$ ($n = 29$) con una mediana = 84.5, un valor que indica una tendencia a condiciones oxidantes (Figura 5.14). En el patrón de lantánidos normalizado a condrita se refleja en una marcada anomalía positiva de Ce (Figura 5.12a).

La parte retrogradada del sistema La Mexicana se caracteriza por mostrar contenidos de Cu (21,000-35,000 ppm) que pueden considerarse los esperados para una mena de interés económico (Figuras 5.15a-d; Oyman, 2010). Como se ha mostrado en el análisis petrográfico, el elemento ocurre principalmente en forma de calcopirita. Además, el Cu está acompañado por concentraciones relativamente altas de Fe ($\sim 23\%$ como Fe_2O_3^t), Co (14-23 ppm), Zn (90-260 ppm) y Mo (2480 ppm).

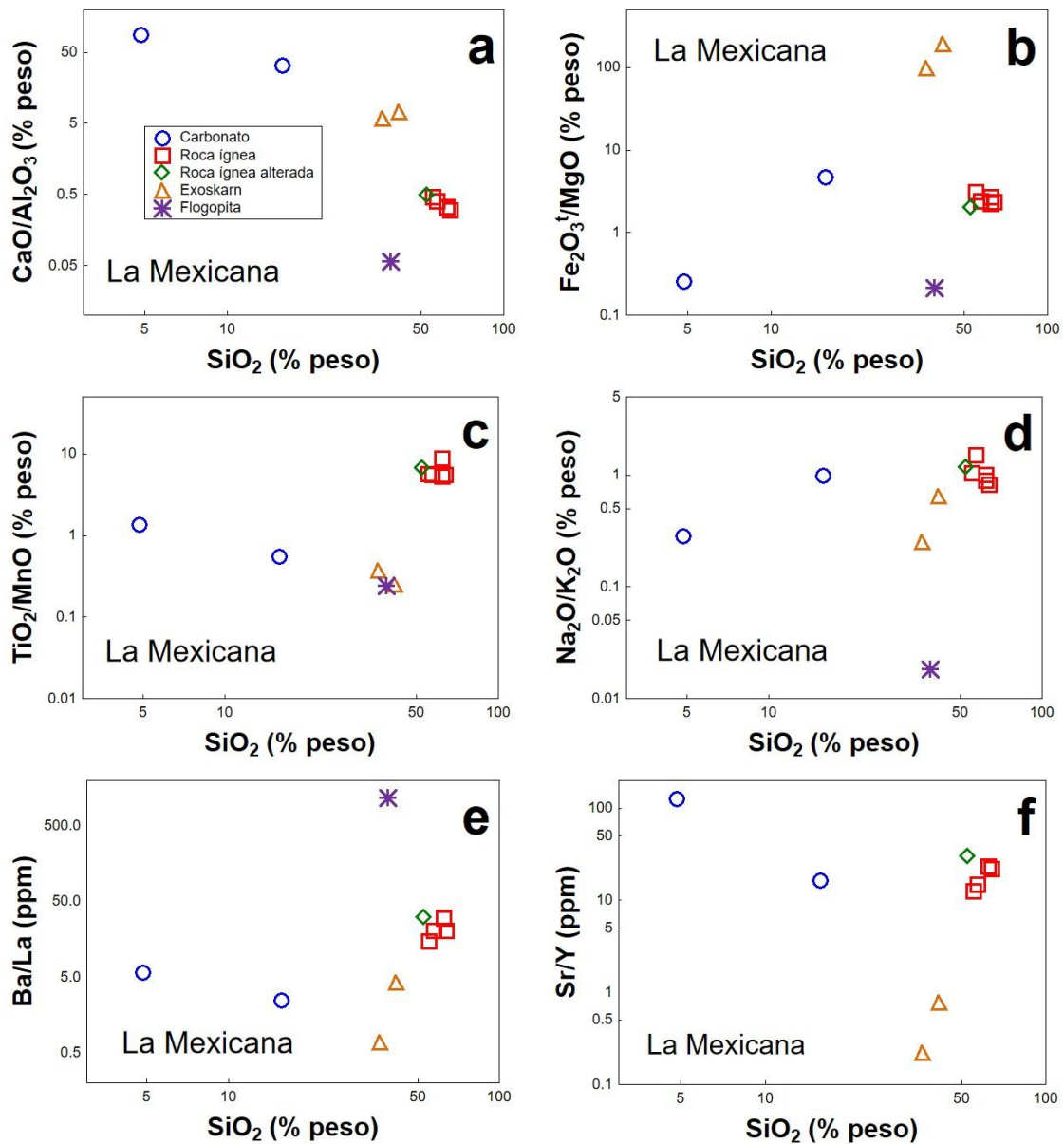


Figura 5.13 Diagramas de variación geoquímica en función de SiO_2 para el sistema de skarn La Mexicana, que involucra carbonatos, roca ígnea, roca ígnea alterada y exoskarn: (a) relación $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, (b) relación $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$, (c) relación TiO_2/MnO , (d) relación $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$, (e) relación Ba/La y (f) relación Sr/Y .

Por otra parte, un ejercicio de análisis de correlación (r^2) indica una asociación limitada de Cu con Fe_2O_3 (0.73), Ga (0.64), Sr (0.50), Na_2O (0.43), Cr (0.42), TiO_2 (0.36), MnO (0.33) y Zn (0.30). Es importante señalar que la mena de cobre, representada por la calcopirita, se ha encontrado en contacto con óxidos de hierro.

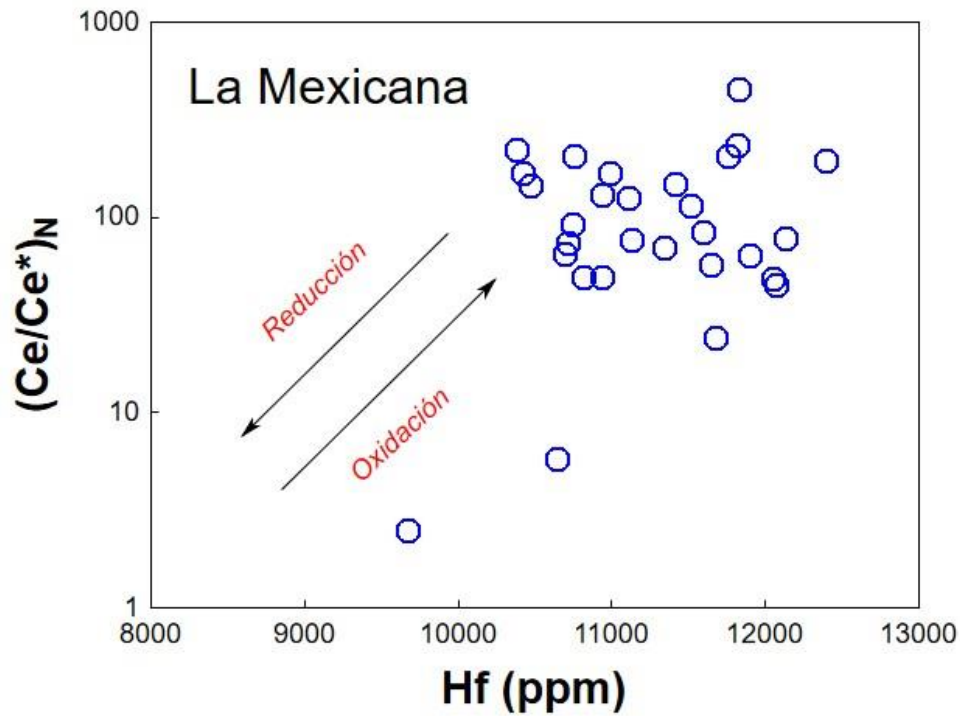


Figura 5.14 Diagrama $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_N$ – Hf para circón de la cuarzomonzodiorita ARAG23-16. La relación $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_N = [\text{Ce}/0.91]/\{ [\text{Nd}/0.64]^2/[\text{Sm}/0.195] \}$ de acuerdo con Yao et al. (2017) y donde los valores numéricos corresponden a datos de normalización de condrita (Rollinson, 1993).

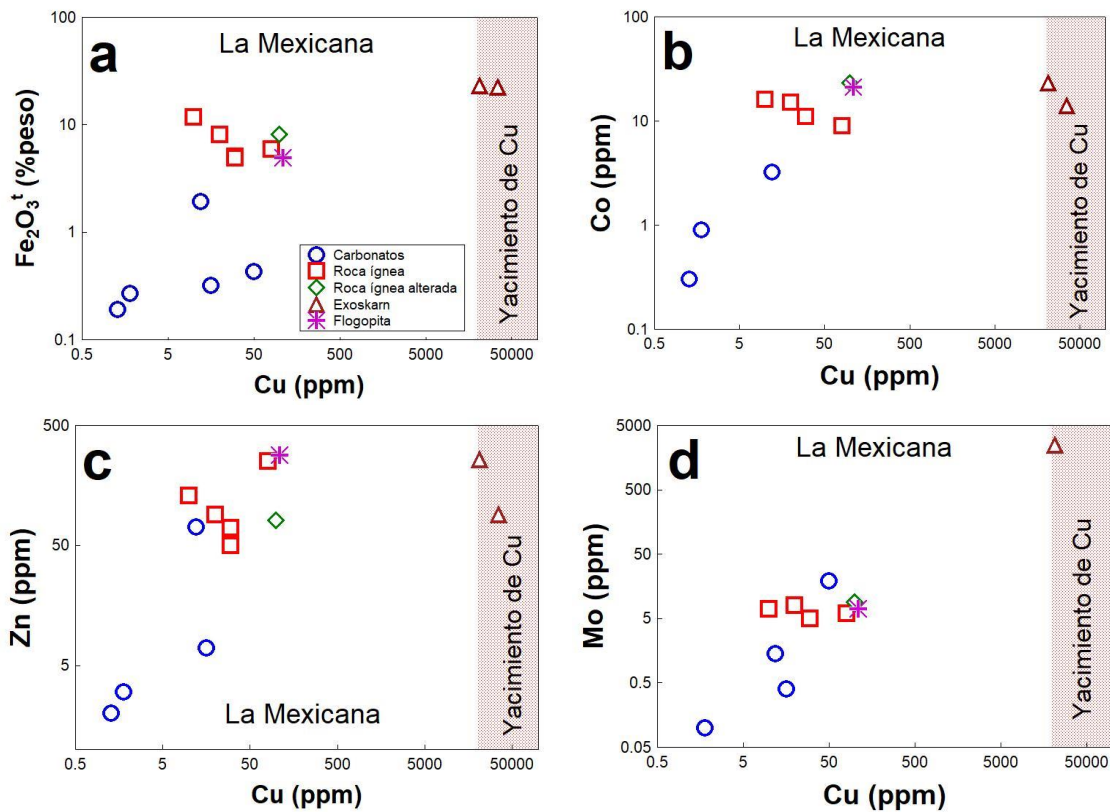


Figura 5.15 Diagramas de variación en función de Cu para el sistema de skarn La Mexicana: (a) Fe_2O_3^t , (b) Co, (c) Zn, y (d) Mo. Una concentración de Cu $\geq 20,000$ ppm es considerada como la esperada para una mena de interés económico (Oyman, 2010).

5.4 Modelo paragenético

La integración de información mineralógica, geoquímica y geocronológica ha permitido proponer un modelo evolutivo de mineralización (Figura 5.16): (a) Inicialmente, se tienen las litologías sedimentarias sin alteración; (b) la penetración de un plutón da lugar a un metamorfismo isoquímico de las rocas sedimentarias, caracterizado por la generación de granate y piroxeno; (c) la interacción del magma y la incorporación de fluidos en la caliza marmolizada da lugar al desarrollo de alteraciones ($\text{Phl} + \text{Chl} + \text{Epd} + \text{Cal}$) y (d) el desarrollo de la mena de cobre (Ccp) acompañado de $\text{Py} + \text{Sp} + \text{Gn}$.

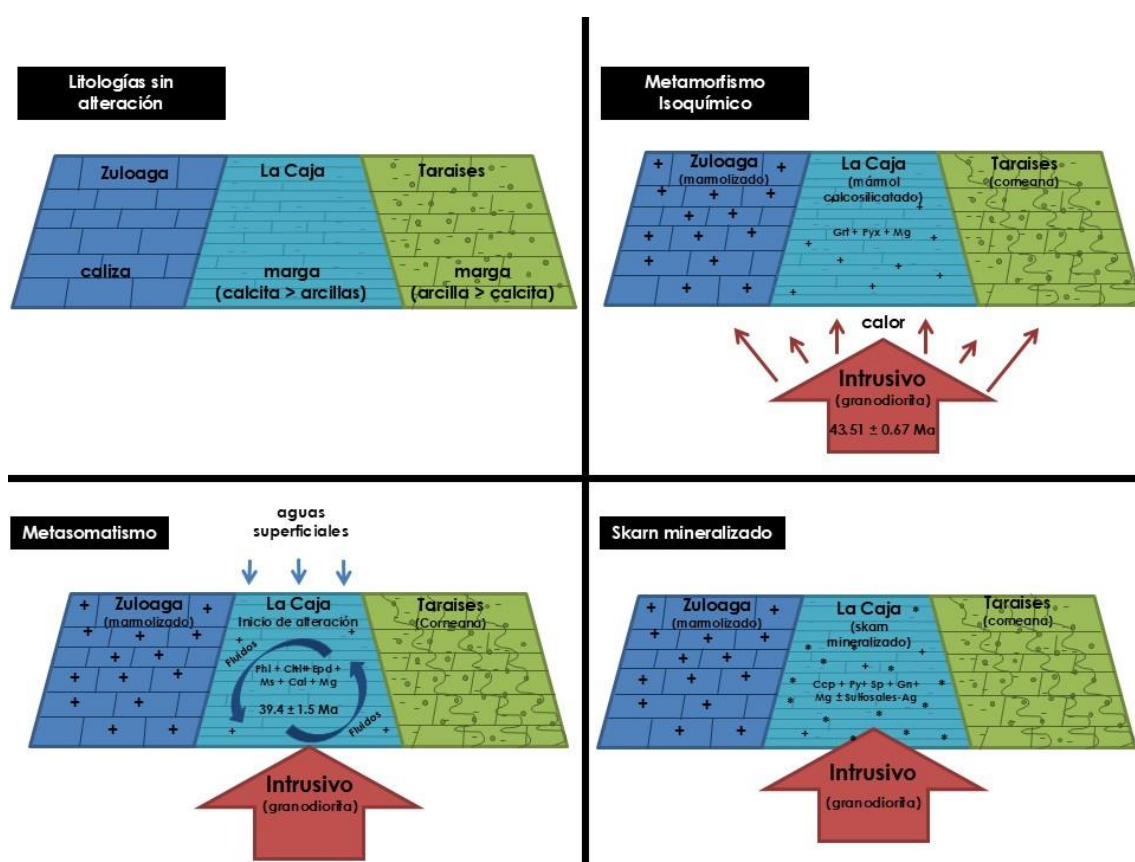


Figura 5.16 Modelo evolutivo de mineralización de Cu para el skarn La Mexicana, Distrito Concepción del Oro, Zacatecas. Abreviaturas: Cal = calcita, Ccp = calcopirita, Chl = clorita, Epd = epidota, Gn = galena, Grt = granate, Mg = magnetita, Phl = flogopita, Py = pirita, Pyx = piroxeno, Sp = esfalerita. La datación de la granodiorita se efectuó con un método U-Pb en circón. La datación del inicio de la alteración se efectuó con un método K-Ar en flogopita.

Los ensambles minerales que describen las etapas de desarrollo del skarn cuprífero se muestran en un modelo paragenético (Figura 5.17), en el que, además del mineral de la mena de Cu, se incluyen aquellos de tipo ganga que complementan a la mineralización. El evento metasomático-hidrotermal que generó el yacimiento se puede diferenciar en tres etapas principales: (a) prógrada, (b) retrograda (subdividida en tres fases) y, por último, (c) una alteración supergénica.

Mineral	Metamorfismo - Metasomatismo				Alteración supergénica
	progrado	retrogrado			
		Etapa I	II	III	
Andradita-Grosularia	————				
Diópsida					
Wollastonita	————				
Cuarzo	————				————
Vesuvianita	——				
Titanita	——				
Tremolita-Actinolita		——			
Turmalina					
Apatito					
Flogopita		————			
Muscovita		——			
Epidota			————		
Clorita			————		
Sulfosales de Ag					
Magnetita					
Calcopirita			————	————	
Pirita					
Galena					
Esfalerita					
Calcita	————				————
Hematita					——
Malaquita					————

Figura 5.17 Modelo paragenético del skarn cuprífero La Mexicana, Concepción del Oro, Zacatecas.

- (a) **Etapa progradada:** Esta marca el inicio en el desarrollo del skarn y suele relacionarse con altas temperaturas, debido a la interacción del intrusivo con la roca encajonante. Los primeros minerales que aparecen suelen ser calcosilicatos, que incluyen diópsido $[\text{CaMgSi}_2\text{O}_6]$, granate (andradita $[\text{Ca}_3(\text{Fe}^{3+})_2(\text{SiO}_4)_3]$ – grosularia $[\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3]$; $\text{An}_{42-70}\text{Gr}_{30-60}$) y wollastonita $[\text{CaSiO}_3]$, acompañados de vesuvianita $[\text{Ca}_{10}(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_4(\text{SiO}_4)_5(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{OH}, \text{F})_4]$ y titanita

[CaTiSiO₅] que son indicativos de un ambiente rico en Ca, Si y Ti. Es importante señalar que la calcita [CaCO₃] y el cuarzo [SiO₂] aparecen en esta etapa y durante toda la formación del depósito.

(b) Etapa retrograda: *Fase I* – Durante el enfriamiento posterior al pico máximo de temperatura (e.g., interacción del intrusivo con la roca encajonante), el sistema se caracteriza por mostrar magnetita Fe₃O₄ primaria, silicatos reemplazados por tremolita [Ca₂Mg₅Si₈O₂₂(OH)₂] y actinolita [Ca₂(Mg, Fe⁺²)₅Si₈O₂₂(OH)₂], así como por la aparición de minerales potásicos hidratados: flogopita [KMg₃(SiAl₃O₁₀)(OH)₂], con una edad K-Ar de 39.8 ± 0.9 Ma y muscovita [KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂]. Además este arreglo es acompañado por turmalina [(Na,Ca)(Al,Fe,Li)(Al,Mg,Mn)₆(BO₃)₃(Si₆O₁₈)(OH,F)₄] y apatito [Ca₅(PO₄)₃(F,Cl,OH)], que indican el enriquecimiento del fluido en boratos, fósforo y magnetita Fe₃O₄. *Fase II* – la disminución de la temperatura genera el desarrollo de cuarzo SiO₂, epidota [Ca₂Fe³⁺Al₂(Si₂O₇)(SiO₄)O(OH)], siendo también acompañada de clorita [(Mg,Fe²⁺)₅Al(Si₃Al)O₁₀(OH)₈], la cual sustituye a micas y anfíboles y pirita FeS₂. Epidota y clorita son minerales típicos de ambientes oxidados. *Fase III* - este estadio, en condición oxidante, se caracteriza por la formación de magnetita [Fe₃O₄] y, a una menor temperatura, de calcopirita [CuFeS₂], que representa la mena principal del depósito. Pirita [FeS₂], esfalerita [ZnS] y galena [PbS] precipitan como fases tardías de la etapa retrograda y algunos sulfosales que contienen plata.

(c) Etapa supergénica: El sistema cerró con la precipitación de hematita [Fe₂O₃] y malaquita [CuSO₄].

CONCLUSIONES

El trabajo de campo permitió reconocer dos unidades sedimentarias carbonatadas de la SMOr involucradas en el proceso de formación del skarn La Mexicana: Formación La Caja [Kimmerigdiano-Tithoniano] y la Formación Taraises [Berriasiano-Valanginiano] ambas formaciones consisten en estratos de margas intercaladas con estratos arcillosos. Estas fueron depositadas en un ambiente de mar abierto de profundidad somera entre el Jurásico Superior – Cretácico Inferior.

Estas unidades sedimentarias fueron penetradas por plutones de composición de granodiorítica a sienodiorítica dando lugar al desarrollo de un skarn. Este emplazamiento ocurrió aproximadamente durante el Eoceno (~43.5 Ma; U-Pb en circón). Se cuenta con evidencia geocronológica (K-Ar en biotita) del enfriamiento del plutón hasta ~39.8 Ma. Las rocas intrusivas de textura porfirítica a fanerítica (plagioclasa + cuarzo + feldespato-K + biotita ± titanita + clorita ± clinopiroxeno ± apatito + sericita) muestran características de magmas cordilleranos, sub-alcalinos y meta-aluminosos. Su génesis se dio por fusión parcial en la interfase manto/corteza inferior con una asimilación parcial de corteza superior en un ambiente post-orogénico.

La composición del magmatismo fue favorable para, al interactuar con los carbonatos y generar un skarn cuprífero. La paragénesis ocurrió en tres etapas:

(1) *etapa prograda*: se caracteriza por la generación de un mármol de calcosilicatos en la Formación La Caja, con un arreglo mineral de piroxeno (diópsida) + granate (grosularia-andradita, $\text{Gr}_{55-30}\text{An}_{41-70}$) + wollastonita + vesuvianita + titanita ($\text{Fe} = 0.05-0.10$ apfu; $\text{Al} \sim 0.1$ apfu) + cuarzo + calcita. El arreglo diópsida-grosularia-andradita indica condiciones favorables para el desarrollo de un skarn cuprífero.

(2) *etapa retrograda*: esta se subdivide en tres fases de evolución. La primera se distingue por la alteración de silicatos hacia tremolita y actinolita acompañada de cuarzo y minerales potásicos hidratados (flogopita y muscovita), además de turmalina y apatito. La segunda etapa se caracteriza por la formación de epidota ferrosa ($\text{FeO} = 25-32\%$), así como la alteración de micas y anfíboles hacia clorita (trioctahédrica con tendencia a clinocloro; $T = 231-245^\circ\text{C}$). Al incrementar las condiciones de oxidación ($[\text{Ce}/\text{Ce}^*] \sim 84.5$) se produce la cristalización de magnetita (Fe_3O_4) y calcopirita (CuFeS_2 ; $\text{Cu} = 34.2-34.4\%$, $\text{Fe} = 28.8-30.0\%$), la mena del depósito ($\text{Cu} = 21,000-35,000$ ppm en el exoskarn). Cabe señalar que la calcopirita incluye acumulaciones de As, Au y Pb. En la parte final de esta etapa precipitan sulfuros (pirita, esfalerita, galena) y sulfosales de Ag.

(3) *etapa supergénica*: el sistema cierra con la formación de hematita y malaquita.

La combinación de diferentes herramientas, que incluyen trabajo de campo, análisis mineralógico, geoquímica y datación geocronológica, ha permitido proponer un cuadro paragenético para el skarn de Cu La Mexicana en el Distrito Minero de Concepción del Oro-Mazapil.

REFERENCIAS

- Aranda-Gómez, J.J., Housh, T.B., Luhr, J.F., Henry, C.D., Becker, T., Chávez-Cabello, G. 2005** Reactivation of the San Marcos fault during mid- to late Tertiary extension, Chihuahua, México. En: Nourse, J.A., Anderson, T.H., McKee, J.W., Steiner, M.B. (Eds.), *The Mojave-Sonora megashear hypothesis: Development, assessment, and alternatives*. Geological Society of America Special Paper 393, 509-522.
- Barboza-Gudiño, J.R., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., Martínez-Macias, P.R. 2004** Contributions to the stratigraphic and structural interpretation of the northwestern portion of the Sierra de Catorce, San Luis Potosi, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 21, 299-319.
- Barra, F., Ruiz, J., Valencia, V.A., Ochoa-Landín, L., Chesley, J.T., Zürcher, L. 2005** Laramide porphyry Cu-Mo mineralization in northern Mexico: Age constraints from Re-Os geochronology in molybdenites: *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists* 100, 1605–1616.
- Barton, M.D., Staude, J.M., Zürcher, L., Megaw, P.K.M. 1995** Porphyry copper and other intrusion-related mineralization in Mexico, in Pierce, F.W., and Bolm, J.G., eds., *Porphyry copper deposits of the American Cordillera: Arizona Geological Society Digest* 20, 487–524.
- Belousova, E.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., Fisher, N.L. 2002** Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 143, 602-622.
- Bermúdez, C., Sole Vinas, J., Pi Puig, T. 2024** K-Ar Laser Ablation Dating of Clay Minerals with Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (libs) and Mass Spectrometry. In *Geological Society of America Abstracts* 56, 403275.
- Bhutada, G. 2021** The largest copper mines in the world by capacity. *Elements*. Recuperado de: <https://elements.visualcapitalist.com/the-largest-copper-mines-in-theworld-by-capacity/>
- Brady, J., Perkins, D. 2017** Mineral formulae recalculation. SERC Carleton College http://serc.carleton.edu/research_education/equilibria/mineralformulaerecalculation.html. Accessed, 31.
- Brown, A.C. 1992** Sediment-hosted stratiform copper deposits. *Geoscience Canada* 19, 125-141.
- Bunaciu, A.A., Udriștioiu, E.G., Aboul-Enein, H.Y. 2015** X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 45, 289-299.
- Burckhart, C. 1906** Geología de la Sierra de Concepción del Oro. X Congreso Geológico Internacional, Guía de Excursión, 24 pp.
- CAMIMEX (Cámara Minera de México) 2023** Dos municipios aportan casi toda la producción de cobre en Sonora. Recuperado de: [Dos municipios aportan casi toda la producción de cobre en Sonora - México Minero \(mexicomintero.org\)](#)
- Camprubí, A. 2017** The metallogenic evolution in Mexico during the Mesozoic, and its bearing in the Cordillera of Western North America. *Ore Geology Reviews* 81, 1193-1214.
- Chávez-Cabello, G., Aranda-Gómez, J.J., Molina-Garza, R.S., Cossío-Torres, T., Arvizu-Gutiérrez, I.R., González-Naranjo, G. 2004** La Falla San Marcos: una estructura jurásica de basamento multireactivada del noreste de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 57, 27-52.
- Chelle-Michou, C., Rottier, B., Caricchi, L. 2017** Tempo of magma degassing and the genesis of porphyry copper deposits. *Scientific Reports* 7, Article 40566. <https://doi.org/10.1038/srep40566>

- Cherniak, D.J., Watson, E.B. 2001** Pb diffusion in zircon. *Chemical Geology* 172, 5-24.
- Clark, K.F., Foster, C.T., Damon, P.E. 1982** Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 93, 533–544.
- Clark, R.N., King, T.V., Klejwa, M., Swayze, G.A., Vergo, N. 1990** High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 95, 12653-12680.
- Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J. 1979** Compositional variation in magmas. In: *The Interpretation of Igneous Rocks*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3373-1_2
- Crispín, A.S., Enríquez-Denton, F.J. 1996** La producción de cobre en el mundo y sus rasgos territoriales básicos en México a fines del siglo XX. *Ería* 41, 213-226.
- Damon, P.E., Clark, K.C., Shafiqullah, M. 1983** Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences* 20, 1052–1071.
- Del Real, I., Reich, M., Simon, A.C., Deditius, A., Barra, F., Rodríguez-Mustafa, M.A., Thompson, J.F.H., Roberts, M.P. 2023** Formation of giant iron oxide—copper-gold deposits by superimposed episodic hydrothermal pulses. *Scientific Reports* 13, Article 12041. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37713-w>
- Díaz-Bravo, B.A., Ortega-Obregón, C., Barboza-Gudiño, J.R. 2022** U–Pb geochronology of intrusive rocks of northwestern Mesa Central province and Sector Transversal of Sierra Madre Oriental, Mexico: Time and space distribution of inland Cretaceous–Paleogene magmatism during Mexican orogeny. *Journal of South American Earth Sciences* 119, Article 103989. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103989>
- Einaudi, M.T., Burt, M.D. 1982** Introduction, Terminology, Classification, and Composition of Skarn Deposits. *Economic Geology* 77, 745-754.
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García, M., Marrett, R. 2000** Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 53, 1-26.
- Enciso de La Vega, S. 1963** Resumen de la Geología de la Hoja Nazas, Estado de Durango. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas de México serie 1:100,000, 1 mapa con texto.
- Evans, A.M. 1987** Ore geology and industrial minerals. Wiley, 2nd. Edition, 389 p.
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.J., Frost, C.D. 2001** A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology* 42, 2033-2048.
- Frost, B.R., Frost, C.D. 2008** A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Journal of Petrology* 49, 1955-1969.
- George, L.L., Cook, N.J., Crowe, B.B., Ciobanu, C.L. 2018** Trace elements in hydrothermal chalcopyrite. *Mineralogical Magazine*, 82, 59-88.
- González-Bernal, R. 2018** Procesos relacionados al metamorfismo de contacto en el Yacimiento de Sol y Luna, Concepción del Oro, Zacatecas: Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, 91 p.
- González-Guzmán, R., Velasco-Tapia, F., Weber, B., Schaaf, P., Sosa-Valdés, R., Solari, L. 2023** Magmatic source, petrogenesis, and tectonic setting of the Concepción del Oro Igneous Complex: a geochemical and isotopic (Rb–Sr and Sm–Nd) study of a late complex of the Cretaceous–Eocene Mexican Magmatic Arc. *International Journal of Earth Sciences* 112, 1413-1434.

- González Mancera, G., Noguez Amaya, M.E. 2024** Principios de microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X característicos. Ed. Facultad de Química, UNAM, 143 p.
- Gorton, M.P., Schandl, E.S. 2000** From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *Canadian Mineralogist* 38, 1065-1073.
- Grimes, C.B., Wooden, J.L., Cheadle, M.J., John, B.E. 2015** “Fingerprinting” tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 170, 1-26.
- Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D., Hitzman, M. 2010** Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposits through Earth History: Implications for Origin, Lithospheric Setting, and Distinction from Other Epigenetic Iron Oxide Deposits. *Economic Geology* 105, 641-654.
- Hess, J.C., Lippolt, H.J. 1994** Compilation of K/Ar measurements on HD-B1 standard biotite; 1994 status report. In *Phanerozoic Time Scale. Bulletin de Liaison et d’information, IUGS Subcommission, Geochronology, Paris, France* 12, 19-23.
- Hitzman, M.W. 2000** Iron oxide-Cu-Au deposits: what, where, when, and why. En: Porter, T.M. (Ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, 9-25.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., Einaudi, M.T. 1992** Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research* 58, 241-287.
- Hitzman, M.W., Selley, D., Bull, S. 2010** Formation of Sedimentary Rock-Hosted Stratiform Copper Deposits through Earth History. *Economic Geology* 105, 627–639. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.627>
- Hoskin, P.W. 2005** Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 637-648.
- Hoskin, P.W., Schaltegger, U. 2003** The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 53, 27-62.
- ICSG (International Copper Study Group) 2023** The World Copper Factbook 2023; Rua Almirante Barroso 38 – 6th 1000-013 Lisbon, Portugal.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) 2010** Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50,000 serie III. F13B58 (Zacatecas).
- Imlay, R.W. 1936** Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico. Part IV Geology of the Western part of the Sierra de Parras. *Geological Society of America Bulletin* 47, 1091-1152.
- Imlay, R.W. 1937** Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 48, 567-630.
- Imlay, R. 1938** Studies of the Mexican geosyncline. *Geological Society of America Bulletin* 49, 1651–1694.
- Kleine, B.I., Stefánsson, A. 2018** Hypogene. En: White, W.M. (Ed.), *Encyclopedia of Geochemistry*. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39312-4_67
- Kowallis, B.J., Christiansen, E.H., Dorais, M.J., Winkel, A., Henze, P., Franzen, L., Mosher, H. 2022** Variation of Fe, Al, and F substitution in titanite (sphene). *Geosciences*, 12, Article 229. <https://doi.org/10.3390/geosciences12060229>
- Kyle, J.R. 1999** Industrial-Mineral Resources Associated with Salt Domes, Gulf of Mexico Basin, USA. *Oklahoma Geological Survey*, 161-178.

- Lee, M.H., Jang, S.H., Chung, C.W. 2006** On the multistep ionizations in an argon inductively coupled plasma. *Physics of Plasmas* 13, Article 053502. <https://doi.org/10.1063/1.2193535>
- Liggins, F., Vichi, A., Liu, W., Hogg, A., Kogou, S., Chen, J., Liang, H. 2022** Hyperspectral imaging solutions for the non-invasive detection and automated mapping of copper trihydroxychlorides in ancient bronze. *Heritage Science* 10, doi: 10.1186/s40494-022-00765-8.
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M. 1989** Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin* 101, 635-643.
- Martinez, J.D. 1991** Salt domes. *American Scientist* 79, 420-431.
- MacKenzie, W. S., Donaldson, C.H., Guilford, C. 1996.** *Atlas de rocas ígneas y sus texturas*. Ed. Masson, Barcelona.
- Meinert, L.D. 1982** Skarn, mantle, and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea Mining District, Sonora, Mexico. *Economic Geology* 77, 919-949.
- Meinert, L.M. 1992** Igneous Petrogenesis and Skarns and skarn. *Geoscience Canada* 19, 145–162.
- Meinert, L.D., Hedenquist, J.W., Satoh, H., Matsuhisa, Y. 2003** Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au deposits by magmatic fluids. *Economic Geology* 98, 147-156.
- Meinert, L.M. 2020** 3. The genesis and exploration of skarn deposits. *Geochemical Perspectives* 9, 17-41.
- Meinert, L.D., Dipple, G.M., Nicolescu, S. 2005** World skarn deposits. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 299–336.
- Misra, K.C. 2000** Skarn deposits. En: Misra, K.C. (Ed.), *Understanding Mineral Deposits*. Springer, Dordrecht, 414-449.
- Mineriaenlinea 2022** *Mineriaenlinea.com. Todo lo que necesitas saber sobre los depósitos VMS* Recuperado en 2024: <https://mineriaenlinea.com/articulos/todo-lo-que-necesita-saber-sobre-los-depositos-vms/>
- Moga, T.G 2012** Counting on copper. *Nature Chemistry* 4, Article 334. <https://doi.org/10.1038/nchem.1315>
- Muir, J.M. 1936** Geology of the Tampico Region, Mexico. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1-280. <https://doi.org/10.1306/SV8338>
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., Camprubí, A. 2005** La Mesa central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín Sociedad Geológica Mexicana* 57, 285-317.
- Ocampo-Díaz, Y.Z.E., Pinzon-Sotelo, M.P., Chavez-Cabello, G., Ramirez-Díaz, A., Martinez-Paco, M., Velasco-Tapia, F., Guerrero-Suastegui, M., Barboza-Gudino, J.R. 2016** Propuesta nomenclatural y análisis de procedencia de la Formación Concepción del Oro (antes Formación Caracol): implicaciones sobre la evolución tectónica del sur de Norteamérica durante el Cretácico Tardío. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 33, 3-33.
- Oyman, T. 2010** Geochemistry, mineralogy and genesis of the Ayazmant Fe–Cu skarn deposit in Ayvalik, (Balıkesir), Turkey. *Ore Geology Reviews* 37, 175-201.
- Park, J.W., Campbell, I.H., Chiaradia, M., Hongda, H., Lee, C.-T. 2021** Crustal magmatic control on the formation copper deposits. *Nature Reviews Earth & Environment* 2, 542–557 <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00182-8>
- Paton, C., Woodhead, J.D., Hellstrom, J.C., Hergt, J.M., Greig, A., Maas, R. 2010** Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11, <https://doi.org/10.1029/2009GC002618>

- Pearce, J.A., Harris, N.B., Tindle, A.G. 1984** Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956-983.
- Pearce, J. 1996** Sources and settings of granitic rocks. *Episodes* 19, 120-125.
- Petrus, J.A., Kamber, B. S. 2012** VizualAge: A novel approach to laser ablation ICP-MS U-Pb geochronology data reduction. *Geostandards and Geoanalytical Research* 36, 247-270.
- Piercey, S.J. 2010** An overview of petrochemistry in the regional exploration for volcanogenic massive sulphide (VMS) deposits. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 10, 119-136.
- Pirajno, F. 2009** *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer-Verlag, Perth, Australia.
- Potts, P.J. 1987** *A Handbook of silicate rocks*. Springer, Dordrecht, 622 p.
- Ramírez-Peña, C.F. 2011** *Cartografía y análisis estructural del intrusivo Santa Rosa, Concepción del Oro Zacatecas, México*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, 177 p.
- Ramírez, I.T. 2024** La industria mundial del cobre: cambios territoriales y desafíos socioambientales en el siglo XXI. *Región y Sociedad* 36, 1858-1860.
- Ramos-Prado, L. M., Velasco-Tapia, F., Rodríguez-Díaz, A.A., Ramírez-Fernández, J.A., Canet-Miquel, C., González-Guzmán, R., Castillejo-Carreón, J.C., De Ignacio, C., Fuentes-Guzmán, E., Linares, C. 2025** Mineralogy, geochemistry, geochronology, and fluid inclusion constraints of the Concepción del Oro-Mazapil Fe-Cu skarns, central Mexico. *Journal of South American Earth Sciences* 151, Article 105268. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105268>
- Reed, S.J.B. 2005** *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Cambridge University Press, 215 p.
- Ridley, J. 2013** *Ore deposit geology*. Cambridge University Press, 409 p.
- Rogers, C., de Cserna, Z., Tavera-Amezcu, E., Vloten, R., Ojeda-Rivera, J. 1961** Reconocimiento geológico y depósitos de fosfatos del norte de Zacatecas y áreas adyacentes en Coahuila. *Boletín del Consejo de Recursos Naturales No Renovables* 56, 332-428.
- Rollinson, H. 1993** *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific & Technical. Essex, U.K., 352 p.
- Rudnick, R., Gao, S. 2005** Composition of the continental crust. *Treatise of Geochemistry* 3, 1-64.
- Sawkins, F.J. 1984** *Minerals and rocks: Metal Deposits in relation to Plate Tectonics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 17, 14-60.
- Schwartz, M.O. 1996** Native copper deposits and the disposal of high-level waste. *International Geology Review* 38, 33-41.
- Seedorff, E., Dilles, J.H., Proffett, J.M., Einaudi, M.T., Zurcher, L., Stavast, W.J., Barton, M.D. 2005** Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Society of Economic Geologists, 100th Anniversary Volume*, 251-298
- SGM (Servicio Geológico Mexicano) 2004** *Carta geológica-minera Concepción del Oro G14-C62*. (Escala 1:50000). Zacatecas- Coahuila. Servicio Geológico Mexicano (antes Consejo de Recursos Minerales), Secretaría de Economía, Gobierno Federal.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano) 2014** *Panorama Minero: Estado de Zacatecas*, 61 pp.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano) 2017** *Los Minerales*, <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Los-minerales.html>
- Shaofeng, L., Shuixing, F. 2016** A research review of iron oxide copper-gold deposits. *Acta Geologica Sinica-English Edition* 90, 1341-1352.

- Sillitoe, R.H. 2010** Porphyry copper systems. *Economic Geology* 105, 3-41.
- Singer, D.A., Berger, V.I., Moring, B.C. 2005** Porphyry copper deposits of the world: database, map, and grade and tonnage models. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1060. <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1060/>
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S.A., Morris, G.A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M.N., Whitehouse, M.J. 2008** Plešovice zircon—a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology* 249, 1-35.
- Solano-Rico, B. 1995** Some geologic and exploration characteristics of porphyry copper deposits in the Sierra Madre del Sur province, southwestern Mexico. En: Pierce, F.W., Bolm, J.G. (Eds.), *Porphyry copper deposits of the American Cordillera*. Arizona Geological Society Digest 20, 545–550.
- Solari, L.A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J.P., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M. 2010** U-Pb zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS microanalytical workstation: Achievements in precision and accuracy. *Geostandards and Geoanalytical Research* 34, 5-18.
- Streckeisen, A., 1976** To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews* 12, 1–33.
- Téllez Ramírez, I. 2024.** La industria mundial del cobre: cambios territoriales y desafíos socioambientales en el siglo XXI. *Región y Sociedad* 36, e1858. <https://doi.org/10.22198/rys2024/36/1858>
- Titley, S.R., Beane, R.E. 1981** Porphyry copper deposits. *Economic Geology* 75th Anniversary Volume, 214-269.
- Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., Noguez-Alcántara, B., Ruiz, J., Pérez-Segura, E. 2006** Características metalogénicas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 58, 1-26.
- Valencia-Moreno, M., Camprubi, A., Ochoa-Landin, L., Calmus, T., Mendivil-Quijada, H. 2017** Latest Cretaceous-early Paleogene “boom” of porphyry Cu mineralization associated with the Laramie magmatic arc of Mexico. *Ore Geology Reviews* 81, 1113-1124.
- Velasco-Tapia, F., González-Guzmán, R., Chávez-Cabello, G., Lozano-Serna, J., Valencia-Moreno, M. 2011** Estudio petrográfico y geoquímico del Complejo Plutónico El Peñuelo (Cinturón de Intrusivos de Concepción del Oro), Noreste de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 63, 183–199.
- Vermeesch, P. 2018** Statistics for fission-track thermochronology. *Fission-track thermochronology and its application to geology*. Cham: Springer International Publishing, <https://www.ucl.ac.uk/~ucfbpve/papers/VermeeschSpringer2019/>
- Wiedenbeck, M.A.P., Alle, P., Corfu, Griffin, W.L., Meier, M., Oberli, F., Von Quadt, A., Roddick, J.C., Spiegel, W. 1995** Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter* 19, 1-23.
- Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., de Haller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S., Marschik, R. 2005** Iron Oxide Copper-Gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin. En: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfrab, R.J., Richards, J.P. (Eds.), *One Hundredth Anniversary Volume, Society of Economic Geologists*. <https://doi.org/10.5382/AV100.13>

- Woodhead, J., Hellstrom, J., Maas, R., Drysdale, R., Zanchetta, G., Devine, P., Taylor, E. 2006** U–Pb geochronology of speleothems by MC-ICPMS. *Quaternary Geochronology* 1, 208-221.
- Yao, L., Lü, Z., Zhao, C., Pang, Z., Yu, X., Yang, T., Li, Y., Liu, P., Zhang, M. 2017** Zircon U–Pb geochronological, trace element, and Hf isotopic constraints on the genesis of the Fe and Cu skarn deposits in the Qiman Tagh area, Qinghai Province, Eastern Kunlun Orogen, China. *Ore Geology Reviews* 91, 387-403. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.09.017>
- Zhang, K.-J., Li, Q.-H., Yan, L.-L., Zeng, L., Lu, L., Zhang, Y.-X., Hui, J., Jin, X., Tang, X.-C. 2017** Geochemistry of limestones deposited in various plate tectonic settings. *Earth-Science Reviews* 167, 27-46.
- Zhao, H.-X., Li, B., Zhou, Y.-X., Zhu, Z.-Y., Chen, S.M. 2022** Genesis of the giant Zijinshan epithermal Cu-Au deposit, Fujian Province, southeastern China: Cu-He-Ar isotope perspective, *Ore Geology Reviews* 148, Article 105047. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105047>
- Zhou, Y., Wang, T., Fan, F., Chen, S., Guo, W., Xing, G., Sun, J., Xiao, F. 2022.** Advances on exploration indicators of mineral VNIR-SWIR spectroscopy and chemistry: A review. *Minerals* 12, Article 958. <https://doi.org/10.3390/min12080958>