



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**  
**CENTRO DE GEOCIENCIAS**

**Estudio metalogénico de la porción SW del Distrito Minero Tatatila-Las Minas, Veracruz.**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA:**

**GEOVANNY HERNÁNDEZ AVILES**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. EDUARDO GONZÁLEZ PARTIDA**  
**CENTRO DE GEOCIENCIAS**

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:**

**DR. ANTONI CAMPRUBÍ CANO (INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM)**  
**DR. CARLES CANET MIQUEL (INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM)**  
**DR. CARLOS EDUARDO GARZA GONZÁLEZ (FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM)**  
**DR. EDUARDO GONZÁLEZ PARTIDA (CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM)**  
**DR. LUCAS HILARIO OCHOA LANDÍN (DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, UNISON)**

**JURIQUILLA, QUERÉTARO, MAYO 2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Eduardo González Partida por haberme dado la oportunidad de participar en este proyecto y por compartir su tiempo y conocimientos acerca de los yacimientos minerales.

A los doctores Antoni Camprubí Cano, Carles Canet Miquel, Carlos Eduardo Garza González y Lucas Hilario Ocho Landín quienes fungieron como mi jurado de examen de grado, así como al Dr. Luis F. Vassallo Morales quien formó parte de mi comité evaluador semestral. Un agradecimiento especial al doctorante Jesús Castro Mora por su apoyo en el entendimiento de la zona de Las Minas.

A CFE, que en colaboración con el proyecto GEMex-UE (CONACyT) liderado por la UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO y dentro del PT #4.1 se dieron las facilidades necesarias como el muestreo, información y colaboración en los trabajos de campo y para poder actualizar el modelo genético del yacimiento. Esta tesis en parte es el producto de dicha colaboración (MEXICO-UNION EUROPEA) por lo que se agradece a todas las instituciones involucradas.

Al área de Posgrado por estar siempre al pendiente de los estudiantes y por resolver todas las dudas administrativas, en especial a los asistentes de posgrado Blanca Rendón, Armando Ramírez y anteriormente Alejandro Escobedo.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) por haberme apoyado con una beca durante el desarrollo de la maestría.

Al Centro de Geociencias y su personal por su hospitalidad y por todas las facilidades que me brindaron durante estos dos años. A los técnicos Tomás Vásquez y Óscar Aguilar por su apoyo en el área de laminación y a la Lic. Teresita de Jesús Pérez Cruz por su apoyo en la búsqueda de bibliografía.

Al laboratorio de yacimientos minerales, en especial a los geólogos Erik Díaz y Leslie Sarabia por sus enseñanzas en la medición de inclusiones.

A mis compañeros de maestría, de cubo y rommies, con quienes compartí buenos momentos dentro y fuera del CGeo.

Finalmente agradezco a mis padres por haberme guiado en el camino del estudio y la perseverancia, que sin ellos no sería la persona que soy ahora. A Margarita por ser mi compañera de vida y por su apoyo incondicional para cumplir esta meta.

## **DECLARACIÓN DE ÉTICA ACADÉMICA**

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

ATENTAMENTE



GEOVANNY HERNÁNDEZ AVILES

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>I</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Ubicación	2
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación	4
1.4 Hipótesis	4
1.5 Objetivos	5
1.6 Antecedentes y trabajos previos	5
<b>CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO</b>	<b>9</b>
2.1 Cinturón Volcánico Mexicano	9
2.2 Geología regional	11
2.3 Geología local	12
2.3.1 Carbonatos	13
2.3.2 Intrusivos	14
2.3.3 Secuencia volcánica	17
2.4 Geología estructural	18
2.5 Skarn	18
2.5.1 Mineralización metálica	22
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA</b>	<b>26</b>
3.1 Petrografía	26
3.1.1 Corte y laminado	26
3.1.2 Análisis de láminas delgadas	27
3.2 Geoquímica	27
3.2.1 Triturado, pulverizado y horno de secado	27
3.2.2 Medición de elementos mayores	27
3.2.3 Medición de elementos traza	28
3.3 Minerografía	28
3.3.1 Corte y montado	28
3.3.2 Desbaste y esmerilado	28
3.3.3 Pulido con diamante	29
3.3.4 Análisis de secciones pulidas	29
3.4 Inclusiones fluidas	29
3.4.1 Preparación de secciones doblemente pulidas	29
3.4.2 Análisis petrográfico y mediciones microtermométricas	30
3.5 Isótopos estables	30
3.5.1 Preparación de muestras	30
3.5.2 Medición de isótopos de C y O	31
3.5.3 Medición de isótopos de S	31
3.6 Mediciones radiométricas	31
3.6.1 Preparación de muestras	31
3.6.2 Medición U-Pb	32
3.6.3 Medición Ar-Ar	32
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS</b>	<b>33</b>
4.1 Intrusivos	33
4.1.1 Petrografía	33

4.1.2	Geoquímica	37
4.1.2.1	Clasificación geoquímica y afinidad magmática	37
4.1.2.2	Ambiente tectónico	38
4.1.2.3	Afinidad adakítica	39
4.1.2.4	Edad de los intrusivos	43
4.2	Skarn	44
4.2.1	Petrografía	44
4.2.2	Minerografía	47
4.2.2.1	Zona de magnetita	48
4.2.2.2	Zona de sulfuros	48
4.2.2.3	Otros minerales	49
4.2.3	Secuencia paragenética	52
4.2.4	Edad de la mineralización	54
4.3	Isótopos estables	54
4.3.1	Isótopos de C y O	54
4.3.2	Isótopos de S	57
4.4	Inclusiones fluidas	60
4.4.1	Fases pre-ebullición, ebullición y post-ebullición	62
4.4.2	Fases prógrada, retrógrada y retrógrada tardía	65
4.4.3	Evolución de los fluidos	67
4.4.4	Condiciones de presión y profundidad	69
4.5	Condiciones $fO_2$ , $fS_2$ y pH	69
<b>CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN</b>		<b>72</b>
5.1	Origen de los intrusivos y el rol de las adakitas	72
5.2	Intrusivos y su relación con el skarn	73
5.3	Skarn vs IOCG	74
5.4	Origen y evolución de los fluidos	75
5.5	Transporte y precipitación	78
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES</b>		<b>81</b>
6.1	Conclusiones particulares	81
<b>REFERENCIAS</b>		<b>84</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>90</b>
Anexo 1.	Descripciones petrográficas: intrusivos del DMTLM	90
Anexo 2.	Geoquímica de elementos mayores: intrusivos del DMTLM	115
Anexo 3.	Geoquímica de elementos traza: intrusivos del DMTLM	116
Anexo 4.	Descripciones petrográficas: skarn del DMTLM	120
Anexo 5.	Descripciones minerográficas: skarn del DMTLM	131
Anexo 6.	Petrografía de IF de la zona de Santa Cruz	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

<b>FIGURA 1.1</b> Principales yacimientos en México	1
<b>FIGURA 1.2</b> Localización del área de estudio	2

### CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO

<b>FIGURA 2.1</b> CVM en el Mioceno	10
<b>FIGURA 2.2</b> Mapa geológico regional del DMTLM	11
<b>FIGURA 2.3</b> Mapa geológico local, SW del DMTLM	12
<b>FIGURA 2.4</b> Sección esquemática de la porción SW del DMTLM	13
<b>FIGURA 2.5</b> Carbonatos	14
<b>FIGURA 2.6</b> Relaciones de corte de los intrusivos	16
<b>FIGURA 2.7</b> Relación de corte gabro-granodiorita	16
<b>FIGURA 2.8</b> Secuencia volcánica	17
<b>FIGURA 2.9</b> Zonación mineral respecto a la cercanía con la fuente de calor	19
<b>FIGURA 2.10</b> Zonación mineral respecto a la etapa de evolución de los skarns	19
<b>FIGURA 2.11</b> Diagrama ternario Al-Ca-Fe	20
<b>FIGURA 2.12</b> Afloramiento en la mina Boquillas	23
<b>FIGURA 2.13</b> Mineralogía del skarn	24

### CAPÍTULO 4. RESULTADOS

<b>FIGURA 4.1</b> Diagrama ternario QAPF	34
<b>FIGURA 4.2</b> Petrografía de los intrusivos	36
<b>FIGURA 4.3</b> Clasificación geoquímica sílice vs álcalis	37
<b>FIGURA 4.4</b> Diagramas AFM y saturación de Al	38
<b>FIGURA 4.5</b> Diagramas de discriminación tectónica	39
<b>FIGURA 4.6</b> Diagramas de elementos traza y REE	40
<b>FIGURA 4.7</b> Diagrama de discriminación adakítica $La/Yb_N$ vs $Yb_N$	41
<b>FIGURA 4.8</b> Diagrama de discriminación adakítica $Sr/Y$ vs $Y$	42
<b>FIGURA 4.9</b> Diagramas de discriminación adakítica HSA y LSA	42
<b>FIGURA 4.10</b> Diagramas U-Pb de análisis de zircones	43
<b>FIGURA 4.11</b> Petrografía del skarn	46

<b>FIGURA 4.12</b> Minerografía del skarn	51
<b>FIGURA 4.13</b> Secuencia paragenética del skarn	53
<b>FIGURA 4.14</b> Diagramas Ar-Ar de análisis de fuchsita	54
<b>FIGURA 4.15</b> Diagrama de caja $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^{13}\text{C}$	57
<b>FIGURA 4.16</b> Diagrama $\delta^{34}\text{S}$ vs frecuencia	59
<b>FIGURA 4.17</b> Diagrama de comparación $\delta^{34}\text{S}$	59
<b>FIGURA 4.18</b> Características petrográficas de las IF del skarn: pre-ebullición	63
<b>FIGURA 4.19</b> Características petrográficas de las IF del skarn: ebullición	64
<b>FIGURA 4.20</b> Características petrográficas de las IF del skarn: post-ebullición	65
<b>FIGURA 4.21</b> Diagrama Th vs salinidad	67
<b>FIGURA 4.22</b> Diagrama de evolución de los fluidos del skarn	68
<b>FIGURA 4.23</b> Diagrama T-P-H- $X_{\text{salinidad}}$	69
<b>FIGURA 4.24</b> Diagramas de $f\text{O}_2$ vs pH de los fluidos	70
<b>FIGURA 4.25</b> Diagramas de $f\text{O}_2$ y $f\text{S}_2$ vs T de los fluidos	71

## RESUMEN

El Distrito Minero Tatatila-Las Minas (DMTLM) es conocido desde el México prehispánico, donde se extraía Au y se utilizaba principalmente para el pago de tributo al Imperio Azteca. El DMTLM alberga yacimientos tipo skarn del clan IOCG (Iron Oxides-Copper-Gold-deposit) y vetas epitermales tardías principalmente, con valores importantes de Au (1 gr/ton a 39.3 gr/ton), Ag (4.11 gr/ton a 127 gr/ton) y Cu (0.64 a 11.7%). La geología local está dominada por calizas y dolomías del Cretácico afectadas por plegamientos Laramídicos y rocas plutónicas del Mioceno Medio, las cuales generaron mármol y skarn mineralizado a través de mantos; el Plioceno está representado por una secuencia ígnea extrusiva (piroclástica principalmente) representada por tobas, andesitas y dacitas que corresponden a los productos volcanicos distales de la Caldera de los Humeros.

En la mina Santa Cruz (porción SW del DMTLM) las rocas intrusivas asociadas a la mineralización son principalmente granodioritas con una edad U–Pb (datación en zircón) de  $15.27 \pm 0.36$  Ma. El skarn presenta una edad de mineralización estimada en  $12.49 \pm 0.09$  Ma (fuchcita, Ar/Ar), lo que indica que el sistema hidrotermal mineralizante estuvo activo por casi 3 Ma. Los datos geoquímicos (elementos mayores, menores y REE) de los intrusivos del DMTLM indican relación con magmas adakíticos de alto sílice (HSA) y calci-alcalinos generados durante la subducción entre la placa de Cocos y Norteamérica a partir del Mioceno Medio.

El metamorfismo isoquímico y metasomático que culminó en la formación del skarn presenta un patrón general de zonación; para la etapa prógrada la porción proximal (endoskarn) se caracteriza por granate>piroxeno>cuarzo; en las partes distales (exoskarn) presenta piroxeno>granate>cuarzo>wollastonita. La mena se compone de magnetita masiva y Au-Cu asociado. Los fluidos asociados a esta etapa se caracterizaron por ser clorurados, oxidantes y de alta temperatura. La etapa retrógrada se caracteriza por una mineralogía de anfíbol-fuchcita y epidota-clorita-cuarzo-calcita. La mena se compone principalmente de sulfuros (calcopirita, pirita, bornita, calcocita, covelita y digenita) y Au-Ag asociada. Los fluidos en esta etapa se caracterizaron por ser sulfurados, oxidantes y de baja temperatura. Hacia los bordes se observa una extensa aureola de mármol que alcanza los 400-500 m

Los datos microtermométricos de inclusiones fluidas (IF) del skarn indican fluidos iniciales de  $>600$  °C y moderada salinidad los cuales evolucionaron a partir de procesos de ebullición y dilución hasta finalizar en fluidos de  $\sim 100$  °C y baja salinidad. Las condiciones de formación del skarn se estiman a 3.1 km y 780 bar de presión litostática. Los datos isotópicos de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}\%$

+7.8 a +26.3), carbono ( $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$  -8.5 a +4) y azufre ( $\delta^{34}\text{S}\text{‰}$  -3 a +4.2) indican un origen de los fluidos principalmente magmático y una evolución isotópica a partir de interacción agua-roca (W/R). Se interpreta que los magmas adakíticos propiciaron el eficiente transporte de metales a través de complejos clorurados, oxidantes e hipersalinos y los procesos de ebullición, dilución e interacción W/R permitieron la precipitación de minerales de mena.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El Distrito Minero Tatatila-Las Minas (DMTLM) se ubica en la porción central del estado de Veracruz y se caracteriza por poseer mineralización económica de Au, Cu y Ag a través de mantos de reemplazamiento (skarn) y vetas. Dado su contenido metálico, esta zona fue reconocida desde la época prehispánica y ha sido objeto de trabajos de explotación, principalmente después de la llegada de los españoles. Actualmente la porción SW del DMTLM se encuentra bajo trabajos de prospección minera.

La porción este de México es de poco interés científico-minero dado que la mayoría de los yacimientos minerales importantes se ubican en las porciones oeste, centro y norte del país (Fig. 1.1). A pesar de que el DMTLM ha tomado relevancia en las últimas décadas, no se han llevado a cabo trabajos enfocados en el origen y la evolución de la mineralización, específicamente en la mineralización tipo skarn observada en la porción SW del distrito.

En este trabajo se propone el uso de isótopos estables, nuevas dataciones radiométricas, datos geoquímicos, petrográficos, mineragráficos y microtermométricos para indagar acerca del origen de la mineralización y aportar ideas al entendimiento de esta región.

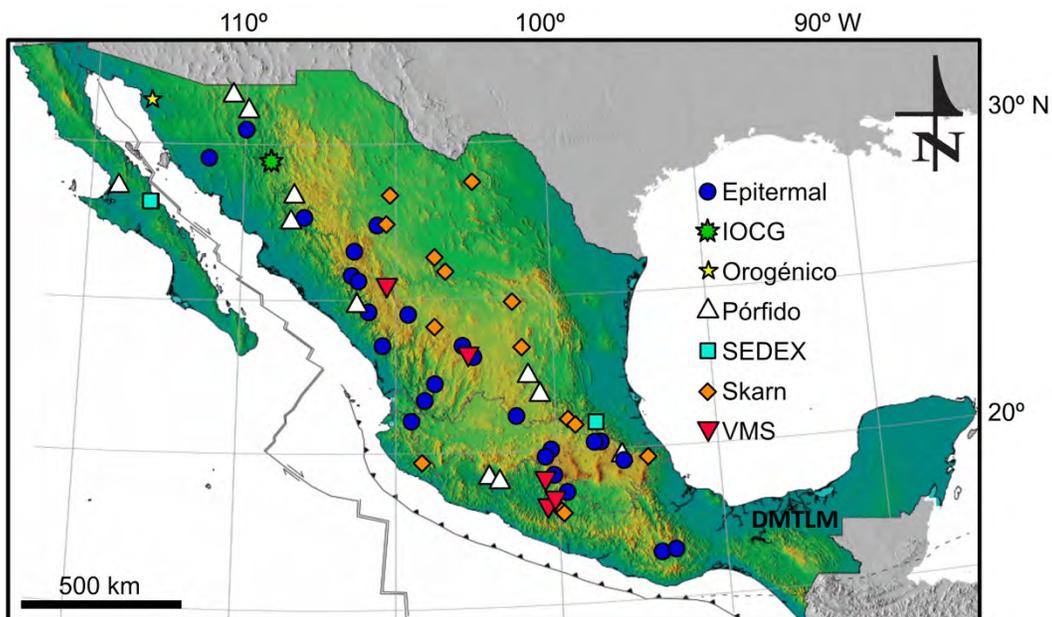


Fig. 1.1. Principales yacimientos en México. El DMTLM se ha definido como yacimiento tipo skarn, sin embargo, recientemente se ha propuesto la clasificación como tipo IOCG.

## 1.1 Ubicación

El DMTLM forma parte de los municipios de Las Minas, Altotonga, Tatatila, Las Vigas de Ramírez y Villa Aldama dentro del estado de Veracruz y se ubica a 200 km de la Ciudad de México y 17 km al NE de la ciudad de Perote, Veracruz (Fig. 1.2).

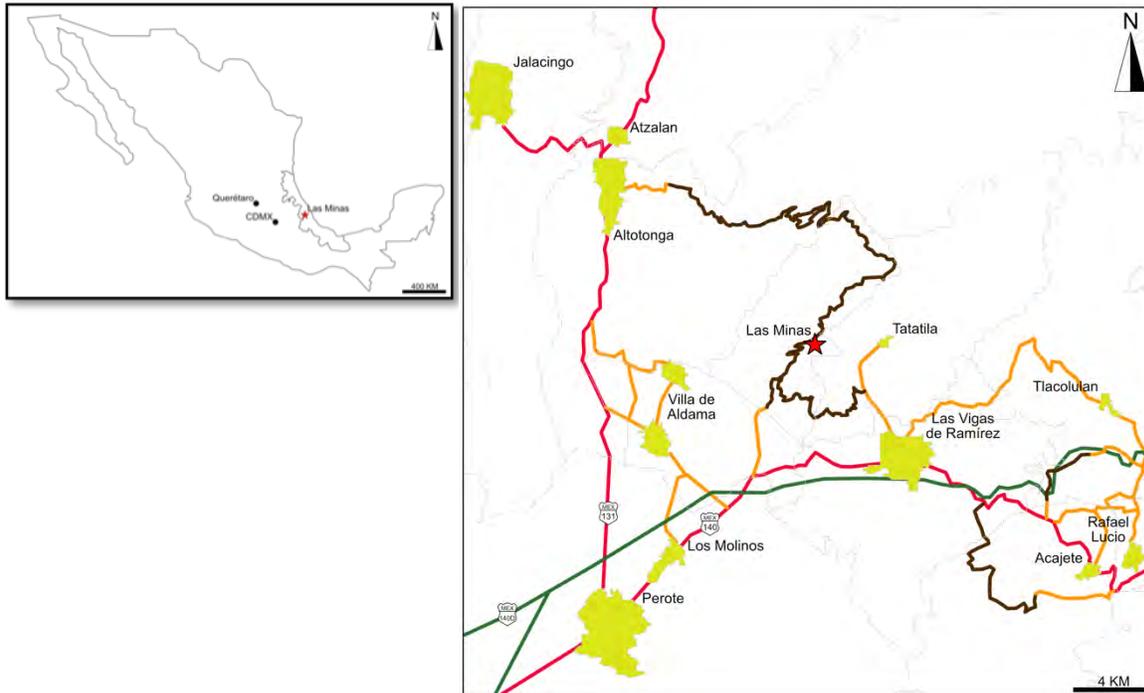


Fig. 1.2. Localización del área de estudio. Los polígonos color verde olivo representan las manchas urbanas. Línea verde: carretera federal cuota (asfalto), línea roja, carretera federal libre (asfalto), línea naranja (pavimento), línea café oscuro (terracería). La estrella de color rojo indica la zona de estudio.

## 1.2 Planteamiento del problema

Las regiones que han tenido influencia tectónica de tipo arco han sido de suma importancia para trabajos de prospección minera, ya que son propensas a albergar mineralizaciones económicas. En México, las regiones mineras por excelencia se encuentran en las porciones oeste, centro y norte del país a partir de yacimientos tipo pórfido, skarn, epitermal, VMS y orogénico principalmente. Dada esta configuración los trabajos de exploración minera e investigaciones científicas se han concentrado en estas regiones sin considerar tan relevante la porción este a pesar de que en los últimos años se han encontrado manifestaciones de Au, Cu y Ag principalmente.

Los trabajos de carácter científico más antiguos dentro del DMTLM registrados comenzaron a inicios del siglo XX y se concentraron en la ubicación, descripción, muestreo y evaluación de las

manifestaciones minerales. Los trabajos más recientes han incluido el reconocimiento y cartografía de la mineralización, petrografía, mineragrafia, geoquímica, microtermometría y evaluación del potencial minero (p. ej. Salinas-Rodríguez y Lemus-Bustos, 2007; Geoconsulting Ingenieros, 2010; Dorantes-Castro, 2016; Read y Shoemaker, 2017; Sarabia-Jacinto, 2017; Pérez-Cruz, 2018), sin embargo, en su mayoría se trata de trabajos descriptivos sin implicaciones metalogenéticas.

Los trabajos de cartografía y prospección minera han permitido conocer los límites espaciales y parcialmente temporales de la litología y mineralización asociada, no obstante, no hay mucho trabajo a detalle relacionado al skarn.

En cuanto a la petrografía y mineragrafia, se han podido clasificar modalmente los intrusivos de la porción SW y se han identificado minerales de ganga y mena del skarn (p. ej. Dorantes-Castro, 2016), pero no se había establecido una secuencia paragenética respecto a las fases de desarrollo del skarn y su relación con los fluidos mineralizantes y su comportamiento isotópico.

Los estudios de geoquímica de roca total han permitido clasificar los intrusivos composicionalmente y discriminar su afinidad magmática con base a elementos mayores y traza pero no se ha indagado respecto su relación con la mineralización y con el inicio del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM).

Por otro lado, la caracterización de los fluidos asociados a la depositación mineral ha sido estudiada a partir de una única zona (El Dorado) de la porción SW del distrito, lo que limita la comprensión de la influencia de los fluidos y el origen del skarn.

Se tiene conocimiento de una datación realizada a una granodiorita con una edad de 14 Ma (Salinas-Rodríguez y Lemus-Bustos, 2007) dentro del DMTLM, dicha edad se asocia con la edad de mineralización, sin embargo no existe algún fechamiento realizado directamente a la mineralización.

Con base en estas premisas este trabajo gira entorno a cuestionarse ¿cuál es el origen y evolución de la mineralización presente? de la cual se desprenden las preguntas: ¿que tipo de fluidos estuvieron involucrados? ¿cuales fueron las condiciones en las que coexistieron estos fluidos con la roca encajonante? ¿cual es la fuente principal de los elementos metálicos?. En este trabajo se pretende dar respuesta a estas preguntas, apoyándose de herramientas como la geoquímica de isotópos estables,

inclusiones fluidas, geoquímica de roca total de elementos traza y mayores, petrografía y minerografía.

### **1.3 Justificación**

La porción SW del DMTLM ha sido poco estudiada desde el punto de vista metalogénico. Diversos trabajos se han llevado a cabo en el área enfocados en el reconocimiento de la geología y evaluación económica del skarn sin indagar acerca del origen y evolución del yacimiento. Los trabajos realizados por el Servicio Geológico Mexicano, empresas privadas o trabajos de tesis realizados en el área han permitido abordar el tema de manera superficial sin enfocarse en los fluidos asociados a la mineralización, lo que no ha permitido entender completamente el origen y la evolución del yacimiento y el posible papel de los intrusivos en su origen.

Para conseguir tal fin se requieren nuevas formas de abordar la problemática aplicando nuevas técnicas y proporcionando nuevos datos, lo que probablemente favorecerá los trabajos de exploración minera y mejorará el entendimiento geológico-minero y metalogénico de esta región.

### **1.4 Hipótesis**

La porción SW del DMTLM muestra una compleja zona de mineralización y alteración probablemente generada en primera instancia por procesos de metamorfismo de contacto seguida de alteración magmático-hidrotermal. Se cree que la mineralización observada en esta porción del distrito es consecuencia directa de la interacción de los fluidos magmáticos con la roca encajonante y con una participación importante de agua meteórica en las fases finales de la evolución del skarn. Hacia esta región, el origen de los intrusivos en el DMTLM es consecuencia de la interacción entre la Placa de Cocos y la Placa de Norteamérica dada la firma geoquímica de tipo arco continental reportada (Dorantes-Castro, 2016).

En relación al área mineralizada observada en el distrito es probable que fue favorecida por la presencia de calizas (Formación Orizaba) de estratificación gruesa y zonas de debilidad que cortan el distrito (fallas normales-laterales), lo que da mayor libertad a los fluidos al moverse a través de la roca. De acuerdo a los valores anómalos de metales preciosos se considera que los fluidos asociados tuvieron gran capacidad de transporte de metales. Las zonas de mantos de magnetita y zonas masivas

de sulfuros pueden ser indicativos de procesos efectivos de precipitación mineral (ebullición y mezcla de fluidos), asociados a la alteración retrograda del skarn.

## **1.5 Objetivos**

De manera general se pretende:

\*Conocer el origen y evolución de la mineralización presente en la porción SW del distrito y su relación con los intrusivos.

De manera particular, se pretende:

\*Conocer la mineralogía y caracterización geoquímica de los intrusivos.

\*Conocer las etapas de alteración y mineralización del skarn mediante petrografía y minerografía.

\*Conocer las condiciones de presión, temperatura, salinidad y profundidad de los fluidos mineralizantes mediante microtermometría de inclusiones fluidas.

\*Definir el origen de las especies sulfurosas y carbonatadas por medio de isotopos estables.

\*Conocer la edad de la mineralización.

## **1.6 Antecedentes y trabajos previos**

El DMTLM ha sido reconocido y explotado desde épocas prehispánicas y consecuentemente durante y después de la llegada de los españoles. Los primeros trabajos fueron principalmente de explotación con etapas cortas y esporádicas de extracción por gambusinos y pequeñas empresas. A inicios del siglo XX surge un interés científico por el distrito y se desarrollan diversos trabajos que continúan hasta el día de hoy. Actualmente el DMTLM (porción SW) se encuentra bajo intensa prospección minera mediante las empresas Mexican Gold Corp y Chesapeake Gold Corp.

En el México prehispánico, los indios de Chiconquiaco extraían Au en la zona y lo utilizaban principalmente para el pago de tributo al Imperio Azteca. Luego de la llegada de los españoles descubren el distrito en 1680 donde registran bonanzas auroargentíferas ricas en tonelaje y ley (Castro-Mora et al., 1994). Hacia el año de 1825, los españoles denunciaron las minas más importantes del distrito y para el año 1826 la Compañía Mexicana adquirió las minas mediante un contrato de 20 años. De 1872-1873 se presentaron diversos denuncios en el estado de Veracruz y en el DMTLM destaca el carbón mineral (Las Minas), Au, Ag, Cu (Zomelahuacán), Cu y Au (Tatatila),

carbón y petróleo (Las Minas), Pb (Las Minas), carbón (Atzalán), Pb (Tatatila), carbón (Altotonga), mármol Altotonga), Au (Las Minas) (Castro-Mora et al., 1994).

Ordoñez (1904) realizó los primeros trabajos de carácter científico del distrito en Las Minas y Tatatila donde describió la topografía, geología y mineralización de manera general. De acuerdo con Castro-Mora et al. (1994), entre 1906 y 1953 se desarrolló la actividad minera más relevante del distrito de Tatatila: de 1906-1918, se trabajó activamente en el distrito con sucesión continua de diversos propietarios, en su mayoría extranjeros. De 1952-1953 la empresa Republic Steel Co llevó a cabo trabajos de exploración, con barrenación y obras mineras en depósitos ferríferos de Tatatila.

Viniegra (1965) hace mención de Las Minas y Tatatila como parte del Macizo de Teziutlán, describe la caliza y los intrusivos que afloran en esta porción del distrito. Considera que los intrusivos generaron metamorfismo y mineralización de Cu y Fe sin describir el tipo de yacimiento.

Del año 1948 a 1996 se involucraron en el distrito diversas empresas como Petróleos Mexicanos (PEMEX), Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Comisión Federal de Electricidad (CFE), Consejo de Recursos Minerales (CRM) y algunos investigadores, cuyo principal interés en el distrito fue caracterizar y evaluar el potencial minero de Fe, Ag, Au, Pb, Zn y Cu en las localidades de Tepanoya, Tatatila y Las Minas (Salinas-Rodríguez y Lemus-Bustos (2007).

En 1994 a través de la Monografía geológico-minera del estado de Veracruz, se describieron la características geológico-económicas del DMTLM considerando minerales metálicos y no metálicos mediante mapeo, descripción de la mineralización y alteración observada en las localidades de Las Minas y Tatatila. En 1996 las concesiones de la región fueron adquiridas por International Northair quienes llevaron a cabo programas de muestreo superficial y subterráneo, siendo sus resultados los que confirmaron mineralización de Au-Cu en una amplia área. En ese mismo año se asocia con la empresa Battle Mountain Gold Co para explorar la propiedad.

Para el año 2006 Bell Resources Corp adquirió el derecho de propiedades en el área de Las Minas y subsecuentemente las cedió a Chesapeake Gold Corp en 2007, quienes añadieron un área adicional sin controlar el núcleo del Distrito Las Minas (Read y Shoemaker, 2017).

Salinas-Rodríguez y Lemus-Bustos (2007) mediante la Carta geológico-minera Perote, definieron el Distrito Minero Tatatila-Las Minas constituido por 3 áreas mineralizadas: Las Minas-La Miqueta, Tatatila y Tenepanoya con un área aproximada de 70 km<sup>2</sup> donde se observan cuerpos minerales en forma de vetas y cuerpos irregulares principalmente. Describieron las geología, mineralización y alteración con base en geoquímica, mineragrafía, petrografía e inclusiones fluidas.

En el 2010, la empresa Mexican Gold Corp tomó el control de 3 denuncios constituyendo la parte principal del proyecto de Las Minas (Pepe, Pepe Tres y San José). En ese mismo año obtiene los permisos de exploración para Las Minas y zonas adyacentes (Read y Shoemaker, 2017). En el año 2011 inicia con cartografía geológica a detalle, prospección geofísica, muestreo en superficie e interior de mina y barrenación a diamante. Para ese año también la empresa Geoconsulting Ingenieros, S C. realizó exploración adicional que incluyó muestreo de las principales minas y afloramientos mineralizados (Castro-Mora et al., 2016).

Dorantes-Castro (2016) en su trabajo de tesis, describió la zonación y mineralización del área de Las Minas. Asoció el yacimiento a las intrusiones post-laramídicas e indica que el set mineralizado muestra características tipo IOCG. Presentó un mapa geológico local de Las Minas y una serie de análisis geoquímicos de los intrusivos emplazados en el área, concluyendo que son producto de un ambiente de arco volcánico.

Sarabia-Jacinto (2017) mediante su trabajo de tesis describió la porción de El Dorado a través de la zonación y mineralogía de metálicos y no metálicos, los cuales muestran afinidad con un sistema hidrotermal profundo completo derivado de cuerpos intrusivos. Su trabajo se enfocó en los fluidos relacionados a la evolución del skarn mediante inclusiones fluidas donde muestra valores de salinidad, temperaturas de homogenización, presión y profundidad.

Read y Shoemaker (2017) presentan su reporte técnico NI 43-101 para la empresa Source Exploration Corp (Mexican Gold Corp) donde realizaron una descripción detallada del proyecto Au-Cu Las Minas con base en exploración superficial y barrenación a diamante, considerando la geología local, mineralogía y ensayos geoquímicos. Se enfocaron en los depósitos El Dorado/Juan Bran y Santa Cruz y mostraron un estimado de 1 000 000 de onzas de Au equivalente para la zona.

El trabajo mas reciente fue realizado por Pérez-Cruz (2018) mediante un informe de actividades del proyecto Las Minas, donde realizó una descripción general de la geología y la mineralización existente y propone sitios para continuar con el programa de barrenación a diamante.

## **CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO**

### **2.1 Cinturón Volcánico Mexicano**

El CVM es una provincia ígnea que recorre el centro del país con una dirección preferencial W-E cuya actividad volcánica data desde inicios del Mioceno. Su origen está ligado a un ambiente de arco continental, donde la Placa de Rivera y la Placa de Cocos subducen a la Placa de Norteamérica a lo largo de la trinchera Mesoamericana, elementos ligados a la fragmentación de la antigua placa de Farallón (Ferrari et al., 2012; Gómez-Tuena et al., 2005).

Hacia la porción oriental del CVM sus primeros episodios magmáticos están representados por cuerpos plutónicos y subvolcánicos de composición grabroica a diorítica con edades de ~15-11 Ma (Gómez-Tuena et al., 2005), cuya firma geoquímica muestra una tendencia adakítica, similar a la descrita por Drummond y Defant (1990) y Martin, et al. (2005).

Se sugiere que la fase inicial del CVM en esta porción está relacionada a una configuración tectónica de subducción de bajo ángulo o subhorizontal (Fig. 2.1), lo que dio paso a la fusión parcial de los sedimentos subducidos y la corteza oceánica, infiltrando y metazomatizando la cuña del manto (Gómez-Tuena et al., 2003).

Trabajos realizados en esta región han evidenciado cuerpos minerales como resultado del magmatismo del Mioceno y las rocas hospedantes (p. ej. DMTLM), lo que sugiere que el magmatismo de esa época contribuyó a la formación de estos depósitos y probablemente algunos otros todavía no descubiertos.

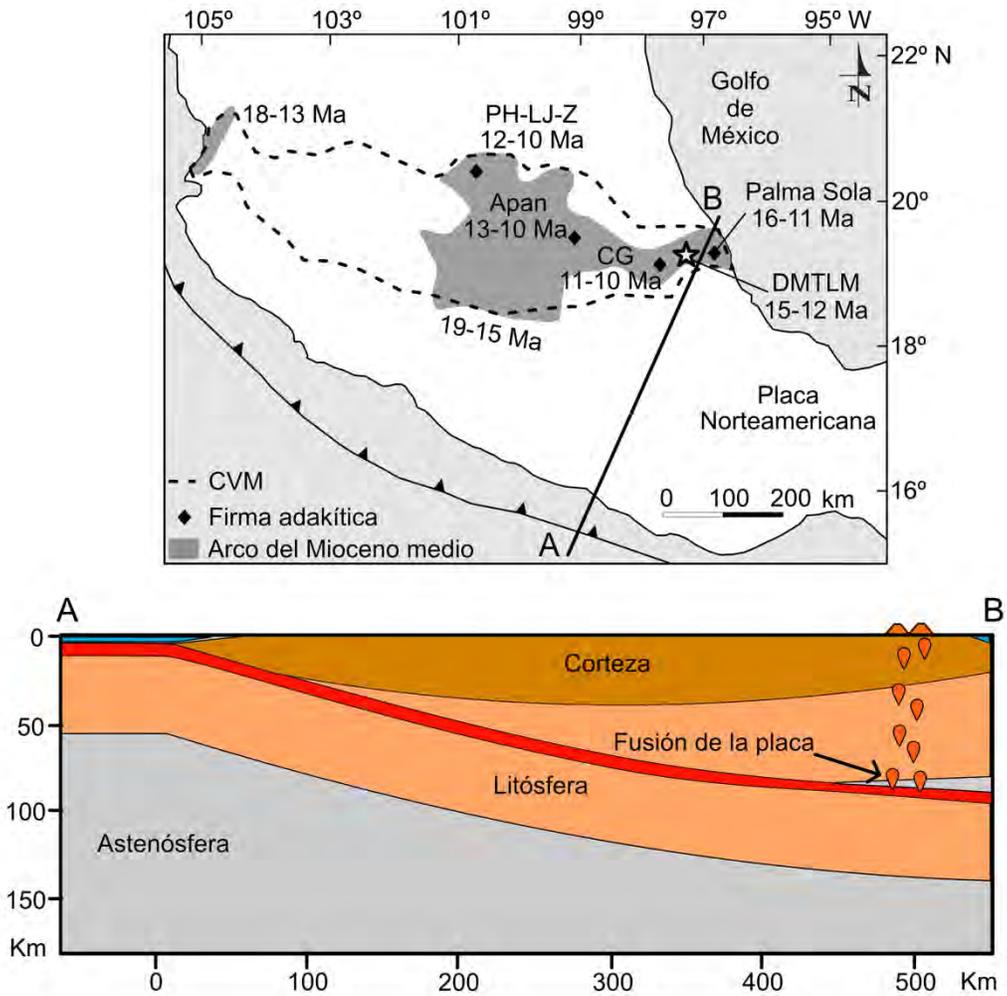


Fig. 2.1. CVM en el Mioceno. A) Configuración del CVM y la distribución del magmatismo durante el Mioceno medio. Se señalan las zonas con firma geoquímica adakítica y su edad. B) Sección esquemática de la configuración inicial propuesta para el Mioceno en la porción oriental del CVM. PH-LJ-Z: Complejo Volcánico Palo Huérano, La Joya-Zamorano. CG: Volcán Cerro Grande. Modificado de Ferrari et al. (2012) y Gómez-Tuena et al. (2003); (2005).

## 2.2 Geología regional

Hacia la base del DMTLM se observa un paquete de rocas carbonatadas (Fm Orizaba) comprendido de calizas y dolomías de estratificación gruesa que varía a delgada. Enseguida una serie de cuerpos intrusivos se emplazaron dentro de la secuencia carbonatada mostrando variaciones en composición de máficos a félsicos, abundando los de composición intermedia. Por último, hacia la cima se observa una secuencia volcánica caracterizada por depósitos de caída y coladas de lava intercalada. Toda la zona se encuentra afectada por fallamiento de tipo normal (SW-NE y SE-NW) y lateral (E-W) principalmente (Fig. 2.2).

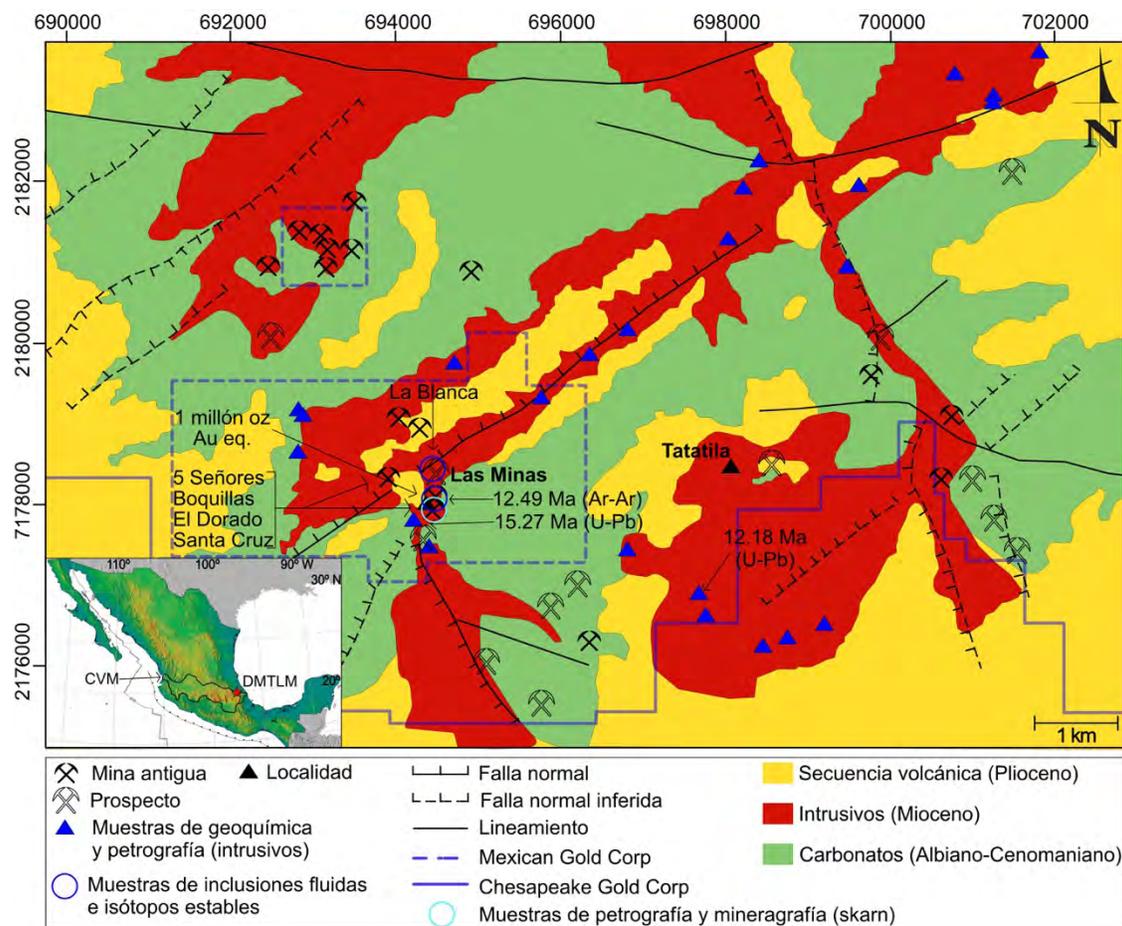


Fig. 2.2. Mapa geológico regional del DMTLM, ubicado en la porción E del CVM. Se muestra la configuración geológica y estructural y se observan los puntos de muestreo para los análisis geoquímicos, petrográficos, microtermométricos e IF. También se muestran los prospectos de exploración y las líneas divisorias de los lotes mineros de las 2 empresas que actualmente están trabajando en la zona. En las inmediaciones de las minas 5 Señores, Boquillas, El Dorado y Santa Cruz se han estimado 1 000 000 de oz de Au eq. Mapa modificado de Chesapeakegold (2018) y Salinas-Rodríguez y Lemus-Bustos (2007).

## 2.3 Geología local

Localmente dentro de la porción SW del DMTLM se observa un conjunto de rocas similares a las observadas a escala regional. A diferencia del primero, en esta escala se pueden diferenciar las zonas de skarn, mármol e intrusivos (Fig. 2.3). El skarn consiste en mantos irregulares de granate-piroxeno-magnetita-cuarzo de textura granoblástica con reemplazamientos de epidota-calcita-anfibol-cuarzo y sulfuros. El mármol varía de color gris a blanco y muestra cristales de calcita en textura granoblástica. El set de intrusivos varía en composición de diorita, granodiorita y granito a manera de diques y sills-stocks? (Fig. 2.4). La presencia de skarn se observa entre los contactos mármol-intrusivo y dentro de los intrusivos (¿roof pendant?). Se distingue un fallamiento normal con orientación SW-NE y lateral con orientación NW-SE.

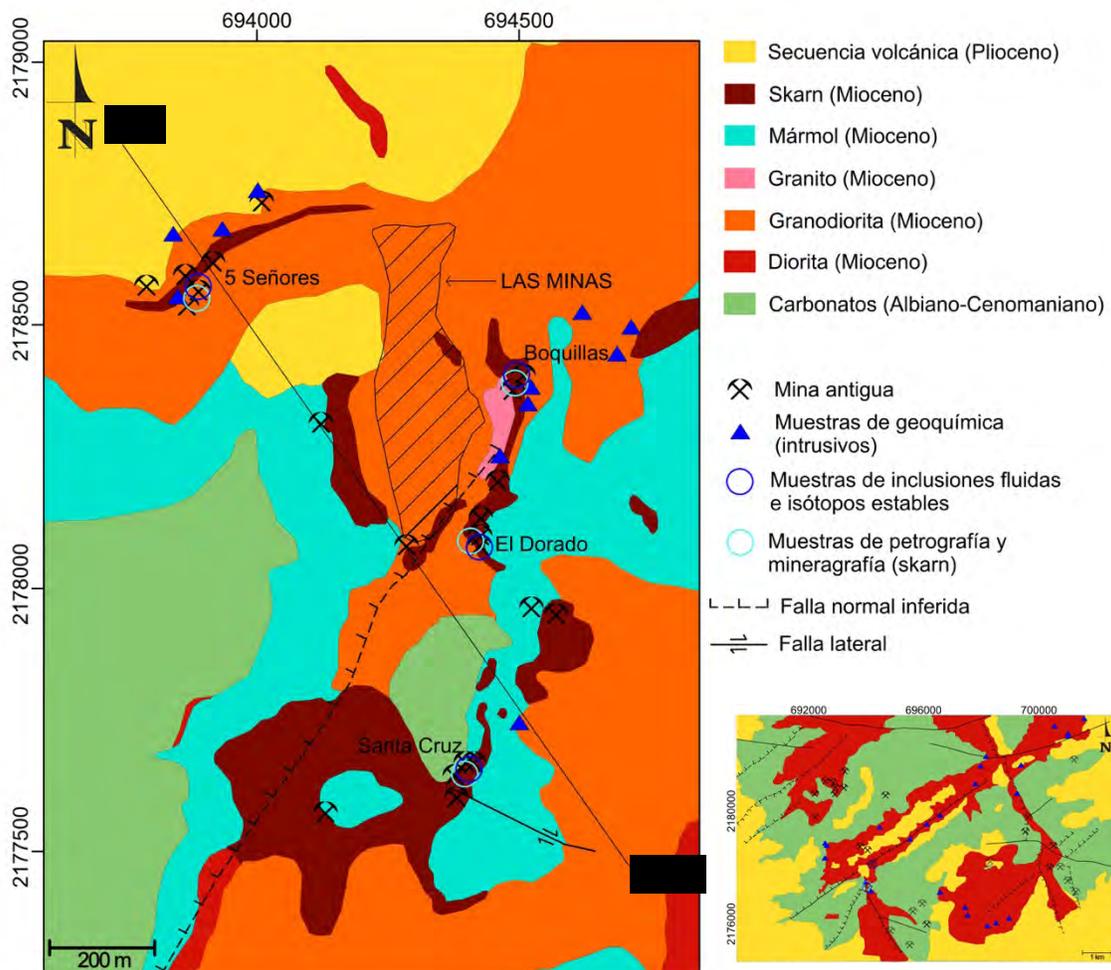


Fig. 2.3. Mapa geológico local, SW del DMTLM. Las zonas de skarn se relacionan principalmente a las rocas ígneas del tipo granodiorita. Las muestras de geoquímica fueron tomadas de Dorantes-Castro (2016). Mapa modificado de Dorantes-Castro (2016), Pérez-Cruz (2018) y Read y Shoemaker (2017).

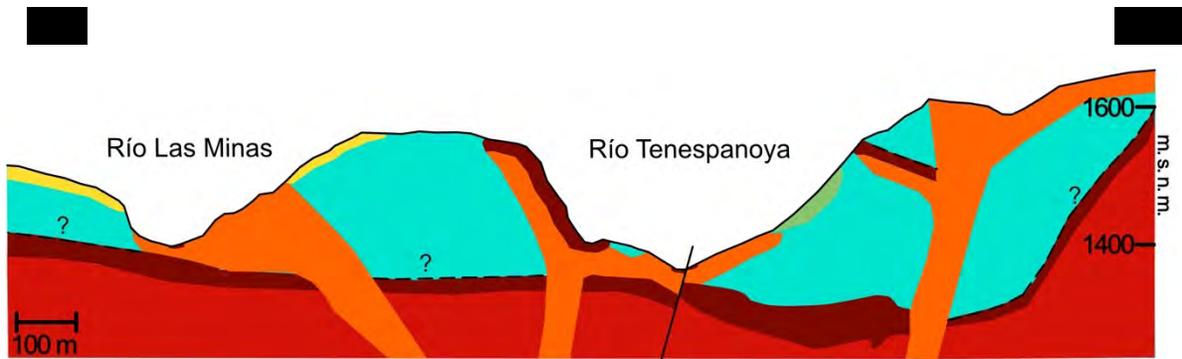


Fig. 2.4. Sección esquemática de la porción SW del DMTLM. El skarn que aflora en superficie asociado a la granodiorita parece ser local y actúa como “roof pendant” (no siempre forma skarn). Hacia profundidad la diorita está asociada al skarn, mostrando una ligera inclinación hacia el oriente. El mármol parece ser generado por ambos cuerpos. Las relaciones de corte de los intrusivos indican que la diorita aparece en forma de sill o stock (a profundidad, ocasionalmente muestra algunos diques que se observan a superficie) y la granodiorita la corta a manera de diques-sotck y que probablemente cambian a sill en porciones superficiales. Interpretación a partir de la geología superficial y una sección esquemática mostrando la configuración del skarn entre San Juan Bran-El Dorado y Santa Cruz. Modificado de Mexican Gold (2017).

### 2.3.1 Carbonatos (Albiano-Cenomaniano)

Las rocas carbonatadas pertenecen a la Fm Orizaba, la cual regionalmente pertenece a la Cuenca de Zongolica y a la Plataforma de Córdoba, que forman parte de la Sierra Madre Oriental en su porción SE.

La Fm Orizaba se describe como un paquete de calizas comprendida en 2 fases: la primera se caracteriza por calizas tipo boundstone de estratificación gruesa de color gris oscuro, con presencia de rudistas asociados a gasterópodos, esponjas y corales. La segunda fase comprende calizas tipo mudstone y wackstone (de intraclastos y bioclastos) de estratificación delgada de color gris claro (post-arrecifales), presenta carpetas de algas, costras de dolomita, horizontes de miliólidos y escasos rudistas (López-Ramos, 1979). Se estima una edad Albiano-Cenomaniano de acuerdo con su contenido fósil y se infiere un ambiente de formación a partir de una plataforma carbonatada sin aporte de terrígenos, con desarrollo de arrecifes con zonas de alta y baja energía, de aguas cálidas, intertropicales, muy someras, con salinidad normal y oxigenadas (Aguilera-Martínez et al., 2000; López-Ramos, 1979; Viniegra, 1965).

Dentro del río Las Minas y Tatatila se ha observado un espesor de hasta 1000 m con estratos de hasta 60 cm de calizas que varían a dolomías tipo mudstone-wackstone (Salinas-Rodríguez y Lemus-Bustos, 2007) (Fig. 2.5).

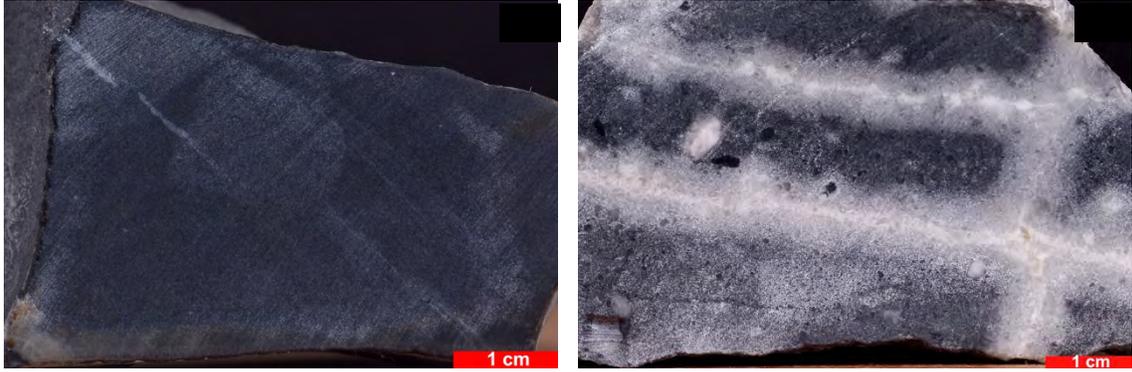


Fig. 2.5. Carbonatos. A) Caliza gris oscuro tipo mudstone con escasas vetillas. B) Caliza gris oscuro tipo wackstone con vetilleo moderado de calcita blanca de 1 mm con halos de recristalización.

### 2.3.2 Intrusivos

Los cuerpos intrusivos en la zona son típicamente clasificados como granodioritas, sin embargo, Dorantes-Castro (2016) observó gran variedad en composición con base en la geoquímica y petrografía a partir de 12 muestras recolectadas en la porción SW del DMTLM. Sus resultados indican una variación entre gabro, diorita, monzodiorita, granodiorita y granito, con ciertas relaciones de corte: granito → granodiorita/diorita, los cuales en su mayoría muestran una firma calci-alcalina. Ocasionalmente muestran cloritización y saussuritización, cuya alteración se vuelve intensa al contacto con el skarn (Read y Shoemaker, 2017).

En este trabajo se recolectaron 25 muestras de intrusivos en un área más extensa de muestreo y se encontraron más variaciones composicionales. Para fines prácticos los intrusivos en el DMTLM se agrupan en diorita, granodiorita, granito y gabro. Los detalles petrográficos y geoquímicos se detallan en el apartado de resultados.

Estos cuerpos exhiben un patrón de afloramiento circular de aproximadamente 10 km de diámetro rodeando Las Minas, lo que puede indicar que representan la porción superior de un batolito o un gran sill concordante con la secuencia sedimentaria sobreyacente, dado que la mayoría de los barrenos perforados terminan cortando intrusivo enseguida de la aureola del skarn (Read y Shoemaker, 2017).

Dentro de la porción SW del DMTLM los cuerpos granodioríticos muestran un arreglo irregular y son los más abundantes en superficie. En cambio, los cuerpos de composición granítica y diorítica son de pequeña dimensión, escasos y muestran un arreglo preferencial NE-SW. A profundidad la diorita es mas abundante y muestra una geometría tipo sill o stock de grandes dimensiones. Los gabros muestran una geometría tipo dique y se caracterizan por ser de menor tamaño cortando a las granodioritas. La edad de estos cuerpos se ha estimado en 14 Ma a partir de un fechamiento K-Ar de una granodiorita (Salinas-Rodríguez y Lemus-Bustos, 2007).

Considerando las relaciones de corte, geoquímica y textura, los intrusivos se dividen en 4 grupos (Fig. 2.6):

-Grupo de las dioritas: ¿intrusivos tipo stock-sill? a profundidad y escasos diques en superficie de color gris oscuro que varía a verde oscuro. Muestran ligero magnetismo y textura porfídica y fanerítica. Con base en los núcleos de la perforación a diamante es una primera etapa u otra de formación del skarn (Read y Shoemaker, 2017) y ocasionalmente muestra xenolitos de mármol (Pérez-Cruz. 2018).

-Grupo de las granodioritas: ¿intrusivos tipo dique-sill? de color gris a gris claro con textura fanerítica que varía a porfídica. Son los más abundantes en superficie. Las relaciones de corte en superficie indican su relación con la formación de skarn (Dorantes-Castro, 2016; Salinas-Rodríguez y Lemus-Bustos, 2007). Ocasionalmente muestra xenolitos de diorita y mármol (Pérez-Cruz, 2018).

-Grupo de los granitos: intrusivos tipo dique de color gris claro de textura fanerítica. Son escasos en superficie y en profundidad. Se ha observado cortando a la diorita, granodiorita y el skarn (Pérez-Cruz, 2018). No se ha documentado su relación con la mineralización.

-Grupo de los gabros: intrusivos tipo dique de color gris oscuro-verdoso con textura fanerítica. Este grupo muestra tamaños de escasos metros cortando al grupo de las granodioritas (Fig. 2.7). Estos intrusivos muestran una firma geoquímica diferente al resto de los intrusivos. Se considera que su emplazamiento es posterior a la mineralización.

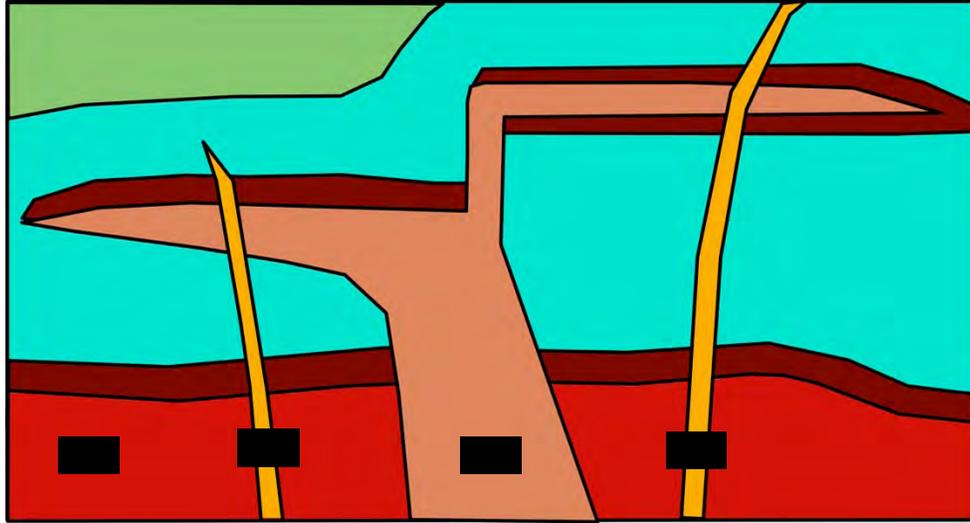


Fig. 2.6. Relaciones de corte de los intrusivos. 1) Diorita con geometría de sill o stock a profundidad formando mineralización y mármol al contacto con los carbonatos. 2) Granodiorita con forma de dique o stock que se vuelve sill en porciones más somera, el cual forma skarn y mármol al contacto con los carbonatos. Corta a la diorita. 3) granito con geometría de dique cortando diorita, granodiorita y skarn. No forma mineralización. 4) Gabro tipo dique cortando granodiorita y probablemente a la diorita y el skarn. No forma mineralización. Color azul: mármol. Color verde: caliza. Color rojo oscuro-café: skarn.



Fig. 2.7. A) Relación de corte gabro-granodiorita. Se observa un dique de composición gabroica intruyendo una granodiorita. B) Detalle del contacto, algunos fragmentos de granodiorita se encuentran dentro del dique máfico.

### 2.3.3 Secuencia volcánica (Plioceno)

Las secuencias volcánicas observadas en el DMTLM se encuentran cubriendo discordantemente al paquete de rocas carbonatadas y zonas marmolizadas. Se componen de alternancias de depósitos piroclásticos de caída intercaladas con coladas de lava andesíticas y dacíticas, así como ignimbritas y tobas riolíticas, productos asociados a la Caldera de los Humeros con una edad inferior a 5 Ma (Carrasco-Núñez et al., 2017; Salinas-Rodríguez y Lemus-Bustos, 2007). Se observan principalmente en las porciones altas, sin embargo, algunas dacitas afloran a lo largo del río al NE de Las Minas, lo que puede indicar un posible bloque caído (Read y Shoemaker, 2017).

Sobre el camino de terrecería que va hacia el poblado de Las Minas, partiendo de la localidad de Cruz Blanca, se pueden observar entre 300 m y 500 m de esta secuencia volcánica, donde se aprecian fluidos de composición andesítica, encima de secuencias piroclásticas (Fig. 2.8).



Fig. 2.8. Secuencia volcánica. En esta fotografía, se puede apreciar rocas o flujos de lava andesíticos (color gris claro), depositados encima de un paquete de rocas piroclásticas mostrando una pseudoestratificación. Carretera Las Minas-Perote.

## **2.4 Geología estructural**

La secuencia de rocas carbonatadas muestra deformación dúctil producto del evento compresivo Laramídico, el cual actuó en sentido SW-NE, levantando, fallando y deformando las secuencias mesozoicas (Salinas-Rodríguez y Lemus-Bustos, 2007). En las inmediaciones del DMTLM las estructuras observadas pertenecen a un anticlinorio (Anticlinorio Huayacocotla) con orientación NNW-SSE y se caracterizan por mostrar fallamiento inverso de bajo ángulo con vergencia al NE, con deformación interna y pliegues métricos recumbentes y estratos con buzamientos suaves con vergencia al NE (Eguiluz-de Antaño, et al., 2000). En la porción SW del DMTLM los estratos buzanan principalmente al ESE y SE.

El régimen frágil está caracterizado por fallamiento regional normal con direcciones SW-NE y NW-SE (Fig. 2.2), así como fallamiento lateral de tipo dextral en dirección NE-SW y E-W y está representado por una topografía abrupta con depresiones de 1 km de profundidad (Salinas-Rodríguez y Lemus-Bustos, 2007). En la porción suroeste del área se observa un diverso fracturamiento con direcciones NW-SE y NE-SW principalmente, fallamiento normal NW-SE y fallamiento lateral dextral WNW-ESE.

El fallamiento afecta tanto a las calizas, los intrusivos, el skarn y las secuencias volcánicas. El skarn se observa tanto en zonas altas como en el fondo de las cañadas, lo que sugiere un cuerpo mineralizado disectado por el régimen frágil.

## **2.5 Skarn**

Los yacimientos tipo skarn suelen presentar 2 tipos de metamorfismo durante su desarrollo. Inician con un metamorfismo de contacto, donde el intrusivo forma una aureola de mármol al entrar en contacto con la caliza. Le sigue un metasomatismo donde los fluidos (principalmente magmáticos y meteóricos) circundantes interaccionan con el intrusivo y la roca caja. Estos procesos forman una serie de minerales que pueden ayudarnos a saber en que parte del sistema o en que etapa de evolución del skarn nos encontramos.

Fuente de calor: la porción proximal o cercana a la fuente de calor se caracteriza por presentar principalmente granate, en la porción intermedia abunda el piroxeno y la porción distal o alejada de la fuente de calor muestra mayormente wollastonita, vesuvianita o sulfuros/óxidos (Fig. 2.9). El

desarrollo del skarn es afectado por la profundidad (skarn someros se desarrollan más que los skarns profundos), porosidad y flujos del fluido (un flujo progresivo o un flujo que atraviesa zonas porosas tiene más alcance).

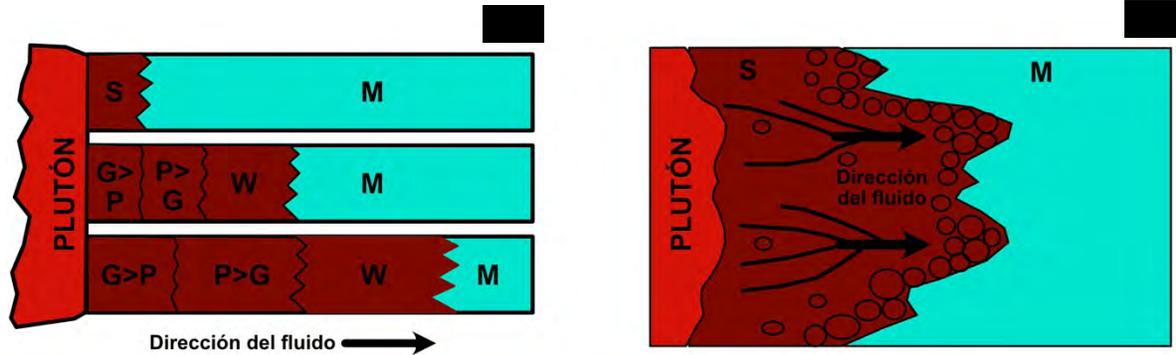


Fig. 2.9. Zonación mineral respecto a la cercanía con la fuente de calor. A) Desarrollo de mármol (por metamorfismo de contacto) y skarn respecto al plutón a partir de metasomatismo. Una aureola de skarn más extensa sugiere un flujo progresivo. Se observa una zonación de granate a wollastonita dependiendo la cercanía con la fuente de calor. B) Desarrollo del skarn respecto a la cercanía del plutón y el flujo de fluido. Zonas de skarn alargadas (dedos) sugieren regiones de flujo enfocadas. Estos suelen moverse por zonas porosas principalmente (ciclos pequeños). G: granate, M: mármol, P: piroxeno, S: skarn, W: wollastonita. Modificado de Meinert, et al., (2005).

Etapa de evolución: la etapa inicial o prógrada se caracteriza por ser una fase anhidra y se forman minerales calco-silicatados principalmente (granate, piroxeno). La etapa final o retrógrada se caracteriza por ser una fase hidratada y se forman minerales ricos en agua (anfíbol, epidota, clorita) (Fig. 2.10). La etapa retrógrada suele reemplazar a la etapa prógrada.

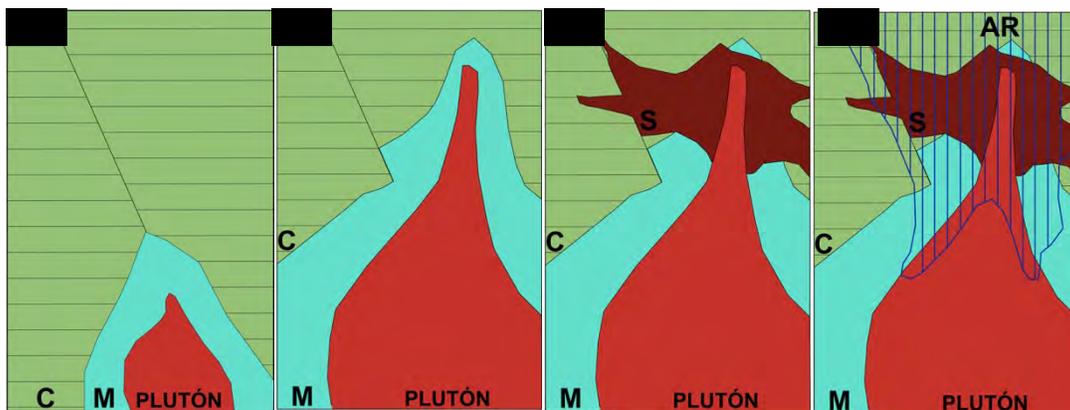


Fig. 2.10. Zonación mineral respecto a la etapa de evolución de los skarns. A) emplazamiento de intrusión que produce metamorfismo de contacto marmolizando la caliza. B) recristalización metamórfica y cambios de fase con bimetasomatismo local y circulación de fluidos, se forman los primeros minerales calco-silicatados (inicio de la etapa prógrada). C) cristalización y liberación de una fase acuosa que resulta en un skarn metasomático controlado por fluido (etapa prógrada). D) Enfriamiento del plutón, separación de la fase vapor y circulación de agua meteórica más fría puede causar alteración retrógrada del ensamble metamórfico y metasomático calco-silicatado. La alteración retrograda es mas extensa en zonas someras. Letras en negro AR: alteración retrógrada, C: caliza, G: granate, M: mármol, P: plutón, S: skarn, W: wollastonita. Modificado de Meinert, et al., (2005).

La porción SW del DMTLM se caracteriza por presentar un skarn cálcico que varía a magnésico desarrollado en los márgenes de cuerpos intrusivos de composición granodiorítica y diorítica en contacto con los carbonatos.

De acuerdo con Mesino-Hernández (2019), los granates presentes en el DMTLM son de tipo andradita, caracterizados por poseer bajos porcentajes de Al y altos porcentajes de Fe y Ca (Fig. 2.11).

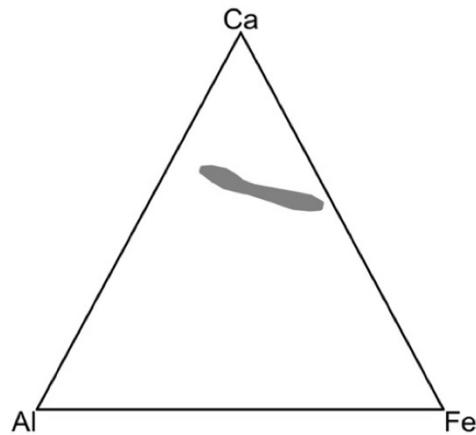


Fig. 2.11. Diagrama ternario Al-Ca-Fe. Composición de los granates del DMTLM (polígono gris). Modificado de Mesino-Hernández (2019).

El skarn presenta una dirección preferencial NNE-SSW a través de mantos irregulares que varían a lentes siguiendo la estratificación, como se observa en las inmediaciones de las minas 5 Señores, Boquillas, El Dorado y Santa Cruz. En superficie presenta una fuerte tonalidad gris-rojiza y fuerte magnetismo (Figura 2.12), con continuidad a profundidad como ha sido reportado con barrenación a diamante.

Comúnmente esta mineralización se ha clasificado como tipo “skarn”, sin embargo, trabajos recientes (p. ej. Dorantes-Castro, 2016; Sarabia-Jacinto, 2017) han propuesto el término composicional “IOCG” para la clasificación de esta mineralización, dada la asociación magnetita-Cu-Au.

En el área de El Dorado el skarn está asociado al contacto mármol-granodiorita y muestra unas dimensiones de 650 m N-S y 250 m E-W y a profundidad se intercala con mármol e intrusivo. Hacia Santa Cruz se observa asociado a estructuras y sigue a lo largo del contacto mármol-intrusivo, con dimensiones de 220 m N-S y 10 m E-W. El skarn se desarrolla en un ancho de 50 m a 60 m y extensiones verticales de más de 100 m (Read y Shoemaker, 2017).

El skarn proximal o endoskarn observado en esta porción del DMTLM muestra una asociación de granate (andradita) > piroxeno (diópsida-hendendergita), magnetita y cuarzo de textura granoblástica que varía a masiva (Fig. 2.13) con cristales de tamaño promedio de 1 cm. Read y Shoemaker (2017) han reportado magnetita cortada por granate y reemplazamientos de piroxeno por granate.

En la zona de El Dorado, la magnetita es el mineral que domina respecto a los calcosilicatos y sulfuros en esta porción. Hacia la profundidad, la transición de endoskarn a diorita es gradacional, pasando a un intrusivo cloritizado-saurisistizado y finalmente fresco (Read y Shoemaker, 2017).

Por su parte, el skarn distal o exoskarn se caracteriza por presentar piroxeno > granate > magnetita y wollastonita de textura bandeada que varía a irregular (Fig. 2.13), con bandas de hasta 1 cm y cristales de tamaño menor a 0.5 cm. Los calcosilicatos dominan respecto a la magnetita y hay mayor presencia de sulfuros.

En el área de Santa Cruz Read y Shoemaker (2017) proponen un patrón de zoneamiento proximal-distal compuesto de olivino-augita (serpentina)-magnetita → diópsida-granate-magnetita → granate-magnetita → garnetita (granate masivo).

La alteración retrógrada reemplaza tanto al endoskarn como al exoskarn y muestra un reemplazamiento caracterizado en primera instancia por anfíbol y fuchsita a través de vetillas y cristales aislados menores a 1 cm. También muestra un reemplazamiento moderado-intenso de clorita, epidota, calcita, cuarzo y micas blancas de manera masiva, selectiva y en vetillas <1mm (Fig. 2.13), reemplazando inclusive a los anfíboles previos. Ocasionalmente el reemplazamiento es tan intenso que no se distingue el protolito.

Otros cristales asociados a esta etapa destacan esfena, vesuvianita, turmalina (asociadas a fuchsita) y sericita como cristales de reemplazo. La sericita es observada principalmente como relleno entre cristales o de fracturas. También ha reportado espinela y serpentina, estos últimos abundantes en el área de Santa Cruz (Pérez-Cruz, 2018).

En las inmediaciones del skarn, porciones distales a los cuerpos intrusivos muestran mármol de color gris claro a gris oscuro de textura granoblástica y estructura masiva a bandeada, con tamaño

de grano de 1 cm que cambia a fino con recristalización parcial y vetillas y finalmente cambia a caliza fresca. El contacto mármol – exoskarn es comúnmente con textura de “knife-edge” (Read y Shoemaker, 2017). El mármol se extiende hasta 400-500 m respecto al intrusivo y en espesor alcanza hasta 500 m en El Dorado. Ocasionalmente presenta bandas de granate y vetillas de magnetita-sulfuros de escasos centímetros (Pérez-Cruz, 2018).

Con base en testigos de la barrenación a diamante, Read y Shoemaker (2017) reportaron una brecha con fragmentos angulares compuesta de mármol dentro de una matriz oscura clorítica y localmente hematítica debajo del skarn. Muestra una geometría subhorizontal y de algunos metros de espesor. Se ha observado bajo el skarn y dentro del mármol.

### **2.5.1 Mineralización metálica**

La mineralización metálica reportada consiste en óxidos (magnetita, hematita), sulfuros (calcopirita, pirita, bornita, esfalerita, galena, arsenopirita, calcocita y covelita) y carbonatos de Cu (malaquita y azurita). También se reporta la presencia de Au y Ag.

La magnetita se observa de manera masiva y abundante dentro del endoskarn y en menor cantidad mediante vetillas y bandeamientos hacia el exoskarn. Frecuentemente muestra reemplazamientos irregulares de hematita. Bajo el microscopio se llega a observar con textura en esqueleto y los reemplazamientos de hematita se observan principalmente en los bordes de los cristales.

Los sulfuros se observan asociados principalmente a la fase retrógrada. Destaca la calcopirita > pirita > bornita > pirrotita y en menor medida esfalerita, galena y arsenopirita. Se presentan como cuerpos masivos irregulares que varían a parches y vetillas menores a 0.5 cm de espesor, ocasionalmente aparecen junto con clorita, epidota, calcita o cuarzo. Bajo el microscopio se distingue calcocita y covelita como reemplazamiento de bornita y calcopirita.

En las zonas expuestas del skarn se observan zonas de color azul y verde claro, que corresponden a carbonatos de Cu tales como malaquita y azurita.

El Au, Cu y Ag se han reportado anómalos con base en los análisis geoquímicos del skarn. El Au ocurre principalmente junto con Ag y Cu y muestra fuerte correlación con As, Bi y Zn (Read y Shoemaker, 2017). El Au y el Cu están asociados a zonas de skarn con alto contenido de magnetita y sulfuros, mientras que en el skarn con poco o nula presencia de magnetita o sulfuros muestra bajos o nulos valores de Au-Cu, así mismo se observa una tendencia a encontrar más Au en el exoskarn que en el endoskarn (Read y Shoemaker, 2017).

Se han reportado cristales de Au nativo menores a 10 micras en bornita (Dorantes-Castro, 2016) y en este trabajo se observaron cristales con características propias de Au en pirrotita y calcita. Respecto a la Ag no se han reportado cristales nativos o minerales.

Con base en los sondeos realizados por la empresa Mexican Gold Corp en las zonas de Santa Cruz, El Dorado y Juan Bran la configuración de la zona mineralizada a profundidad se observa de forma tabular, con dimensiones aproximadas de hasta 100 m a 200 m de ancho, 50 m a 100 m de alto y de 600 m a 1000 m de largo. Los valores obtenidos en los análisis de núcleos cortando skarn muestran valores de Au (1 gr/ton a 39.3 gr/ton), Ag (4.11 gr/ton a 127 gr/ton) y Cu (0.64 a 11.7%) (Read y Shoemaker, 2017).



Fig. 2.12. Afloramiento en la mina Boquillas. Nótese las tonalidades rojizas, producto de la oxidación de magnetita. Vista hacia el SE.

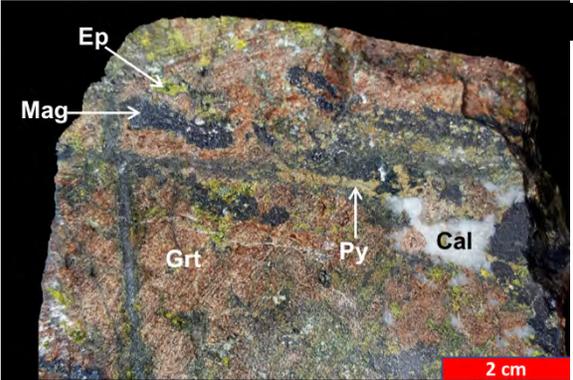
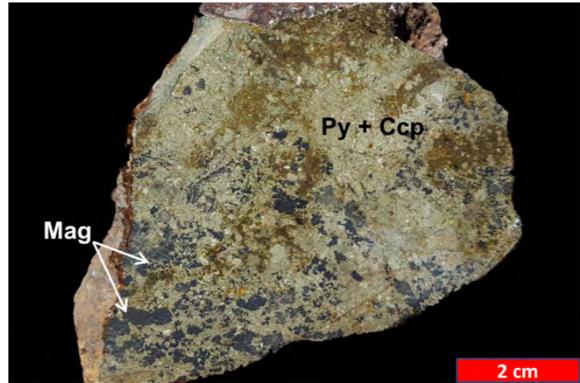
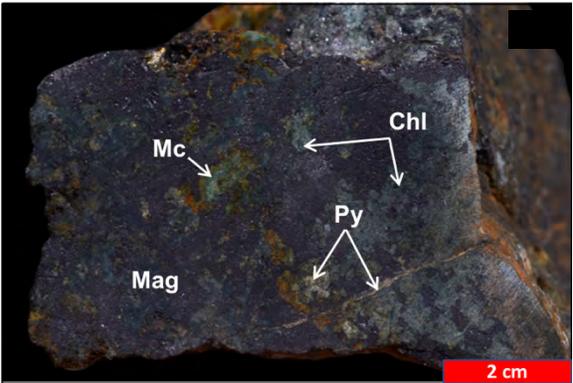
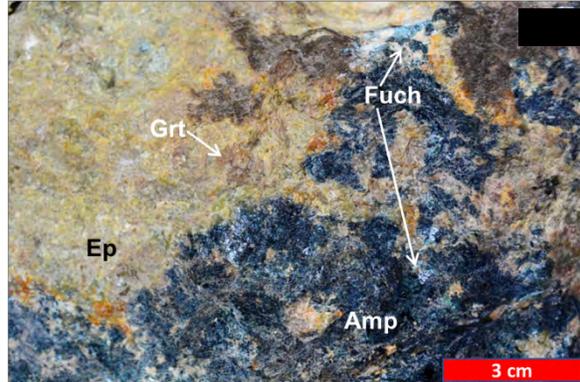
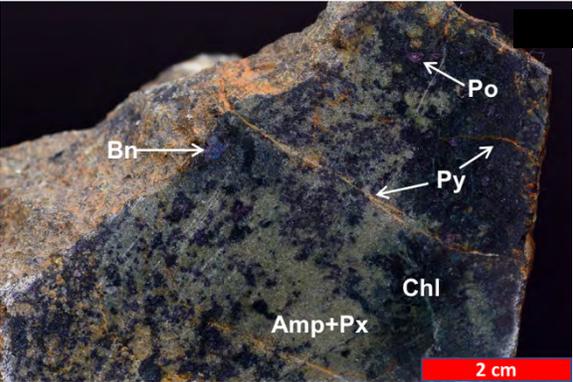
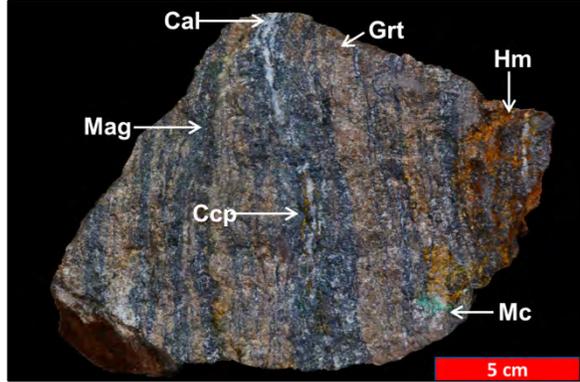
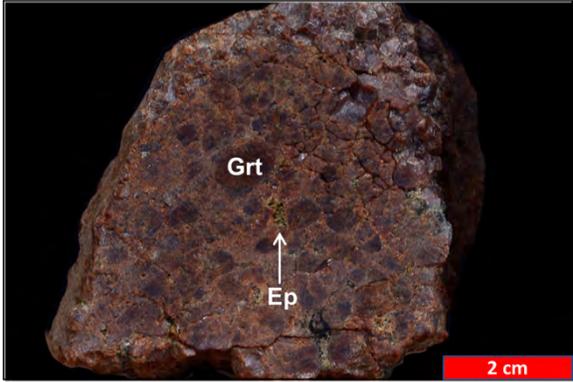


Fig. 2.13. Mineralogía del skarn. A) Granates 1. Skarn de granate con textura granoblástica poligonal, con espacios rellenos de epidota. B) 11 El Dorado. Exoskarn de granate y magnetita con textura bandeada y reemplazamiento de calcita y calcopirita en vetillas con algunos parches de malaquita. La magnetita muestra martitización alterándose a hematita. C) Santa Cruz A. Skarn de piroxeno y anfíbol con reemplazamiento de clorita, bornita y pirrotita en parches y pirita en vetillas. D) 24 F Santa Cruz. Skarn de granate con reemplazamiento de anfíbol y epidota de manera masiva y algunos parches de fuchsita. E) TMG 24 D.1. Reemplazamiento masivo de magnetita reemplazada por parches de clorita y vetillas de pirita. Al final se sobroimponen parches de malaquita. F) 5 señores Py-Ccp. Reemplazamiento masivo de pirita y calcopirita sobreimponiéndose a la magnetita. G) 11 El Dorado. Skarn de granate y magnética en textura bandeada con reemplazamiento de epidota y calcita en parches y vetillas de pirita. H) Mármol 4. Mármol con textura granoblástica, producto de la recristalización de las calizas, distal respecto a la fuente de calor.

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA**

Para la realización de este trabajo se recolectaron 25 muestras de intrusivos para geoquímica de elementos mayores y traza; 30 muestras de intrusivos, skarn y mármol para petrografía; 9 muestras de la zona mineralizada para minerografía; 30 muestras de caliza y calcita para isótopos estables de carbono y oxígeno; 27 muestras de sulfuros para isótopos de azufre y 11 muestras para inclusiones fluidas.

El proceso de recolección consistió en obtener un fragmento representativo tanto de los intrusivos como de la aureola de skarn (proximal-distal) y recristalización principalmente en las minas: 5 señores, Boquillas, El Dorado, Santa Cruz. Las 2 muestras para mediciones U-Pb se recolectaron de las localidades Las Minas y Tatatila respectivamente; la muestra de fuchsita para medición Ar-Ar se recolectó del skarn en las inmediaciones de Las Minas.

Las muestras recolectadas fueron minuciosamente descostradas eliminando todo tipo intemperismo que pudiera influir en los resultados, tratando de dejar la muestra tan fresca como sea posible. Dichas muestras antes de su análisis fueron preparadas en los laboratorios de laminación y molienda del Centro de Geociencias UNAM Juriquilla.

### **3.1 Petrografía**

Las muestras consideradas para la petrografía son representativas de la zona de skarn proximal, distal, mármol e intrusivos.

#### **3.1.1 Corte y laminado**

Cada muestra fue seccionada usando discos de diamante de 6 ½" hasta obtener fragmentos de forma rectangular de 2.5 x 4 x 0.5 cm. Cada fragmento se pulió usando un disco giratorio con abrasivos de sílice de no. 80, 200 y 400 hasta homogenizar las superficies de la muestra y el portaobjetos. Enseguida cada muestra se secó utilizando una placa secadora Thermolyne Cimaree 3. Con resina UV305 se pegó cada muestra al portaobjetos y estas fueron expuestas a luz ultravioleta para su adherencia. Finalmente, con la cortadora de disco MICRATEC y la desbastadora BUEHLER-PETRO THIN y se redujo el grosor de los fragmentos hasta 100 micras. Posterior a esto cada

fragmento fue desbastado manualmente con abrasivo de no. 400 y 600 hasta obtener 30 micras de espesor de cada muestra.

### 3.1.2 Análisis de láminas delgadas

Cada lámina delgada fue analizada en el laboratorio de yacimientos minerales del Centro de Geociencias UNAM Juriquilla, utilizando un microscopio petrográfico Leica DM4500P y una cámara incorporada Leica DFC420C mediante luz transmitida. Cada muestra se clasificó modalmente con base en el diagrama QAPF (Streckeisen, 1976).

## 3.2 Geoquímica

Los intrusivos considerados para el análisis geoquímico afloran dentro y en las inmediaciones del área de estudio, incluyendo intrusivos asociados a la mineralización y posteriores.

### 3.2.1 Triturado, pulverizado y horno de secado

Las muestras recolectadas se fragmentaron en tamaños de 10 cm con un mazo de 20 libras y las esquirlas se trituraron con una prensa de 20 toneladas. Enseguida cada muestra se tamizó con malla 4, 10 y 40 hasta obtener al menos 200 gr de muestra de malla 10. El restante se almacenó en caso de requerir más muestra.

Los 200 gr de muestra de malla 10 se lavaron con agua RO (ósmosis inversa) y agua desionizada. Enseguida se montaron en el limpiador ultrasónico y se trabajaron durante 3 minutos a máxima potencia. Una vez limpia la muestra se ingresó al horno de secado durante 8 horas a 80 °C de temperatura. Ya seca la muestra se seleccionó y separó cada fragmento con el menor grado de alteración hasta conseguir 160 gr de muestra.

Después de separar la muestra, se separaron 80 gr y se ingresaron al molino Shatter box para pre-contaminarlo y luego se desechó la muestra. Enseguida se agregaron los 80 gr restantes y se molió hasta obtener fragmentos finos. Al final cada muestra se almacenó en recipientes de plástico, se etiquetaron y se enviaron a los laboratorios. El proceso es el mismo para elementos mayores y traza.

### 3.2.2 Medición de elementos mayores

Los análisis de elementos mayores fueron realizados en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía dentro de las instalaciones de Ciudad Universitaria de la UNAM, mediante Fluorescencia de Rayos X (XRF) utilizando un instrumento tipo Siemens SRS-3000 con perlas preparadas con 90% de fundente. La preparación y medición se llevó a cabo usando los procedimientos de Lozano y Bernal (2005). Los resultados se recalcularon al 100% y se normalizaron a base anhidra.

### 3.2.3 Medición de elementos traza

Los análisis de elementos traza fueron llevados a cabo en el Laboratorio Ultralimpio dentro de las instalaciones del Centro de Geociencias UNAM Juriquilla, a través del método de Espectrometría de Masas (ICP-MS) utilizando un instrumento Thermo Series XII. La preparación y medición de las muestras se basó en la metodología propuesta por Mori et al., (2009). Los resultados se normalizaron a condritas y MORB con base en Sun & McDonough (1989).

## 3.3 Minerografía

Se seleccionaron muestras de las zonas de magnetita y sulfuros masivos dentro de las fases progradada y retrogradada del skarn para su análisis minerográfico.

### 3.3.1 Corte y montaje

Cada muestra fue cortada a fragmentos circulares de 2.5 cm de diámetro x 1 cm utilizando cortadoras de disco de diamante de 6 ½ “. Los fragmentos resultantes fueron limpiados y montados en pequeños contenedores circulares de plástico y fueron rellenados en frío con resina epóxica. Cada fragmento se dejó secar toda la noche.

### 3.3.2. Desbaste y esmerilado

Una vez las muestras secas, se desbastaron hasta obtener una superficie plana y homogénea mediante el disco giratorio, utilizando abrasivos gruesos graduando a granos finos. El tiempo de desbaste y el tipo de abrasivos varía en función de las irregularidades de la superficie y la dureza de la muestra.

### 3.3.3 Pulido con diamante

Se utilizó el diamante como abrasivo para conseguir una eliminación rápida de material y una planitud óptima. La secuencia de pulido fue de 6, 3 y 1 micras sobre un plato giratorio al cual se le colocó un paño tipo TEXMET 2000 de Buehler. Cada muestra fue pulida entre 10 y 5 minutos usando una fuerza mínima de 1.5 newtons (N) a una velocidad de 150 rpm.

### 3.3.4 Análisis de secciones pulidas

Cada sección fue analizada en el laboratorio de yacimientos minerales del Centro de Geociencias UNAM Juriquilla, Querétaro, utilizando un microscopio petrográfico Leica DM4500P y una cámara incorporada Leica DFC420C mediante luz reflejada.

## **3.4 Inclusiones fluidas**

Se realizó una selección y separación de minerales claros y semiclaros (cuarzo, calcita, anfíbol, granate, fuchsita) considerando la paragénesis, zonas proximales, distales y la alteración progradada y retrogradada del skarn.

### 3.4.1 Preparación de secciones doblemente pulidas

La preparación de las secciones doblemente pulidas se llevó a cabo considerando el método de 8 pasos propuesto por Goldstein (2003).

- 1.- Impregnación de la muestra: cuando la muestra es porosa o deleznable se impregna con resina epóxica, para darle estabilidad y resistencia durante el procedimiento.
- 2.- Corte de la muestra, con una sierra diamantada se corta la muestra procurando obtener un fragmento de 0.5 mm.
- 3.- Esmerilado, se realiza sobre ambas caras cortadas.
- 4.- Pulido de la primera cara.
- 5.- Montaje de la cara pulida, esta se pega sobre un vidrio.
- 6.- Corte del excedente de roca, se corta la cara opuesta a la superficie pegada, dándole un grosor de 0.5 mm.
- 7.- Desbastado de la nueva cara.
- 8.- Pulido final a la nueva cara.

Ya terminada la muestra, se desmonta del portaobjetos para realizar la limpieza final, obteniendo secciones doblemente pulidas de 100 a 150 micras de espesor.

### 3.4.2 Análisis petrográfico y mediciones microtermométricas

Antes de la medición de las muestras, se observaron los fragmentos y se seleccionaron aquellos con inclusiones primarias, al menos bifásicas y de tamaño adecuado para poder observar cambios de fase. A cada fragmento se le realizó una descripción general con base en su situación, tamaño y relación volumétrica.

El análisis microtermométrico fue realizado en el laboratorio de yacimientos minerales del Centro de Geociencias UNAM Juriquilla. Se utilizó una platina calentadora-refrigeradora con un rango de temperatura de  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$  Linkan THMSG600 montada sobre el microscopio petrográfico Olympus BX51 y una consola de medida y regulación Linkan LNP y TMS93.

Las temperaturas de homogenización y fusión obtenidas se plasmaron en tablas de cálculo mediante el software Excel. Se estimó el promedio y se calculó la salinidad en relación con Steele-MacInnis et al., (2012) y la presión y profundidad con base en Hezarkhani y Williams-Jones, (1998). Para el análisis de las IF de esta porción se incluyeron 22 mediciones de Sarabia-Jacinto (2017) de la mina El Dorado, 4 mediciones de la mina 5 Señores (González-Partida, no publicado), 5 mediciones de la mina Santa Cruz (González-Partida, no publicado) y 6 muestras de la zona de La Blanca (González-Partida, no publicado).

## 3.5. Isótopos estables

Se seleccionaron muestras representativas de las zonas mineralizadas, principalmente de alteración retrograda dentro del skarn y los halos aledaños de marmolización y recristalización.

### 3.5.1 Preparación de muestras

En relación con los isótopos de C y O se consideraron muestras provenientes de la alteración retrógrada, mármol, caliza recristalizada y caliza fresca. Se seleccionaron 14 muestras de caliza y 23 de calcita, las cuales fueron seleccionadas minuciosamente recuperando un 1 gr por muestra. Posteriormente fueron separadas y etiquetadas.

Los isótopos de S se separaron de cristales de pirita, galena y calcopirita provenientes de la zona mineralizada asociada a la alteración retrograda. Se consideraron 27 muestras de las cuales se recuperó 1 gr de sulfuros.

### 3.5.2 Medición de isótopos de C y O

El análisis isotópico fue llevado a cabo considerando el método propuesto por McCrea (1950), utilizando un Gas Bench II acoplado a un espectrómetro de masas Termo Finnigan MAT 253 en las instalaciones del Instituto de Geología de la UNAM. Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  son reportados en valores delta ( $\delta$ ) permil (‰) de estándares VPDB y VSMOW respectivamente.

### 3.5.3 Medición de isótopos de S

El procedimiento de análisis consistió en pesar 0.2 a 3 mg en función del tipo de muestra, en cápsulas de Sn con  $\text{V}_2\text{O}_5$  como catalizador. Se realizó el análisis elemental de las cápsulas preparadas y la separación de los gases mediante una columna cromatográfica con posterior análisis del gas  $\text{SO}_2$ . Para las mediciones se utilizó un espectrómetro de masas de relación isotópica (IRMS) EA-Delta Plus XP Thermofisher en los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona. Los valores  $\delta^{34}\text{S}$  son reportados en valores  $\delta\%$  con respecto a VCDT.

## 3.6. Mediciones radiométricas

Se recolectaron 2 muestras de intrusivos para realizar mediciones U-Pb. Una muestra se recolectó en las inmediaciones de Las Minas (T-24) y la otra muestra se recolectó en las inmediaciones de Tatatila (T-5) para estimar la edad de cristalización. Así mismo se recolectó una muestra de cristales de fuchsita en paragénesis con los sulfuros (porción retrógrada) para estimar la edad de mineralización.

### 3.6.1 Preparación de muestras

La preparación de las muestras para la medición U-Pb de los intrusivos consistió en la separación de zircones. El proceso de pulverizado es similar al utilizado en las muestras para geoquímica.

Los fragmentos requeridos en este proceso fueron de malla 80 y 100. Estos fueron lavados con agua de llave desechando el material ligero. La muestra se ingresó al horno de secado durante 12 horas a 80 °C de temperatura. Enseguida cada muestra se sometió a una separación de materiales con alta y baja susceptibilidad magnética utilizando el “Franz”. La fracción no magnética se sometió a una separación por densidades, donde cada fracción de muestra se pasó por yoduro de metileno con densidad de 3.3 g/cm<sup>3</sup> y consecuentemente los minerales densos como el zircón precipitaron al fondo. La fracción resultante se analizó bajo el microscopio binocular y se seleccionaron y separaron los zircones resultantes. Estos fueron montados en resina epóxica y luego fueron pulidos. Nuevamente se observaron bajo el microscopio binocular ELM 3R y se tomaron imágenes de catodoluminiscencia con una cámara digital incorporada al microscopio para conocer la estructura del zircón y seleccionar los sitios de análisis.

La preparación de muestra para el análisis de Ar-Ar consistió en la selección selectiva de cristales de fuchcita (cristal de ganga del skarn de la mina Santa Cruz) de la muestra Santa Cruz 1, los cuales fueron lavados con agua desionizada y posteriormente se les dio un baño ultrasónico de 15 minutos. Los fragmentos se empaquetaron, etiquetaron y fueron enviados para su análisis.

### 3.6.2 Medición de U-Pb

El análisis de U-Pb se llevó a cabo en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) en el Centro de Geociencias UNAM Juriquilla, utilizando un sistema de ablación laser conectado a un espectrómetro de masas cuadrupolar de fuente de plasma inductivamente acoplada (LA-ICPMS), mediante la metodología analítica descrita por Solari et al. (2010). Las curvas de concordia y las edades promedio se graficaron utilizando el software online IsoplotR (Vermeesch, 2018).

### 3.6.3 Medición de Ar-Ar

El análisis de Ar-Ar fue llevado a cabo en el Laboratorio de Geocronología del Departamento de Geología, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), con base en la metodología utilizada en ese laboratorio y se utilizó un espectrómetro de masas VG5400. La presentación gráfica se hizo mediante los softwares RaDan y Age-CalcVG5400, diseñados para el laboratorio de Geocronología del CICESE. Los datos se presentaron en forma de espectros de edad para representar edad de meseta (tp) y en un diagrama de correlación o isócronas.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.1. Intrusivos

#### 4.1.1 Petrografía

Los intrusivos del DMTLM incluyen cuerpos de composición máfica que varía a félsica con textura fanerítica dominante que cambia a glomeroporfídica y porfídica. Las principales características se resumen en la tabla 4.1 y las descripciones petrográficas se encuentran en el anexo 1.

Las texturas glomeroporfídicas y porfídicas se limitan a dioritas, monzodioritas, cuarzo monzodioritas y cuarzo monzonitas con una cristalinidad holocristalina > hipocristalina (T-16, T-17, T-19, T-20, T-25) (Fig. 4.1). Se componen de plagioclasa > cuarzo + feldespatos potásico + anfíbol con variación en contenido y en menor medida biotita + piroxeno, siendo el ortopiroxeno más abundante que el clinopiroxeno. Los tamaños de cristales alcanzan hasta 4 mm con un promedio de 2 mm. La matriz es menor al 40% de la muestra y en algunos casos alcanza el 60%. En la textura porfídica la matriz es criptocristalina y en la textura glomeroporfídica muestra cristales de plagioclasa, feldespatos potásico, cuarzo, anfíbol, biotita y magnetita de 0.1 a 0.5 mm (Fig. 4.2).

Las texturas faneríticas abarcan todo el rango de clasificación de gabro hasta granito y muestran cristalinidad holocristalina en general.

Los intrusivos de composición básica, de gabro a diorita (T-1, T-2, T-8, T-9, T-10, T-21, T-23, T-26, T-28, T-33) (Fig. 4.1) presentan una mineralogía de plagioclasa > olivino (en gabros) ± feldespatos potásico ± cuarzo (estos últimos en diorita, menos del 5%), así como clinopiroxeno (en gabro) + ortopiroxeno (en diorita) + anfíbol + biotita. El tamaño de grano alcanza hasta los 4 mm con un promedio de 2 mm. La diferencia entre el gabro y la diorita radica en su contenido de olivino y mayor cantidad de ferromagnesianos. Los olivinos son parcialmente alterados a serpentina. El anfíbol se hace más abundante en diorita (Fig. 4.2).

Los intrusivos de composición intermedia incluyen cuarzo dioritas, monzodioritas, cuarzo monzodioritas, monzonitas y sienitas (T-3, T-4, T-5, T-6, T-7, T-11, T-12, T-13, T-14, T-15, T-24, T-29, T-30, T-31) (Fig. 4.1). Se componen de plagioclasa > cuarzo ± feldespatos de potasio y varía a

feldespato de potasio > plagiocasa ± cuarzo. En menor medida muestran anfíbol + biotita ± ortopiroxenos, siendo abundantes los dos primeros alcanzando hasta el 15% de composición modal. El tamaño de los cristales alcanza los 4mm con un promedio de 2 mm. Escasas plagiocasas muestran maclado tipo tenedor (Fig. 4.2).

Los intrusivos de composición ácida como la granodiorita, el monzonogranito y el granito (T-18, T-22, T-27, T-29, T-32) (Fig. 4.1) muestran una mineralogía de feldespato de potasio > plagiocasa + cuarzo que varía a plagiocasa > feldespato de potasio + cuarzo, también muestran biotita + anfíbol con menos del 5% de composición modal. Se observan tamaños de grano de hasta 6 mm, siendo abundantes los de 2 mm (Fig. 4.2).

Se observó la presencia de minerales opacos como la magnetita, presente en todas las muestras (hasta 5%), ilmenita (menor a 3%, observada en 6 muestras), así como pirita y algunos accesorios como el zircón y apatito con presencia menor a 3%. Algunos minerales como las plagioclasas o feldespatos mostraron corrosión parcial en el cristal y en sus bordes, lo que sugiere un proceso de desequilibrio en el magma.

La alteración observada es débil y es caracterizada por sericita, clorita, epidota con reemplazamiento selectivo, así como serpentina reemplazando olivino.

10\* Cuarzo diorita

10 Gabro/Diorita

9\* Qz monzodiorita

9 Monzodiorita

8\* Cuarzo monzonita

8 Monzonita

7 Sienita

4 Granodiorita

3b Monzogranito

2 Granito

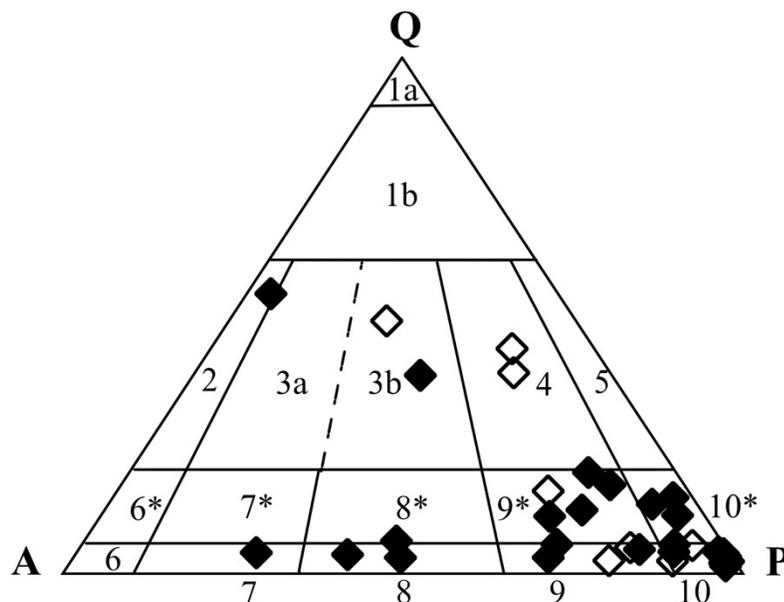


Fig. 4.1. Diagrama ternario QAPF. Clasificación de los intrusivos del DMTLM. Diamantes sin relleno corresponden a intrusivos de la porción SW del DMTLM, tomados de Dorantes-Castro (2016). Q: cuarzo, A: feldespato alcalino, P: plagioclasa. Diagrama modificado de Streckeisen (1976).

ID	Muestra	Textura	Minerales esenciales	Minerales accesorios	Clasificación modal (Streckeisen, 1976)
T-1	TMG1	Fanerítica	Pl+Amp+Px	Bt+Ol	Gabro
T-2	TMG2	Fanerítica	Pl+Bt+Amp+Px	Kfs+Qz	Diorita
T-3	TMG3	Fanerítica	Pl+Qz+Amp+Kfs+Bt		Cuarzo monzodiorita
T-4	TMG4	Fanerítica	Pl+Kfs+Qz+Amp+Bt	Px	Cuarzo monzodiorita
T-5	TMG5	Fanerítica	Pl+Kfs+Bt+Amp	Qz+Px	Monzodiorita
T-6	TMG6	Fanerítica	Pl+Kfs+Qz	Bt+Amp+Px+Zrn	Cuarzo monzodiorita
T-7	TMG7	Fanerítica	Pl+Amp+Qz	Kfs+Bt+Ap	Cuarzo diorita
T-8	TMG8	Fanerítica	Pl+Amp+Bt+Px		Diorita
T-9	TMG9	Fanerítica	Pl+Amp	Bt+Qz	Diorita
T-10	TMG10	Fanerítica	Pl+Amp+Bt	Px+Kfs+Qz	Diorita
T-11	TMG11	Fanerítica	Pl+Kfs+Amp	B+Qz	Monzodiorita
T-12	TMG12	Fanerítica	Pl+Kfs+Bt+Amp	Qz	Monzonita
T-13	TMG13	Fanerítica	Pl+Qz	Amp+Bt	Cuarzo diorita
T-14	TMG14	Fanerítica	Kfs+Pl+Amp+Bt	Px+Qz+Zrn	Monzonita
T-15	TMG15	Fanerítica	Kfs+Pl+Bt+Amp	Qz+Zrn	Sienita
T-16	TMG16	Glomeroporfídica	Pl+Qz+Kfs+Bt	Amp+Px+Zrn	Cuarzo monzodiorita
T-17	TMG17	Glomeroporfídica	Pl+Kfs+Amp	Bt+Qz+Zrn	Monzodiorita
T-18	TMG18	Fanerítica	Qz+Pl+Kfs	Bt	Monzogranito
T-19	TMG19	Porfídica	Pl+Amp	Bt+Qz+Px	Diorita
T-20	TMG20	Glomeroporfídica	Pl+Kfs+Bt+Qz		Cuarzo monzonita
T-21	TMG21	Fanerítica	Pl	Amp+Qz+Bt	Diorita
T-22	TMG22	Fanerítica	Qz+Kfs	Amp+Bt+Pl	Granito
T-23	TMG23	Fanerítica	Pl+Amp	Qz+Phl	Diorita
T-24	TMG24	Fanerítica	Pl+Amp+Qz	Bt+Kfs	Cuarzo diorita
T-25	TMG26	Glomeroporfídica	Pl	Amp+Px	Diorita
<b>T-26</b>	<b>1TJBQ</b>	<b>Fanerítica</b>	<b>Pl±Kfs</b>	<b>Amp±Kfs±Bt</b>	<b>Diorita</b>
<b>T-27</b>	<b>532</b>	<b>Fanerítica</b>	<b>Pl+Kfs+Qz</b>	<b>Px±Amp</b>	<b>Granodiorita</b>
<b>T-28</b>	<b>538</b>	<b>Fanerítica</b>	<b>Pl</b>	<b>Px+Bt+Amp</b>	<b>Gabro</b>
<b>T-29</b>	<b>AUXA5</b>	<b>Fanerítica</b>	<b>Qz+Pl+Kfs</b>	<b>Bt+Amp</b>	<b>Granito</b>
<b>T-30</b>	<b>33</b>	<b>Fanerítica</b>	<b>Pl+Kfs+Qz</b>	<b>Bt+Px+Amp</b>	<b>Monzodiorita</b>
<b>T-31</b>	<b>PNII</b>	<b>Fanerítica</b>	<b>Pl+Kfs±Qz</b>	<b>Bt+Amp</b>	<b>Monzodiorita</b>
<b>T-32</b>	<b>529</b>	<b>Fanerítica</b>	<b>Kfs+Qz</b>	<b>Bt+Amp</b>	<b>Granodiorita</b>
<b>T-33</b>	<b>LM-14-SC-10</b>	<b>Fanerítica</b>	<b>Pl+Ol</b>	<b>Px</b>	<b>Gabro</b>

Tabla 4.1. Resumen de la petrografía de los intrusivos del DMTLM. Las columnas en negrita corresponden a las características petrográficas de los intrusivos de la porción SW del DMTLM reportados por Dorantes-Castro (2016). Amp (anfíbol), Bt (biotita), Kfs (feldespato potásico), Ol (olivino), Pl (plagioclasa), Px (píroxeno), Qz (cuarzo).

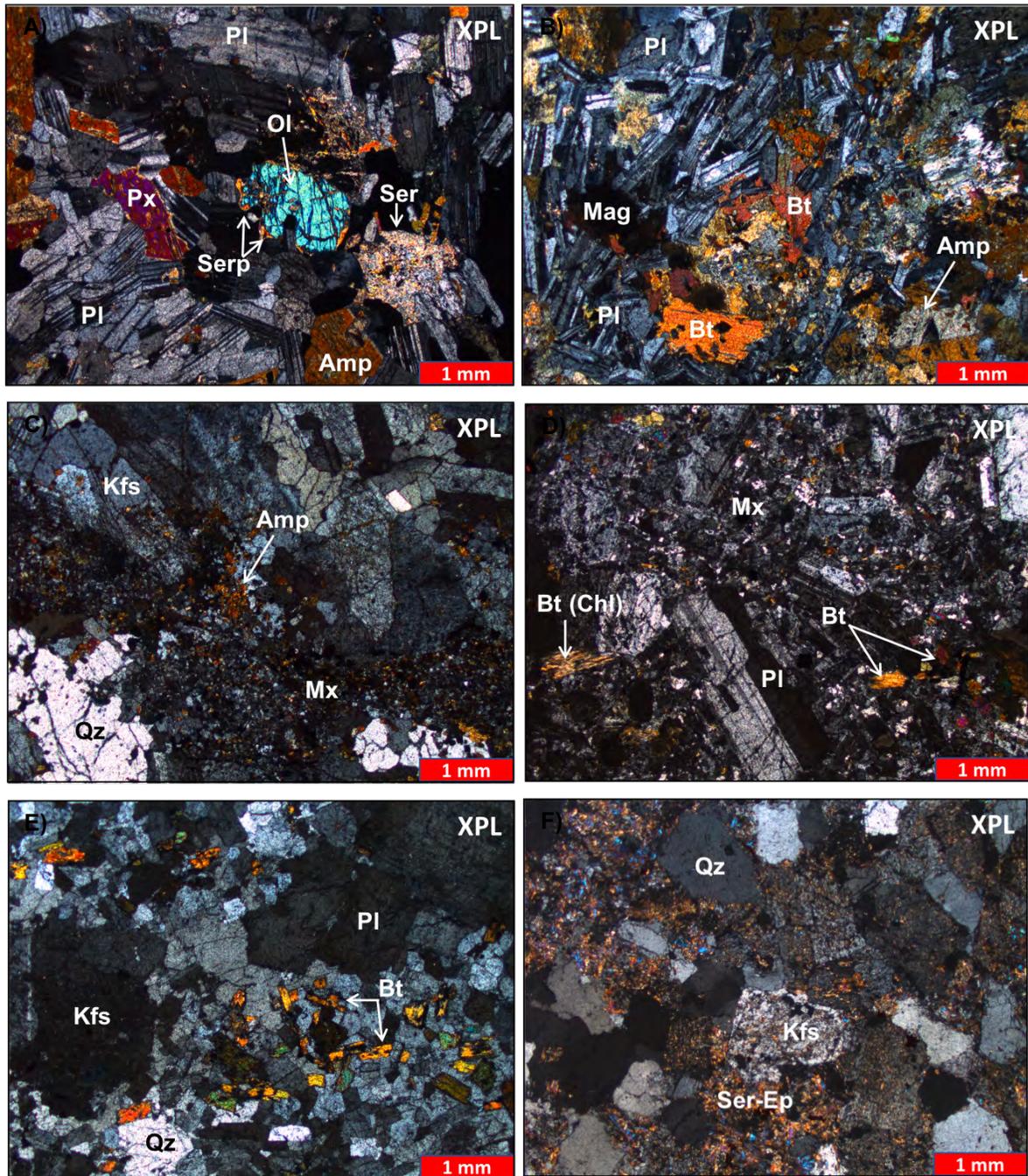


Fig. 4.2. Petrografía de los intrusivos. A) Muestra TMG1, gabro de textura fanerítica con abundancia de plagioclasa (>50% An) y escasos cristales de olivino con bordes alterados a serpentina. B) Muestra TMG 8, diorita de textura fanerítica compuesta principalmente de plagioclasa (~50% An) con escasa presencia de anfíbol y biotita. C) Muestra TMG16, cuarzo monzodiorita de textura porfídica, cristales de plagioclasa (<50% An), cuarzo, feldespato de potasio y anfíbol rodeados de una matriz criptocristalina con microlitos de plagioclasa D) Muestra TMG19, diorita de textura glomeroporfídica. Aglomerados de plagioclasa (<50% An), anfíbol y biotita rodeados de una matriz criptocristalina con microlitos de plagioclasa. La biotita y el anfíbol muestran débil alteración a clorita y epidota respectivamente. E) Muestra TMG20, cuarzo monzonita de textura fanerítica y poikilitica. Fenocristales de plagioclasa (<50% An), feldespato de potasio y pequeños cristales de cuarzo. En ocasiones los cristales de plagioclasa albergan microcristales de biotita. F) Muestra TMG22, granito de textura fanerítica. Fenocristales de feldespato de potasio y cuarzo con escasos rellenos de microlitos de sericita y epidota. Amp (anfíbol), Bt (biotita), Ep (epidota), Kfs (feldespato de potasio), Mx (matriz), Mag (magnetita), Pl (plagioclasa), Ser (sericita).

## 4.1.2 Geoquímica

Los resultados geoquímicos de elementos mayores, menores y traza de los intrusivos se graficaron en diagramas binarios y ternarios con la finalidad de clasificar los intrusivos, indagar sobre su origen, evolución y ambiente tectónico, magmatismo relacionado a ciertos tipos de skarn en el sentido de Meinert (1995) y afinidad adakítica. Ocasionalmente se mezclaron los elementos traza y mayores para observar características más específicas. Los elementos mayores se normalizaron a base anhidra y los elementos traza se normalizaron respecto a condrita y MORB (Sun & McDonough, 1989). Los resultados de los análisis se encuentran en el anexo 2 y 3.

### 4.1.2.1 Clasificación geoquímica y afinidad magmática

Los contenidos de  $\text{SiO}_2$  oscilan entre 44% a 78% y con una predominancia de 52% a 62%, con un contenido de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) de 1.5% a 8.7%. Con base en el diagrama Si vs álcalis total para clasificación de rocas intrusivas, las muestras varían entre gabro, gabrodiorita, monzodiorita, diorita, granodiorita y granito (Fig. 4.3), siendo la monzodiorita abundante. Esta clasificación es consistente con la clasificación modal. La mayoría de las muestras clasifican como sub-alcálicas (Fig. 4.3).

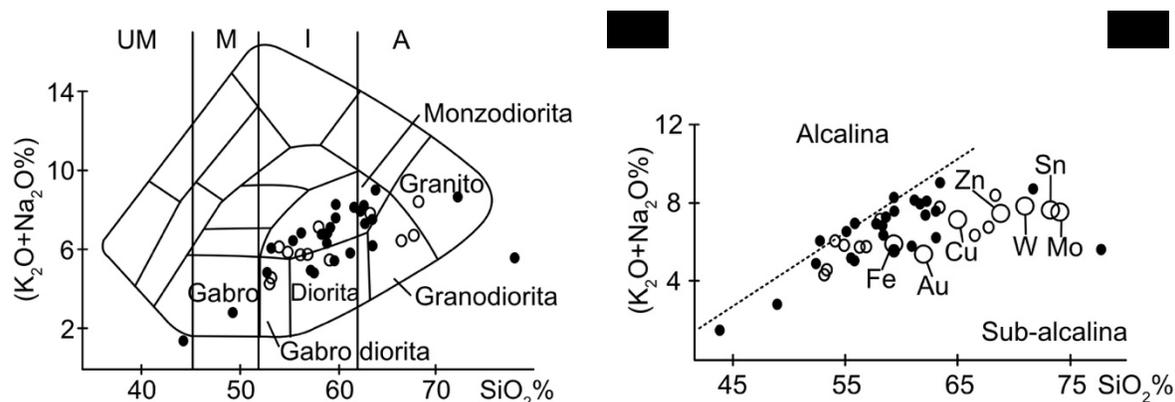


Fig. 4.3. Clasificación geoquímica sílice vs álcalis. A) Diagrama  $\text{SiO}_2$  vs álcalis. Los intrusivos se agrupan principalmente en una composición intermedia. Modificado de Cox et al. (1979). B) Diagrama  $\text{SiO}_2$  vs álcalis, los intrusivos se clasifican como sub-alcálicas principalmente. Modificado de Le Maitre et al. (1989) y Meinert (1995). Los círculos pequeños sin relleno son análisis de intrusivos de la porción SW del DMTLM, tomados de Dorantes-Castro (2016).

En relación con el diagrama AFM (álcalis,  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ) las muestras se clasifican como calci-alcálicas y un par de ellas como toleíticas (Fig. 4.4). Las muestras de la porción SW caen

completamente dentro del campo de calci-alcálicas. Con base en el diagrama de índice de saturación de aluminio (ASI), los intrusivos se ubican dentro del campo metaluminoso y escasamente en peraluminosos (Fig. 4.4). Las muestras metaluminosas sugieren un exceso de Ca luego de que el Al ha sido acomodado en los feldespatos de potasio, dando como resultado rocas con fases cálcicas como horblenda y augita, pero carecen de moscovita o fases ferromagnesianas-sódicas. Cuando las rocas son ligeramente peraluminosas indica que la fase puede contener biotita aluminosa (Frost et al., 2001), datos consistentes con las observaciones petrográficas. En ambos diagramas se sobre impusieron los valores promedio de composición de intrusivos asociados a ciertos tipos de skarn (Meinert, 1995), siendo los intrusivos del DMTLM con afinidad a skarn de Au, Cu y Fe principalmente.

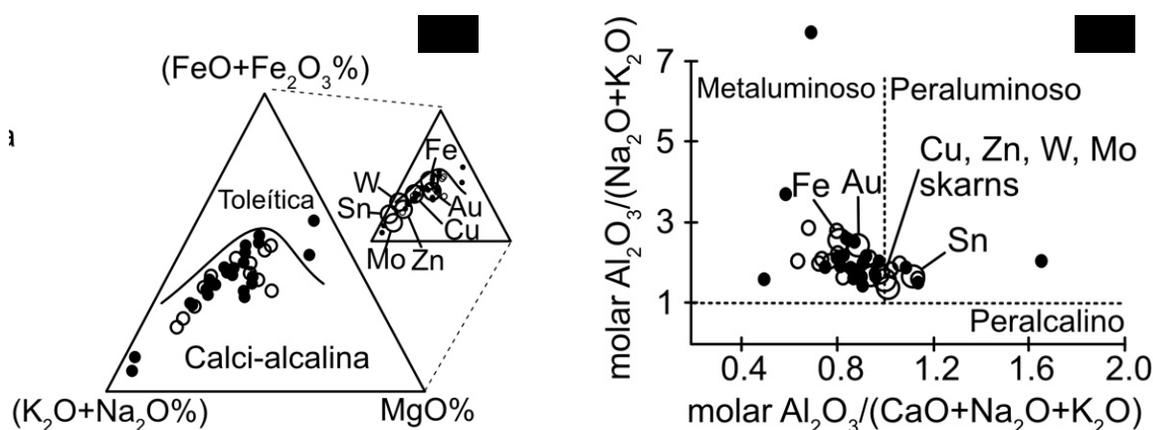


Fig. 4.4. Diagramas AFM y saturación de Al. A) Diagrama ternario AFM. Intrusivos de afinidad calco-alcálica y en menor medida toleítica. Muestran afinidad a skarn de Au, Cu y Fe. Modificado de Irvine y Baragar (1971) y Meinert (1995). B) Diagrama de saturación de aluminio, los intrusivos muestran afinidad al campo metaluminoso. Modificado de Frost et al. (2001) y Meinert (1995). Los círculos pequeños sin relleno son análisis de intrusivos de la porción SW del DMTLM, tomados de Dorantes-Castro (2016).

#### 4.1.2.2 Ambiente tectónico

Los valores de elementos traza y REE se graficaron en diagramas bivariados considerando los valores en ppm, escala logarítmica base 10 y normalizados a manto primitivo y condrita respectivamente (Sun & McDonough, 1989).

Los valores de Rb vs Y+Nb oscilan entre 5.2 a 108 y 9 a 68.3 respectivamente, mientras que los valores de Nb vs Y rondan entre 1.2 a 19 y 2.7 a 49.7 respectivamente. Estos valores evidencian intrusivos con afinidad a un ambiente de tipo arco volcánico (VA) con ligera variación a un ambiente intraplaca (WP). Así mismo se observa una afinidad a skarn de Fe, Au y Cu (Fig. 4.5).

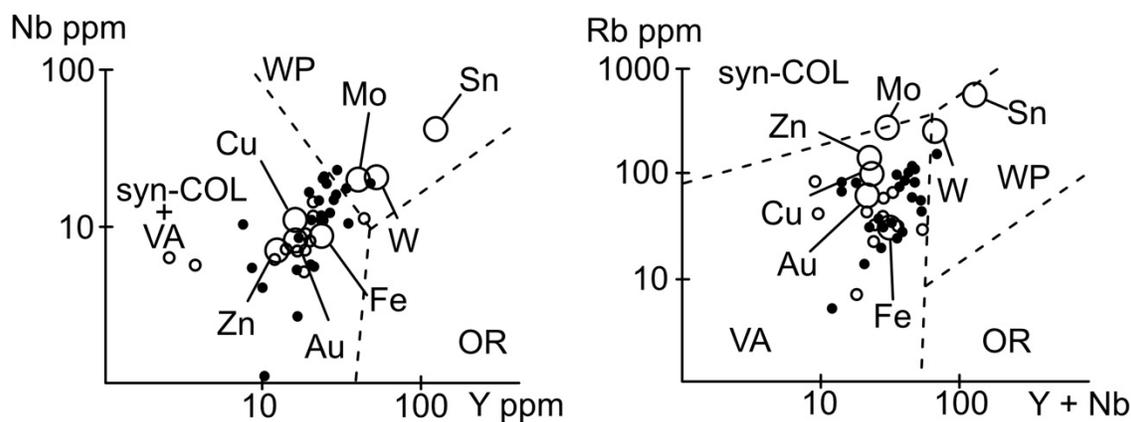


Fig. 4.5. Diagramas de discriminación tectónica. Los intrusivos muestran afinidad a un ambiente de tipo arco asociados a skarns de Au, Cu y Fe principalmente. Syn-COL (sin colisional), VA (arco volcánico), WP (intraplaca), OR (orogénico). Modificado de Meinert (1995) y Pearce et al., (1984). Los círculos pequeños sin relleno son análisis de intrusivos de la porción SW del DMTLM, tomados de Dorantes-Castro (2016).

#### 4.1.2.3 Afinidad adakítica

Respecto a los diagramas multielementos, el valor promedio de los intrusivos del DMTLM muestran anomalías positivas en Rb, Ba y K y negativa en Nb, así como un empobrecimiento en elementos HSFE, comportamiento similar a los valores reportados para el valor promedio de adakititas (Martin, 1999) e intrusivos con firma adakítica del Distrito Mezcala (González-Partida et al., 2003), siendo los intrusivos del DMTLM ligeramente más enriquecidos en HSFE respecto al valor promedio de adakititas (Fig. 4.6).

Los valores negativos de Nb pueden ser producto de su partición en fases ricas en Ti (titanita, rutilo, anfíboles ricos en Ti), así mismo es común en fundidos relacionados a subducción (Drummond y Defant, 1990; Winter, 2013). Al existir titanita/rutilo se debería observar anomalía negativa de Ti, sin embargo, esto no sucede, lo que puede indicar que el anfíbol jugó un rol importante durante la fusión del basalto, así como durante la subsecuente cristalización fraccionada (Martin, et al., 2005). Respecto al Rb y K son elementos fuertemente incompatibles con los minerales residuales de la fusión de la peridotita (olivino, ortopiroxenos, clinopiroxenos y granate) y por lo tanto los valores del manto no deberían ser fuertemente fraccionados durante la fusión (Martin et al., 2005).

Los elementos REE muestra un enriquecimiento en REE ligeras (LREE) en relación con las REE pesadas (HREE) con una ligera anomalía de Eu. El comportamiento de los intrusivos del

DMTLM es consistente con los valores REE promedio del Distrito Mezcala (González-Partida et al., 2003), sin embargo, no llegan a ser tan empobrecidos en REE pesadas (Fig. 4.6). El empobrecimiento de HREE está asociado a la presencia de granate en el residuo de la fusión parcial de su fuente (Martin, 1999), ya que este puede acomodar mejor HREE que LREE, así como ortopiroxenos u hornblenda aunque en menor grado (Winter, 2013), a diferencia de los magmas calci-acalinos, los cuales no tiene estos minerales como fases residuales durante su génesis (Martin, 1986).

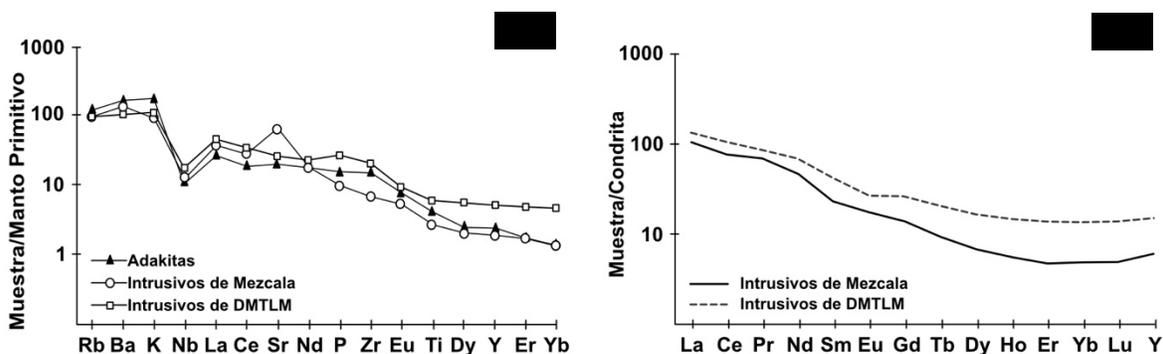


Fig. 4.6. Diagramas de elementos traza y REE. Los intrusivos del DMTLM muestran consistencia respecto al valor promedio de adakitas (Martin, 1999) y adakitas del Distrito Mezcala (González-Partida et al., 2003), siendo esta última firma asociada a un skarn de Au.

Las relaciones La/Yb normalizados oscilan entre 3.4 y 108 (promedio 14.7) vs los valores de Yb normalizado varían entre 0.7 a 13.5 (promedio 4) del DMTLM (Fig. 4.7), estos valores son bajos a intermedios respecto al campo de adakitas para la mayoría de las muestras, con menor número ubicándose dentro del campo de arco de islas y otras más cayendo fuera del rango (Martin, 1986). Las adakitas son fuertemente fraccionadas en REE y muestran relaciones  $La/Yb_N > 10$ , a diferencia de las rocas calciacalinas que muestran menor fraccionamiento de REE con una relación  $La/Yb_N < 10$  (Martin, 1999).

El DMTLM muestra valores de 7 a 190 (promedio de 37) de Sr/Y y valores de 2.7 a 49.7 (promedio de 21.39) de Y (Fig. 4.8). Respecto a los valores de adakitas muestra valores bajos de la relación Sr/Y y valores dispersos de Y (Drummond y Defant, 1990; Martin, et al., 2005). La mayoría de las muestras del DMTLM caen en el campo compartido de adakitas y arco de islas, mostrando valores intermedios de Y principalmente. El Y es fuertemente particionado a granate o anfíbol, mientras que el Sr sustituye al Ca principalmente en plagioclasas, pero se llega a comportar como elemento incompatible a alta presión, donde la plagioclasa no es estable (Winter, 2013). Valores altos

Sr/Y y bajos-moderado de Y son característicos de las adakitas. Estos valores sugieren que estas rocas pueden ser derivadas por fusión parcial de una fuente basáltica (Drummond y Defant, 1990).

Los diagramas combinados de elementos mayores y traza ayudan a diferenciar entre adakitas de alto sílice (HSA: SiO<sub>2</sub> >60 wt. %) y de bajo sílice (LSA: SiO<sub>2</sub> <60 wt. %) de acuerdo con Martin et al. (2005). Las muestras del DMTLM muestra afinidad hacia adakitas HSA como a LSA, sin embargo, la mayoría de ellas cae dentro del campo HSA. Los diagramas K vs Rb y Nb vs SiO<sub>2</sub> muestran un comportamiento más disperso (Fig. 4.9).

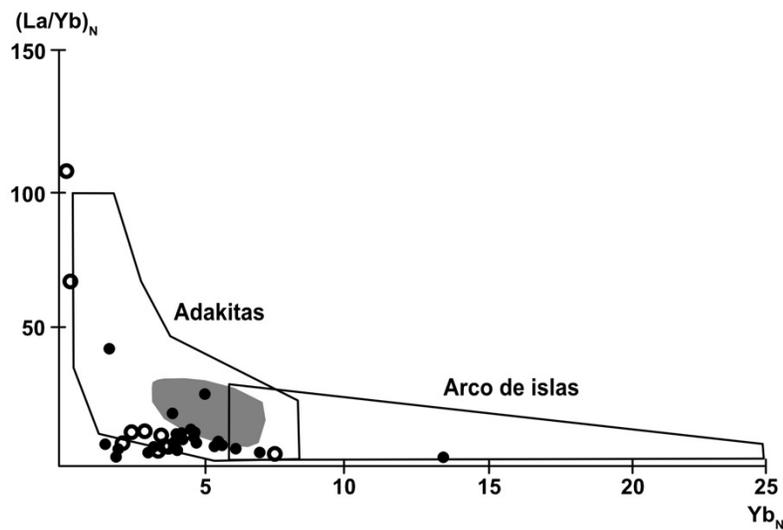


Fig. 4.7. Diagrama de discriminación adakítica  $(La/Yb)_N$  vs  $Yb_N$ . Los intrusivos del DMTLM caen dentro del campo adakítico principalmente, caracterizado por bajos valores de Yb y moderada a baja relación La/Yb. Modificado de Martin, (1986). Normalización respecto a a condrita (Sun & McDonough, 1989). Los datos del Distrito Mezcala (sombreado gris) fueron tomados de González-Partida et al. (2003). Los círculos sin relleno son análisis de intrusivos de la porción SW del DMTLM, tomados de Dorantes-Castro (2016).

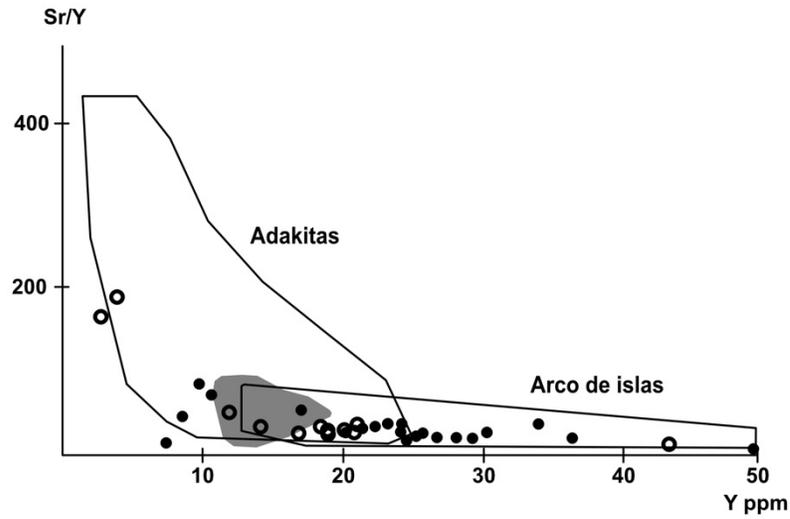


Fig. 4.8. Diagrama de discriminación adakítica Sr/Y vs Y. Los intrusivos del DMTLM caen dentro del campo adakítico principalmente. Modificado de Drummond y Defant (1990) y Martin, et al. (2005). Los datos del Distrito Mezcala (sombreado gris) son consistentes con adakitas y muestran valores bajos de Y (González-Partida et al., 2003). Los círculos sin relleno son análisis de intrusivos de la porción SW del DMTLM, tomados de Dorantes-Castro (2016).

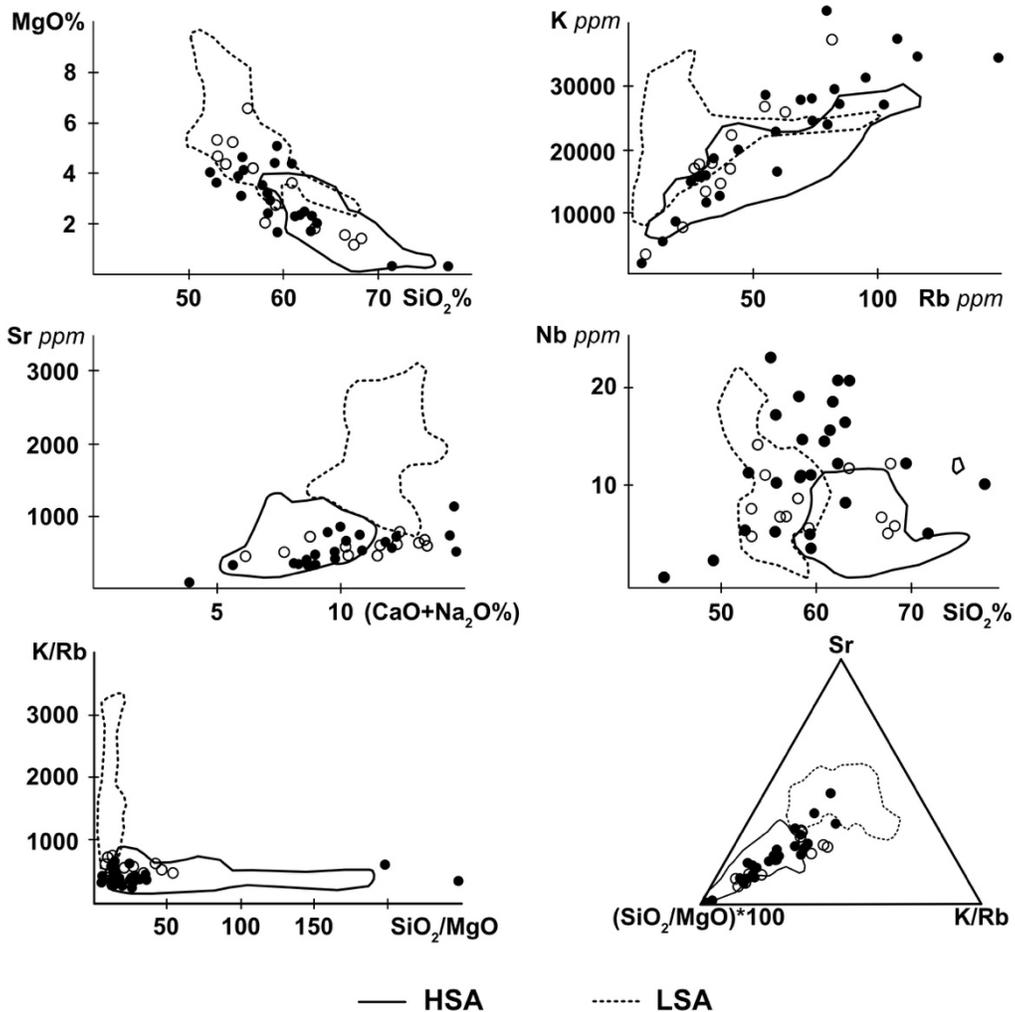
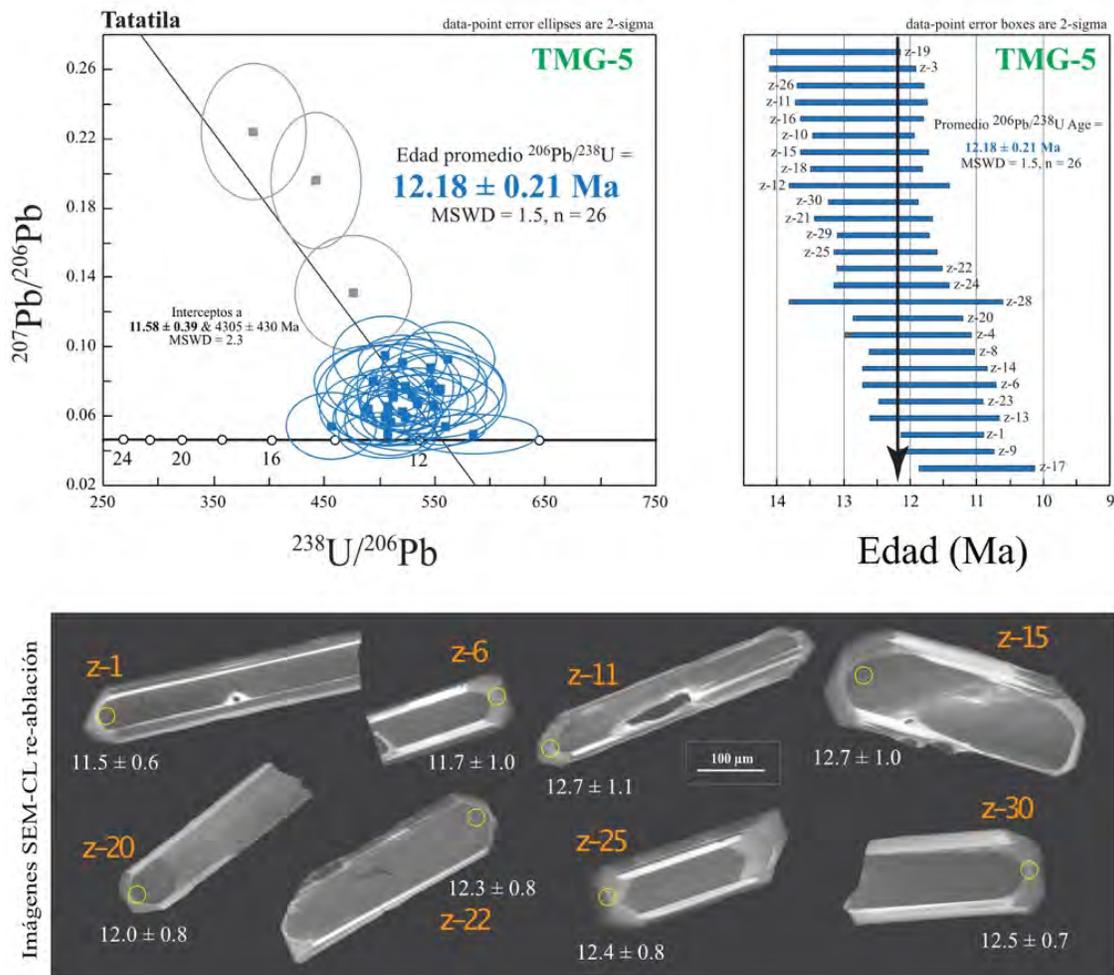


Fig. 4.9. Diagramas de discriminación adakítica HSA y LSA. Los intrusivos del DMTLM se ubican principalmente dentro del campo HSA (alto sílice) respecto al campo LSA (bajo sílice). En los diagramas K vs Rb y Nb vs SiO<sub>2</sub> las muestras presentan un comportamiento más disperso y en Mg vs SiO<sub>2</sub> caen en ambos campos. Los círculos sin relleno son análisis de intrusivos de la porción SW del DMTLM, tomados de Dorantes-Castro (2016).

#### 4.1.2.4 Edad de los intrusivos

Se realizaron 2 dataciones para conocer la edad de los intrusivos (T-5, T-24). Las edades de se estimaron con base en zircones para el área de Tatatila y el área de Santa Cruz (Fig. 2.2). Los resultados indican una edad de  $12.18 \pm 0.21$  y  $15.27 \pm 0.36$  Ma respectivamente (Fig. 4.10). Las edades de los intrusivos son consistentes con el fechamiento de 14 Ma reportado por Salinas-Rodríguez y Lemus-Bustos (2007) en Santa Cruz.



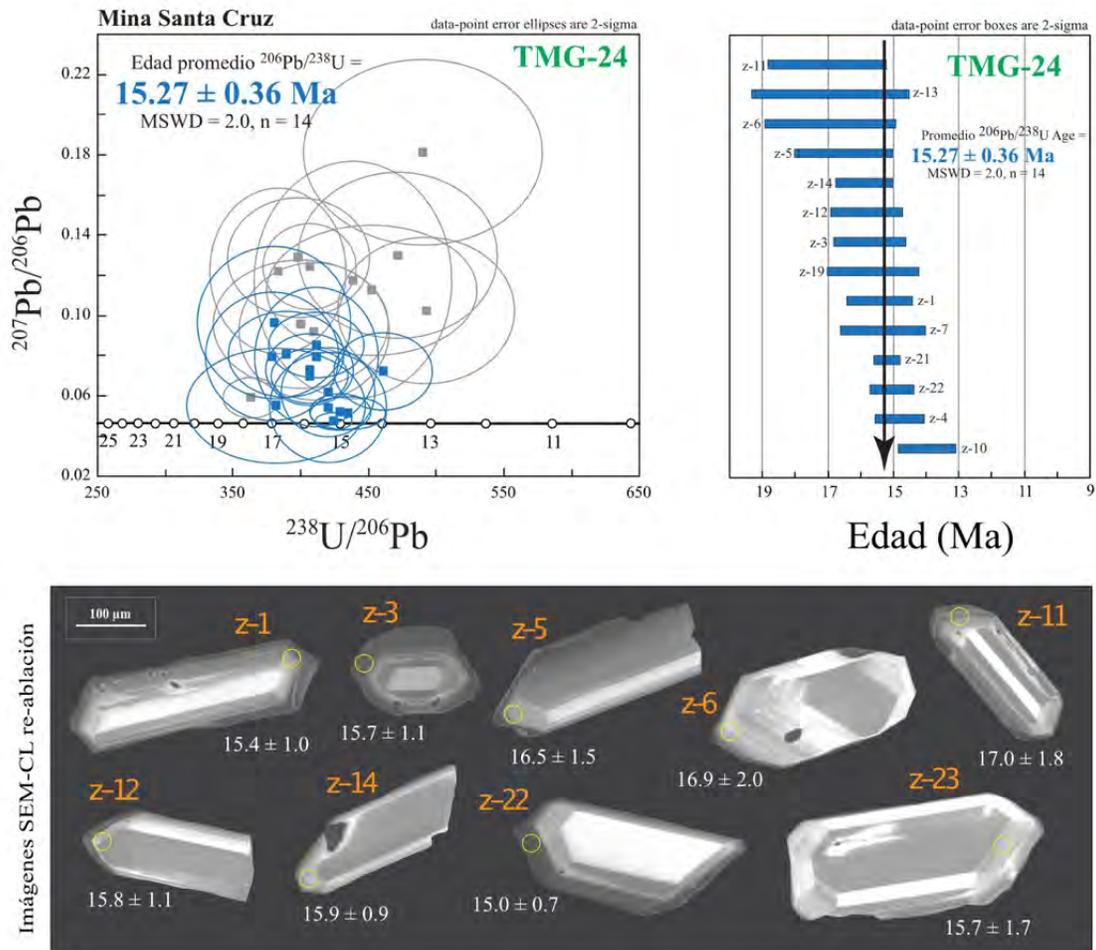


Fig. 4.10. Diagramas U-Pb de análisis de zircones. Se muestran los diagramas de concordia para cada intrusivo. Elipses de error reportadas a 2 sigma. Se observa una edad aproximada de  $12.18 \pm 0.21$  Ma en el área de Tatatila y  $15.27 \pm 0.36$  Ma en el área de Santa Cruz.

## 4.2 Skarn

### 4.2.1 Petrografía

Las muestras son procedentes de las minas Santa Cruz, Boquillas, El Dorado y 5 Señores y pertenecen tanto a la alteración proximal, distal, prógrada y retrógrada. Las principales características se resumen en la tabla 4.2 y las descripciones totales se encuentran en el anexo 4.

El endoskarn consiste en una agrupación de magnetita, granate > clinopiroxeno y cuarzo en textura granoblástica poligonal que varía a masiva con un tamaño de grano de hasta 1 cm, lo que indica una asociación proximal. La presencia de estos minerales en el endoskarn es heterogénea, se observa zonas compuestas de granate masivo que varía a magnetita masiva, ocasionalmente se

componen de 50% granate y 50% magnetita o 50% granate y 50% piroxeno principalmente. En las muestras Santa Cruz 25 B y 23 E Dorado se alcanza a distinguir el protolito, que consiste en una textura porfídica pilotaxítica-intergranular con microlitos de plagioclasa en matriz criptocristalina con reemplazamientos de cuarzo masivo y epidota selectiva, así como parches de epidota con bordes de pirita y calcopirita (Fig. 4.11).

Por otro lado, el exoskarn consiste en piroxeno, granate, magnetita y wollastonita con un tamaño de grano inferior a 1 mm, en esta porción el piroxeno tiende a ser más abundante que el granate. Las texturas varían de granoblástica a bandeada. Las muestras TMG 23 Boquillas y 11 El Dorado muestran una textura de bandeamiento evidenciando la naturaleza del protolito (caliza estratificada). Las bandas se componen de granate, magnetita y cuarzo principalmente (Fig. 4.11).

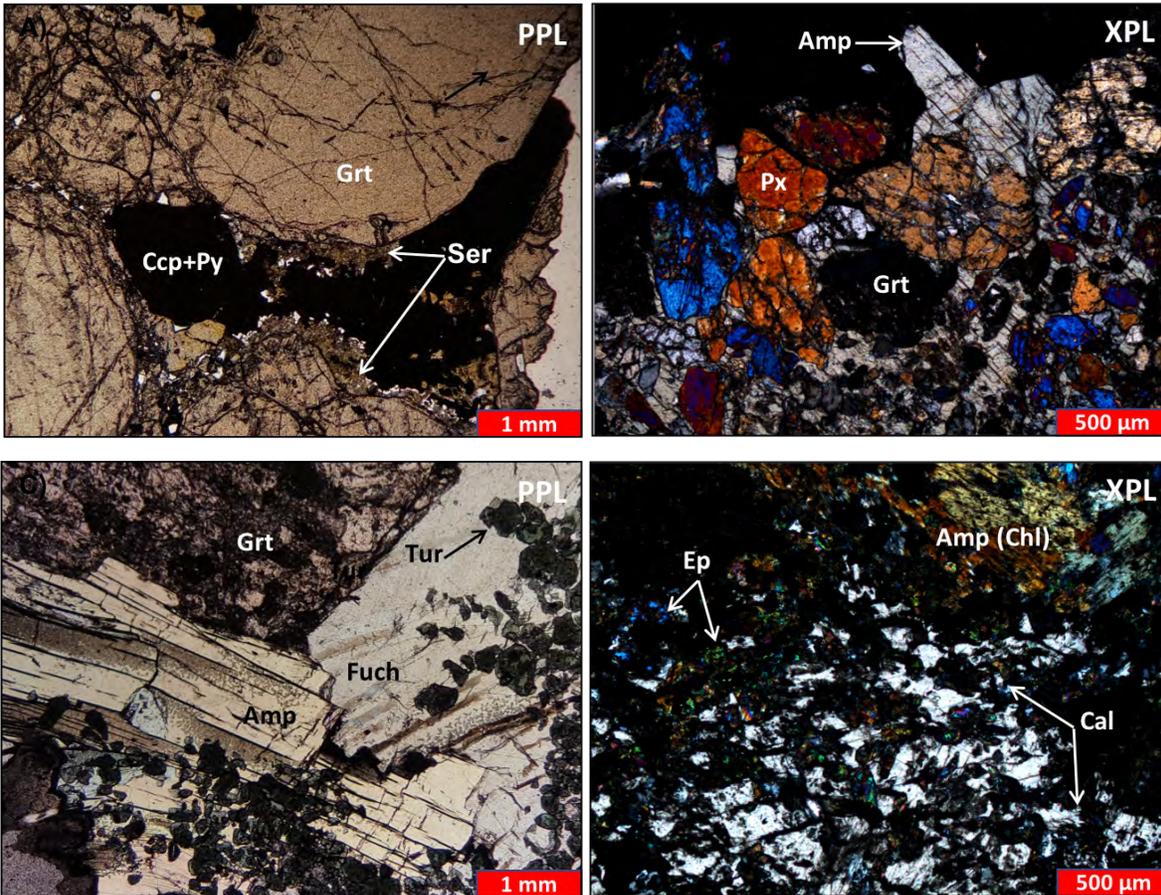
La alteración retrógrada se observa sobrepuesta tanto en el endoskarn como en el exoskarn. Consiste en anfíbol, moscovita verde (fuchsita, de acuerdo con González-Partida, sin publicar), calcita, clorita, epidota y cuarzo. El anfíbol y la fuchsita muestran un tamaño de grano de hasta 5 mm en cristales independientes variando a texturas poiquilíticas. La clorita, epidota, calcita y cuarzo se presentan de manera selectiva, en parches irregulares y vetillas de 0.5 mm. La intensidad de reemplazamiento de estos minerales varía de moderada a intensa, en ocasiones reemplazan completamente la fase progradada. Los sulfuros como la calcopirita y pirita se observaron asociados a esta alteración observándose dentro de las vetillas y en los bordes de los parches (Fig. 4.11).

En menor medida se observaron reemplazamientos de micas blancas (¿flogopita-moscovita?) en bordes de piroxeno, turmalina en cristales basales automorfos dentro de fuchsita y anfíbol, serpentina reemplazando parcialmente anfíboles y piroxenos (abundante en la mina Santa Cruz), wollastonita en los espacios vacíos de la alteración retrograda y sericita rellenando fracturas y espacios entre cristales. La hematita está presente en casi todas las muestras asociada a la magnetita (Fig. 4.11).

Muestra	Textura	Mina	Minerales esenciales	Minerales secundarios	Alteración	Clasificación
Santa Cruz 24 F	Granoblástica	Santa Cruz	Grt	Amp+Fuch+Tur+Serp+Cal+Py	Retrógrada>prograda	Skarn de anfíbol-granate
Santa Cruz 24 E	Granoblástica	Santa Cruz	Px	Amp+Qz+Cal+Wo+E+p+MB+Ser	Retrógrada>prograda	Skarn de anfíbol y piroxeno
Santa Cruz A	Granoblástica	Santa Cruz	Px+Grt	Amp+Cal+Chl+Ser+MB	Retrograda>prograda	Skarn de piroxeno
Santa Cruz	Granoblástica	Santa Cruz	Px	Chl+Fuch+Ep+Amp+Cal	Retrograda>prograda	Skarn de piroxeno
Santa Cruz 25B	Intergranular	Santa Cruz	Pl	Amp+Ep+Ccp+Py	Retrógrada>retrógrada	Endoskarn

Mármol 4	Granoblástica	5 Señores	Cal		Isoquímica	Mármol
Granates 1	Granoblástica	5 Señores	Grt	Ccp+Py+Ser	Prograda	Skarn de granate
TMG 23 Boquillas	Granoblástica	Boquillas	Grt+Mag	Qz+Ep+Py+Ccp	Prógrada>retrógrada	Exoskam de Grt
23 F Dorado	Granoblástica	El Dorado	Grt+Mag	Ep+Cal+Chl+Ser+Py+Ccp+Serp?	Retrógrada>prograda	Skarn de granate
11 El Dorado	Granoblástica	El Dorado	Grt+Mag	Ep+Cal+Qz+Chl+Py	Retrógrada>prograda	Exoskam de granate
23 E Dorado	Masiva	El Dorado	Qz+líticos	Ep+Qz	Retrógrada	Endoskam

Tabla 4.2. Resumen de las características petrográficas de la zona de skarn y mármol. Amp (anfíbol), Cal (calcita), Chl (clorita), Ccp (calcopirita), Ep (epidota), Fuch (fuchcita), Grt (granate), Mag (magnetita), MB (mica blanca), Px (piroxeno), Py (pirita), Qz (cuarzo), Ser (sericita), Serp (serpentina), Tur (turmalina).



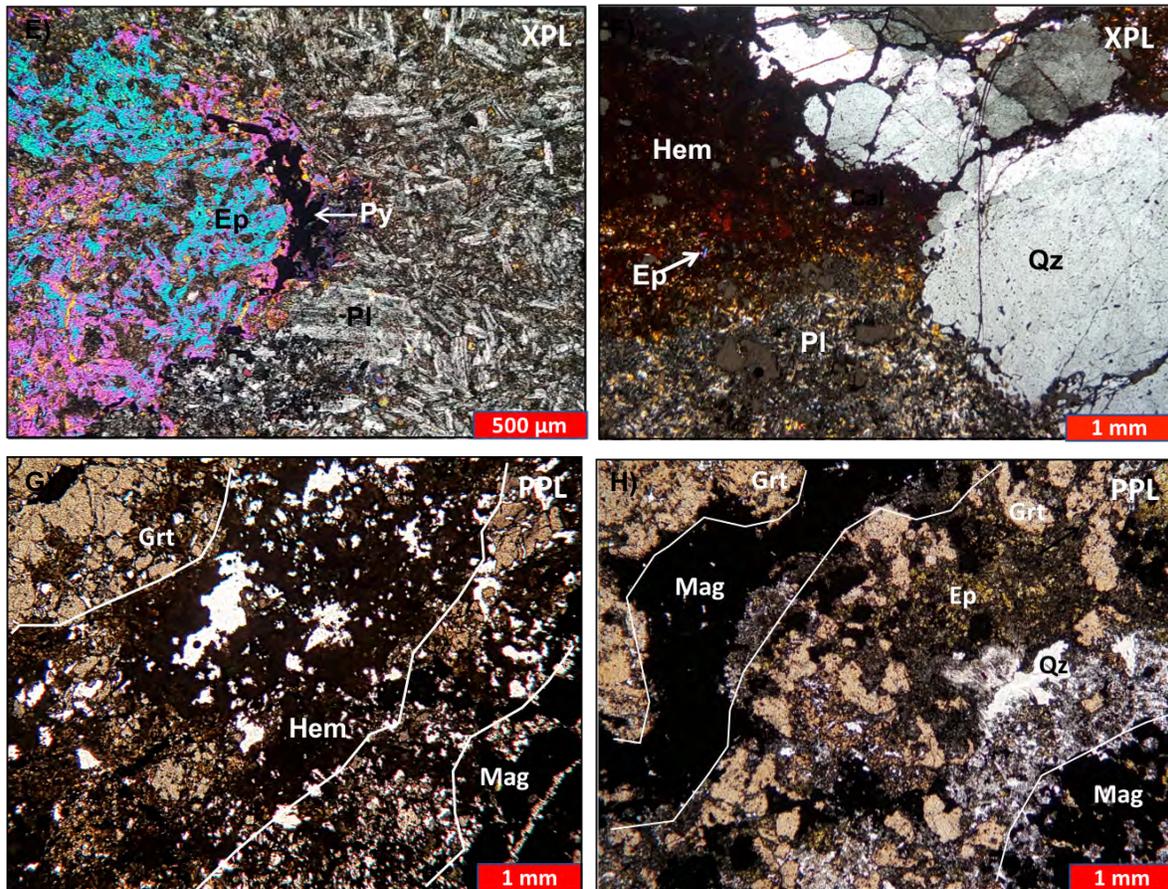


Fig. 4.11. Petrografía del skarn. A) Granates 1. Cristales poligonales de granate de más de 1 mm con relleno de Ccp+Py entre granos y sericita en sus bordes. B) Santa Cruz A. Cristales de piroxeno y granate incluidos en anfíbol en textura poiquilítica. C) Santa Cruz 24F. Cristales de granate reemplazados por anfíbol y fuchcita. Se sobre imponen cristales basales atomorfos de turmalina. D) Santa Cruz. Reemplazamiento completo de epidota y calcita. Algunos cristales de anfíbol muestran reemplazamiento parcial de clorita. E) Santa Cruz 25B. Endosarkn de diorita con cristales tabulares de plagioclasa de textura intergranular con reemplazamiento en epidota en parches con bordes de pirita. F) 25 E Dorado. Endosarkn de diorita con cristales tabulares de plagioclasa en textura intergranular. Muestra reemplazamiento masivo de cuarzo y parches de magnetita parcialmente reemplazados por hematita. Se aprecian microcristales de epidota reemplazando la matriz. G) TMG 23 Boquillas. Exosarkn de granate con magnetita y hematita con textura de bandeamiento. H) 11 El Dorado. Exosarkn de granate y magnetita con textura de bandeamiento y reemplazamiento en parches de epidota y cuarzo.

#### 4.2.2 Minerografía

Las muestras son procedentes de las minas Santa Cruz, Boquillas, El Dorado y 5 Señores. De manera general la mena consiste en abundante magnetita asociada a la porción prógrada y abundantes sulfuros en la porción retrógrada. La hematita y carbonatos de Cu se observan en las porciones superficiales del skarn. Algunos cristales con características de Au se han observado en pirrotita y

calcita. Las principales características se resumen en la tabla 4.3 y las descripciones se encuentran en el anexo 5.

#### 4.2.2.1 Zona de magnetita

La magnetita se observa de manera masiva, en bandas y en menor grado vetillas, asociada principalmente a granates. Bajo el microscopio muestra un color gris castaño sin anisotropía con alto magnetismo con cristales masivos con tamaño variable. En ocasiones se observa remplazando al granate y en otras son contemporáneos (Fig. 4.12).

La magnetita muestra reemplazamientos puntuales de esfalerita, calcopirita y pirita, también es cortada por vetillas y parches de cuarzo, ocasionalmente estas vetillas muestran bordes de calcopirita. Hacia los bordes de la magnetita se observa hematita (martitización) como reemplazamiento. En las muestras de superficie se sobreimpone alteración supergénica representada por malaquita en pequeños parches en las zonas expuestas a la intemperie.

Dada su relación con el granate, se considera que la magnetita forma parte de la alteración progradada. Es abundante en las minas Santa Cruz y Boquillas.

#### 4.2.2.2 Zona de sulfuros

Los sulfuros se observan masivos mantiformes, en vetillas, parches y en menor medida a reemplazamientos selectivos, sin embargo, en su mayoría se encuentran relleno entre cristales de granate y magnetita. De mayor a menor cantidad se reconocieron cristales de calcopirita, pirita, esfalerita, bornita, calcocita, covelita, digenita y malaquita, estos 4 últimos son escasos y dadas sus características texturales son resultado de reemplazamiento supergénico. También se ha reportado galena y arsenopirita, pero estos minerales no se observaron en las secciones pulidas (Fig. 4.12).

La calcopirita se caracteriza por su moderada reflectancia y su color. Se presenta masiva, como relleno y en menor medida en cristales aislados o en los bordes de vetillas de cuarzo o calcita. Se observa reemplazando cristales epidota, clorita y calcita, pero en su mayoría estos minerales reemplazan a la calcopirita. Destaca una textura en exolución lamelar con bornita (flamas de calcopirita) y una textura de exolución con esfalerita (enfermedad de la calcopirita), esta última indicativa de temperaturas mayores de 300 °C (Ramdohr, 1980).

La pirita destaca por su alta reflectancia y color. Se observa masiva, en cristales aislados y asociados a vetillas de cuarzo o calcita. Es un mineral obicuo y se ha observado contemporáneo con minerales de la porción retrógrada y ocasionalmente reemplazado por esta alteración. Se ha identificado una variedad de pirita denominada “melnikovita”, la cual se observa reemplazando a mineralización previa con textura radial-botroidal, característica de bajas temperaturas.

La pirrotita destaca por su color gris-rosado, anisotropía y magnetismo. Se observa masiva en contacto con la magnetita y reemplazada por la mayoría de los sulfuros, probablemente asociada a la porción prógrada.

La esfalerita es escasa y se caracteriza por su reflectancia media y su color gris claro. Presenta textura en cristales aislados y como relleno entre cristales, asociada a la porción retrógrada. Presenta textura de exolución con la calcopirita.

La bornita muestra una reflectancia media y un color rosa claro. Se presenta como cristales xenomorfos y relleno y se observa contemporánea con minerales de la porción retrógrada. Muestra textura en flama donde es reemplazada por calcopirita hacia el centro del cristal y hacia los bordes se observa reemplazamiento de covelina. Se observa principalmente en la zona de Santa Cruz.

La calcocita, covelita y digenita muestran sus colores típicos gris claro de media reflectancia, azul índigo de baja reflectancia y gris azulado de media reflectancia respectivamente. Son visibles únicamente bajo el microscopio y su presencia (< 1%) se limita a los bordes de calcopirita, bornita y escasamente reemplazan completamente los cristales pequeños, mostrando formas irregulares principalmente, lo que sugiere son de origen secundario (a partir de un enriquecimiento supergénico).

#### 4.2.2.3 Otros minerales

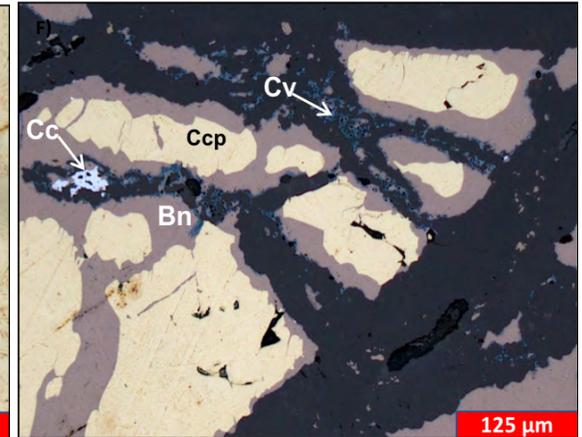
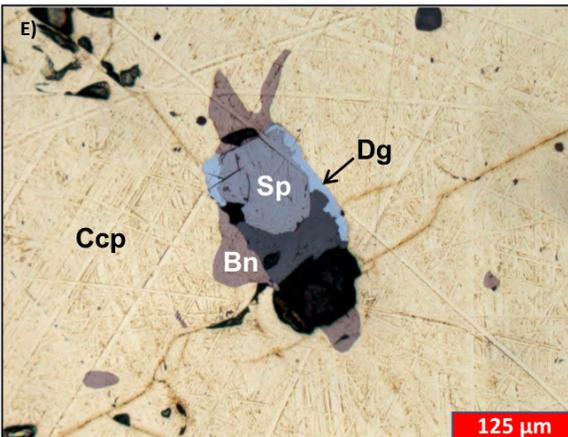
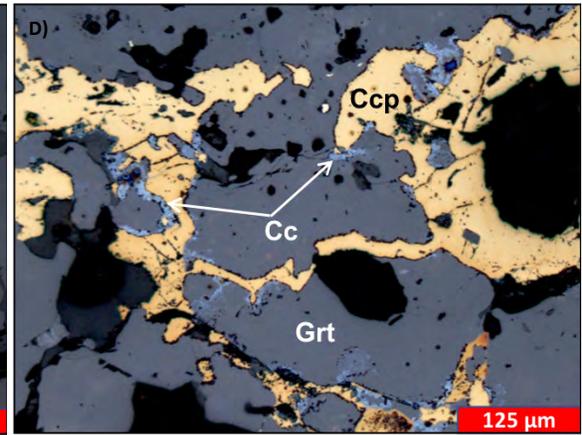
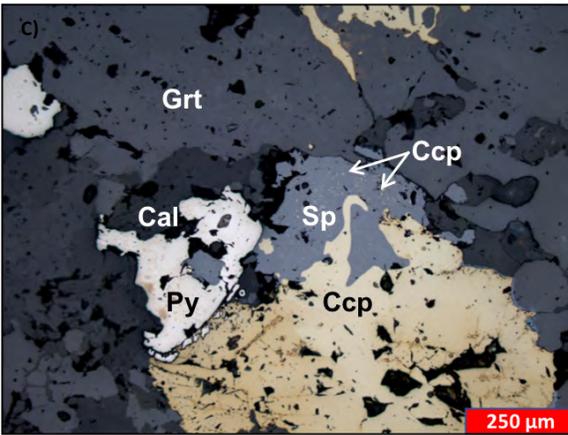
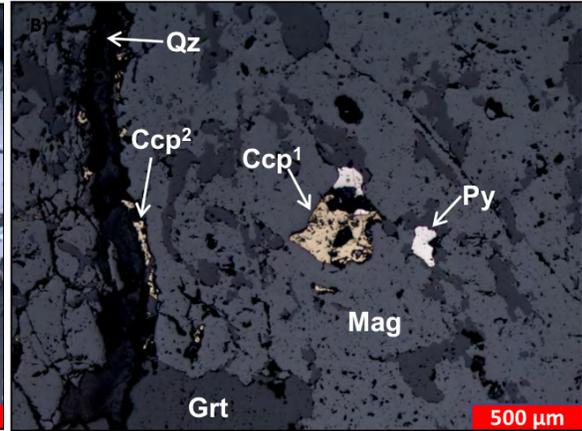
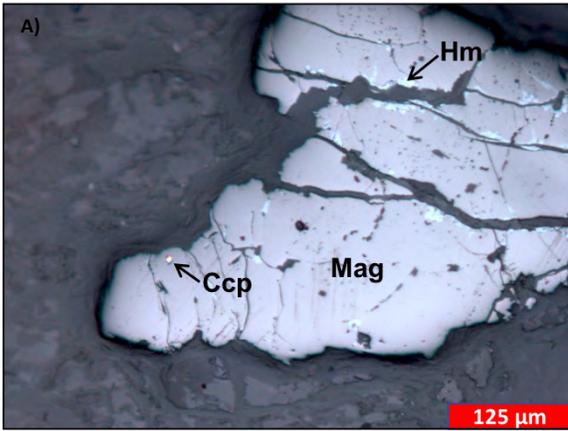
La malaquita se observa de color verde con baja reflectancia. Se encuentra a manera de parches irregulares reemplazando minerales previos y se ha observado principalmente en zonas de sulfuros expuestas en superficie, lo que sugiere que es producto de un enriquecimiento supergénico de los sulfuros de Cu.

La hematita se observa de color rojo-naranja cuando es masivo y gris-claro cuando es escaso. Se observa dentro de cristales de calcita y cuarzo principalmente. También se ha identificado reemplazando los bordes de magnetita evidenciando su etapa tardía de formación.

Se han observado cristales xenomorfos menores a 20 micras de un color amarillo intenso y una reflectancia mayor a la pirita. Estos se encuentran incluidos dentro de cristales como la pirrotita y la calcita. De acuerdo con las características indica que se trata de Au nativo, sin embargo, dada su errática presencia y su tamaño no es posible observar más características para confirmarlo.

Muestra	Textura	Mina	Minerales metálicos	Minerales translúcidos	Supergénicos	Paragénesis
TMG 24 D.1	Porfiroblástica	Santa Cruz	Mag+Sp+Ccp+Hm	Amp+Chl+Cal		Mag → Amp → Sp/Ccp/Chl → Cal → Hm
24 E Sta Cruz	Granoblástica	Santa Cruz	Ccp+Bn+Sp	Amp+Fuch+Chl+Ep+Cal+Qz	Cc+Cv+Dg	Amp → Bn/ (Fuch-Chl-Ep-Cal?) → Ccp → Sp → Cal(Qz) → Cc/Cv/Dg
24 Sta Cruz C	Granoblástica	Santa Cruz	Mag+Ccp+Hm+Au?	Amp+Fuch+Qz+Cal	Mc	Amp/Fuch → Mag → Qz/Cal/Au? → Ccp → Cc → Hm/ Mc
1 5 Señores py cal	Masiva/ Granoblástica	5 Señores	Po+Ccp+Sp+Mel+Au?	Cal+Qz		Po → Sp/Ccp/Cal/Qz/(Au) → Ccp → Py/Mel → Cal
Gr 5 Señores (2)	Granoblástica	5 Señores	Ccp+Sp+Py	Grt+Cal+Ep+Qz	Cc	Grt → Sp → Ccp/Cal → Py/Ep/Qz → Cc
1303	Masiva	Boquillas	Mag+Py+Ccp	Qz		Mag → Qz → Py/Ccp
TMG 23 Boquillas	Granoblástica	Boquillas	Mag+Ccp+Py	Grt+Qz+Cal		Grt → Mag → Ccp (1)/Py(1)/Qz/Cal (1) → Ccp (2) + Py (2) + Qz (2)
25 E Boquillas	Granoblástica	Boquillas	Mag+Py+Ccp+Sp+Hm	Amp/Wo?+Qz+Cal		Mag → Amp/Wo? → Ccp → Mt (2) → Ccp (2)/Sp → Py → Hm → Qz/Cal
23 F Dorado	Granoblástica/ masiva	El Dorado	Mag+Ccp+Py+Sp+Hm	Grt+Qz+Cal		Gr → Ccp → Qz → Mag → Sp (1) → Py → Sp (2) → Qz/Cal → Hm

Tabla 4.3 Resumen de las características minerográficas del skarn. Amp (anfíbol), Bn (bornita), Cal (calcita), Cc (calcosita), Ccp (calcopirita), Chl (clorita), Cv (covelita), Ep (epidota), Fuch (fuchsita), Grt (granate), Mag (magnetita), Mel (melnikovita), Mc (malaquita), Py (pirita), Sp (esfalerita), Qz (cuarzo), Wo (wollastonita).



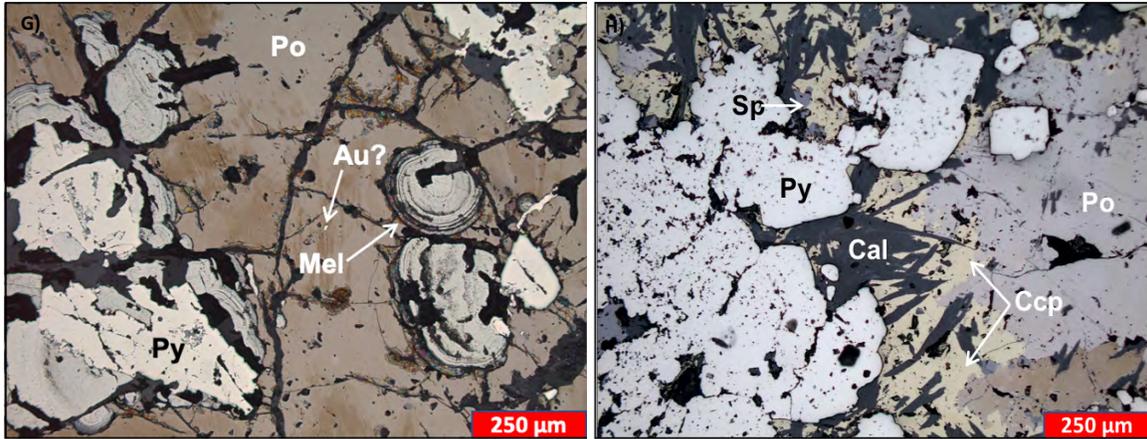


Fig. 4.12. Minerografía del skarn. A) Muestra TMG 24 D.1. Magnetita con martitización en sus bordes. Reemplazamiento parcial de calcita y sulfuros. B) Muestra TMG 23 Boquillas. Granate reemplazando por magnetita y a su vez estos por pirita y calcopirita. Al final la secuencia es cortada por vetillaje de cuarzo con bordes de calcopirita. Se observa precipitación de calcopirita en 2 eventos. C) y D) Muestra Gr 5 señores. Se observan masas de granate con relleno en sus bordes de pirita y esfalerita. C) muestra una textura seriada (centro de la imagen) por proceso de desmezcla de calcopirita a esfalerita (indicativo de temperaturas mayores a 300 °C. D) Los bordes de la calcopirita se alteran a calcocita (supérgena). E) y F) Muestra 24 E Sta Cruz. Calcita/cuarzo con parches de bornita y esta reemplazada por calcopirita. Le sigue reemplazamiento de esfalerita y al final los bordes muestran calcocita, covelita y digenita. La bornita y calcopirita muestran textura en flamas. G) y H) Muestra 1 5 Señores Py Cal. Masas de pirrotita ocasionalmente oxidadas que muestran reemplazamiento de esfalerita, calcopirita y calcita (hojosa). Al final se sobrepone pirita y su variedad melnikovita (pirita botroidal), indicando fluidos de baja temperatura. Se observa un cristal con un brillo superior al de la pirita (sin poder observar más propiedades por su diminuto tamaño) lo que puede indicar un cristal de Au en la pirrotita.

#### 4.2.3. Secuencia paragenética

De acuerdo a los resultados petrográficos, minerográficos y las bibliografía disponible se propone una secuencia paragenética para el yacimiento tipo skarn de la porción SW del DMTLM, incluye minerales de mena y ganga (Fig. 4.13).

En la porción prógrada domina el granate, piroxeno, magnetita, cuarzo, wollastonita. La wollastonita se observa principalmente en la etapa prógrada, sin embargo, se llega a observar en la etapa retrógrada. El cuarzo se observa prácticamente en ambas etapas. La pirrotita se observa en transición entre la etapa prógrada y retrógrada, ya que se observa reemplazando a la magnetita y a su vez es reemplazada por los sulfuros.

En la porción retrógrada destaca el anfíbol y fuchsita formadas en una etapa temprana de la alteración retrógrada. Cristales automorfos de turmalina reemplazan principalmente a estos minerales. Enseguida hay reemplazamiento de calcita, epidota, clorita, cuarzo y micas blancas, acompañadas de

sulfuros primarios como la calcopirita, pirita, bornita, esfalerita, arsenopirita y galena. En la porción final se observan los carbonatos de Cu y sulfuros supergénicos, así como el reemplazamiento de magnetita por hematita y reemplazamiento de bornita y calcopirita por calcocita, covelita y digenita.

La presencia de Au se estima en 3 momentos considerando: Au alto en zona de magnetita, Au alto en zona de sulfuros, Au reportado en zona de vetas probablemente asociado al sistema magmático-hidrotermal del skarn (equivalente a porción retrógrada tardía). La presencia de la Ag es estimada ya que no se observó y solo se ha documentado en los análisis geoquímicos.

La paragénesis propuesta para el DMTLM tiene correlación con secuencias paragenéticas reportadas tanto en skarn de Au-Cu (p. ej. Pinto-Linares, 2008) como en skarn de Au-Fe (p. ej. González-Partida et al., 2005).

Mineralogía	Etapa		
	Prógrado	Retrógrado	Enriquecimiento supergénico/ oxidación
Granate	=====		-
Piroxeno	=====		
Magnetita	=====		
Cuarzo		=====	
Wollastonita		=====	
Anfíbol		=====	
Fuchcita		=====	
Pirrotita		=====	
Bornita		=====	
Calcopirita		=====	
Esfalerita		=====	
Arsenopirita		=====	
Pirita		=====	
Calcita		=====	
Au		=====	
Ag		=====	
Galena		=====	
Melnikovita		=====	
Turmalina		=====	
Epidota		=====	
Clorita		=====	
Mica blanca		=====	
Sericita		=====	
Digenita			=====
Calcocita			=====
Covelita			=====
Hematita			=====
Malaquita			=====
Azurita			=====

Fig. 4.13. Secuencia paragenética del skarn. Porción SW del DMTLM.

#### 4.2.4. Edad de la mineralización

La edad de mineralización se calculó a partir de cristales de fuchcita de la porción retrógrada en el área de Santa Cruz mediante el método Ar-Ar, de la cual se obtuvo una edad de  $12.49 \pm 0.09$  Ma (edad de meseta) (Fig. 4.14).

Los fechamientos de la mineralización e intrusiones muestran buena relación con el tren de edades de reportado para el magmatismo del Mioceno, asociado a al inicio del CVM en su porción este (Ferrari et al., 2012; Gómez-Tuena et al., 2003; 2005).

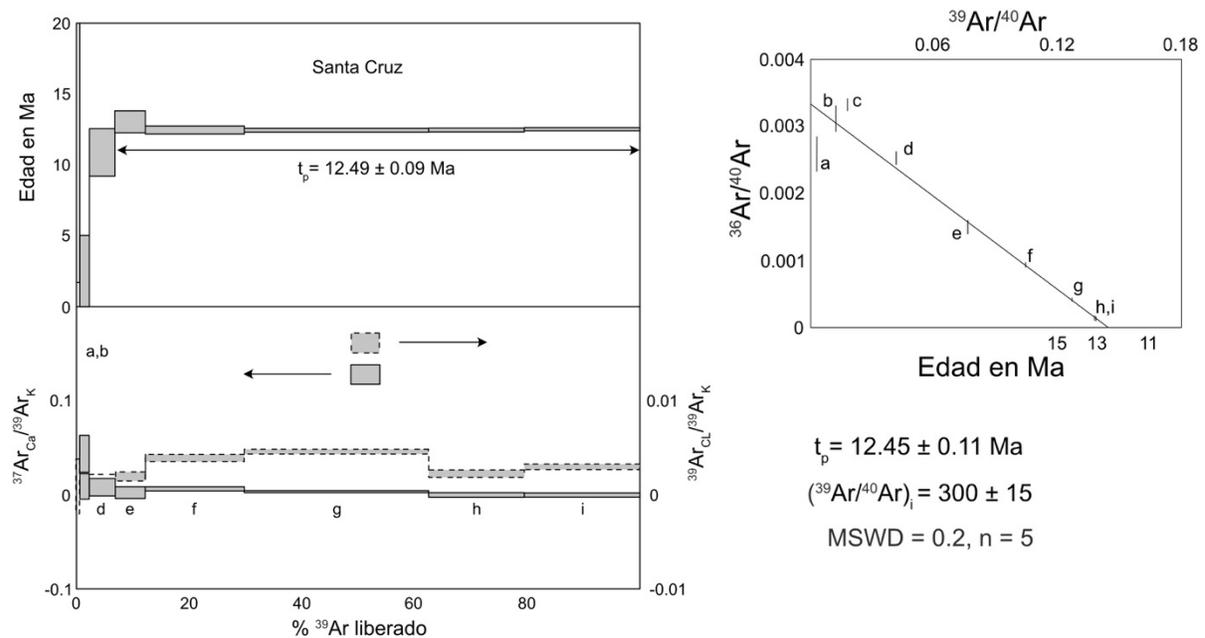


Fig. 4.14. Diagramas Ar-Ar de análisis de fuchcita. La edad de meseta ( $t_p$ ) indica 12.49 Ma y la edad de isocrona ( $t_c$ ) indica 12.45 Ma.

### 4.3 Isótopos estables

#### 4.3.1 Isótopos de C y O

Los valores isotópicos de carbono y oxígeno fueron obtenidos de calcitas y calizas recolectadas en las zonas distales y proximales del skarn, en las inmediaciones de Las Minas, Santa Cruz y 5 Señores (Tabla 4.4).

El  $\delta^{13}\text{C}$  de las 14 muestras de caliza fresca (sin recristalización o alteración) varía de +0.9 a +3.7‰, mientras que el  $\delta^{18}\text{O}$  varía de +23.2 a +27.1‰. Estos valores isotópicos son consistentes con los valores de caliza de edad Albiano-Cenomaniano propuesto por Zürcher et al. (2001), sin embargo, las calizas del DMTLM muestran un ligero empobrecimiento en  $\delta^{13}\text{C}$  y un ligero enriquecimiento en  $\delta^{18}\text{O}$  (Fig. 4.15).

Hacia la porción distal (calcita recristalizada y mármol) se recolectaron 19 muestras de calcita (cristales, vetillas) con valores  $\delta^{13}\text{C}$  de -4.4 a +4‰ y  $\delta^{18}\text{O}$  de +12.7 a +25.4‰, en su mayoría valores empobrecidos tanto en  $\delta^{13}\text{C}$  como en  $\delta^{18}\text{O}$  respecto a los valores de caliza fresca. Algunos de estos valores caen dentro del campo de caliza fresca (Fig. 4.15).

En la porción proximal (calcita de skarn) se obtuvieron 4 muestras de calcita (cristales, vetillas) las cuales muestran valores isotópicos  $\delta^{13}\text{C}$  de -3.5 a -8.5‰ y  $\delta^{18}\text{O}$  de +7.8 a +15.2‰. Dichos valores están empobrecidos respecto a los valores de caliza fresca, caliza recristalizada y mármol. Estos valores están asociados al campo de valores isotópicos de agua magmática propuesto por Zheng y Hoefs (1993), que indican valores de  $\delta^{13}\text{C}$  de -9 a -4‰ y  $\delta^{18}\text{O}$  +6 a +15‰ (Fig. 4.15).

Los resultados se graficaron en un modelo de caja de interacción agua-roca  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  vs  $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$  (Figura 4.15) donde se puede observar una evolución de calcita de una fuente magmática a calizas frescas y una correlación positiva que sugiere un proceso de interacción W/R (Fig. 4.15).

ID	Clave	Muestra	Localidad	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ VPDB	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ VSMOW
1	Cza-1	Caliza	Las Minas	+1.3	+23.2
2	Cza-2	Caliza	Las Minas	+2.3	+24.0
3	Cza-3	Caliza	Las Minas	+2.4	+26.3
4	Cza-4	Caliza	Las Minas	+1.0	+23.5
5	Cza-5	Caliza	Las Minas	+3.7	+26.0
6	Cza-6	Caliza	Las Minas	+1.0	+23.5
7	Cza-7	Caliza	Las Minas	+2.1	+25.5

8	Cza-8	Caliza	Las Minas	+3.6	+26.1
9	Cza-9	Caliza	Las Minas	+2.3	+27.1
10	Cza-10	Caliza	Las Minas	+0.9	+25.7
11	Cza-11	Caliza	Las Minas	+3.6	+22.4
12	Cza-12	Caliza	Las Minas	+1.6	+23.5
13	Cza-13	Caliza	Las Minas	+3.6	+24.8
14	Cza-14	Caliza	Las Minas	+1.1	+24.5
15	caliza distal 1	Calcita (distal)	5 señores	+2.3	+12.9
16	caliza distal 2	Calcita (distal)	5 señores	+2.4	+12.7
17	marmol-Gte	Calcita (distal)	5 señores	+2.0	+22.7
18	23 H	Calcita (distal)	5 señores	+4.0	+25.3
19	24 D	Calcita (distal)	Santa Cruz	+1.5	+23.0
20	TMG-33	Calcita (distal)	Las Minas	-3.0	+18.4
21	M-1	Calcita (distal)	Las Minas	-3.1	+13.8
22	M-2	Calcita (distal)	Las Minas	-1.4	+16.4
23	M-3	Calcita (distal)	Las Minas	-3.4	+16.0
24	M-4	Calcita (distal)	Las Minas	-2.9	+15.0
25	M-5	Calcita (distal)	Las Minas	-2.8	+15.4
26	M-6	Calcita (distal)	Las Minas	-1.8	+16.7
27	M-7	Calcita (distal)	Las Minas	-2.9	+15.9
28	M-8	Calcita (distal)	Las Minas	-4.1	+15.2
29	M-9	Calcita (distal)	Las Minas	-3.2	+15.2
30	M-10	Calcita (distal)	Las Minas	+1.3	+24.9
31	M-11	Calcita (distal)	Las Minas	+1.6	+25.4
32	M-12	Calcita (distal)	Las Minas	+3.6	+23.8
33	M-13	Calcita (distal)	Las Minas	-4.4	+18.9
34	M-14	Calcita (distal)	Las Minas	-1.6	+20.0
35	24 B	Calcita (proximal)	Santa Cruz	-3.5	+9.9
36	25 B	Calcita (proximal)	Santa Cruz	-8.5	+9.6
37	TMG-37	Calcita (proximal)	Las Minas	-4.5	+7.8

Tabla 4.4. Resultados de los isótopos estables de C y O. Se midieron 14 muestras de caliza y 23 muestras de calcita.

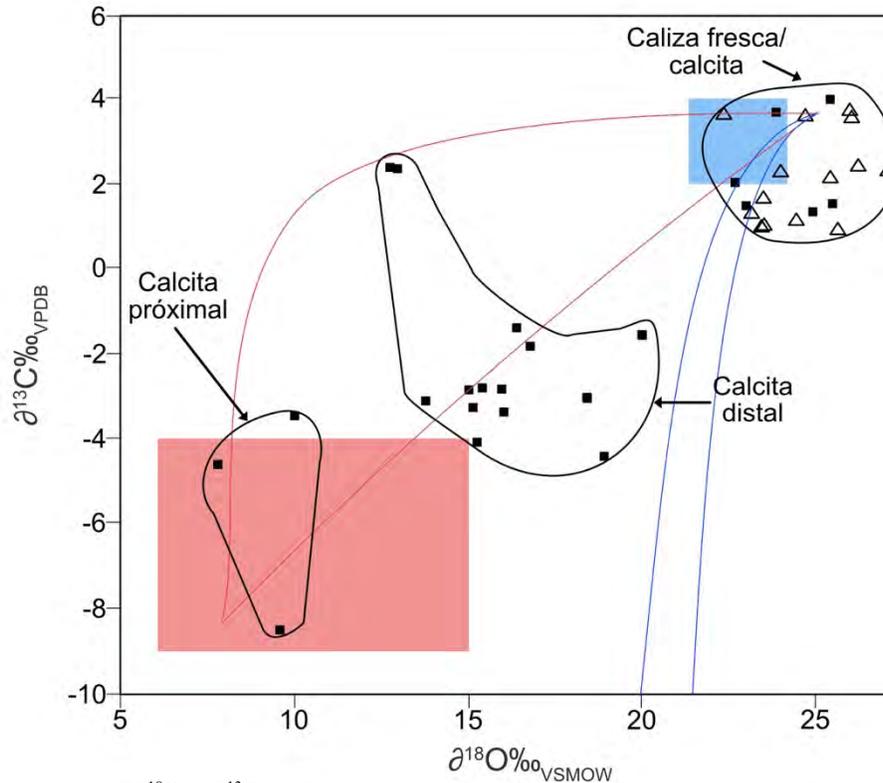


Fig. 4.15. Diagrama de caja  $\delta^{18}\text{O}$  vs  $\delta^{13}\text{C}$ . Las líneas rojas representan las curvas de evolución isotópica por interacción agua-roca. Las líneas azules representan las curvas la evolución isotópica por descarbonización. El recuadro rojo representa los valores isotópicos de agua magmática (Zheng y Hoefs, 1993). El recuadro azul representa los valores isotópicos estimados para caliza fresca del Albiano-Cenomaniano (Zürcher et al., 2001). El diagrama está calculado a una  $T = 450\text{ }^\circ\text{C}$  y valores iniciales de mármol ( $\delta^{13}\text{C} = +3.5$ ;  $\delta^{18}\text{O} = +25$ ) y agua magmática ( $\delta^{13}\text{C} = -8$ ;  $\delta^{18}\text{O} = +6$ ). Diagrama modificado de Bowman (1998).

### 4.3.2 Isótopos de S

Los datos  $\delta^{34}\text{S}$  fueron obtenidos de muestras de pirita, galena y calcopirita recolectadas de la zona de sulfuros dentro del skarn asociados a la fase retrograda. Los resultados muestran valores isotópicos con un rango de variación que oscila entre -3 a +4.2‰. La galena varía de -3 a +4.2, la pirita muestra valores de -1.9 a +1.6 y la calcopirita un valor de -1.7. La pirita concentra valores más estrechos, mientras que la galena contiene los valores más extremos (Fig. 4.16). Los resultados se presentan en la tabla 4.5.

ID	Clave	Muestra	Localidad	$\delta^{34}\text{S}$ VCDT
1	Boquillas 23A	Py	Boquillas	0.4
2	Boquillas 23B	Py	Boquillas	-0.4
3	Boquillas 23C	Py	Boquillas	1.6
4	Boquillas 23C	Gn	Boquillas	4.2

5	Boquillas 23D	Py	Boquillas	-0.5
6	Boquillas 23E	Py	Boquillas	0.3
7	Boquillas 23I	Py	Boquillas	-0.4
8	TMG-1	Py	Las Minas	0.4
9	TMG-12	Py	Las Minas	-0.3
10	TMG-24D	Py	Las Minas	-0.5
11	TMG-25A	Py	Las Minas	0.4
12	Santa Cruz 24	Py	Santa Cruz	-1.7
13	Santa Cruz 24C	Py	Santa Cruz	0.7
14	Santa Cruz 24E	Py	Santa Cruz	1.3
15	Mina El Dorado 23F	Py	El Dorado	-0.4
16	5 Señores 1	Py	5 Señores	-1.9
17	5 Señores 1	Gn	5 Señores	-1.8
18	5 Señores 2	Ccp	5 Señores	-1.7
19	5 Señores 2	Gn	5 Señores	0.8
20	5 Señores 3	Gn	5 Señores	-1.4
21	5 Señores 4	Py	5 Señores	-0.6
22	5 Señores 4	Gn	5 Señores	-3.0
23	5 Señores 5	Py	5 Señores	-0.6
24	5 Señores 6	Py	5 Señores	0.4
25	5 Señores 6	Gn	5 Señores	-0.9
26	5 Señores 7	Py	5 Señores	-1.4
27	5 Señores 8	Gn	5 Señores	0.9

Tabla 4.5. Resultados de los isótopos estables de S. Se recolectaron 27 muestras de sulfuros.

El comportamiento de los isótopos S del DMTLM sugiere que el S fue derivado de intrusiones locales y consecuentemente de una fuente magmática (Hendenquist y Lowenstern, 1994; Ohmoto y Rye, 1979) con un rango de variación entre valores negativos a positivos (Fig. 4.16). Los resultados tienen correlación con valores  $\delta^{34}\text{S}$  observados en yacimientos tipo pórfido y de reemplazamiento (Zúñiga-Hernández, 2010) (Fig. 4.17).

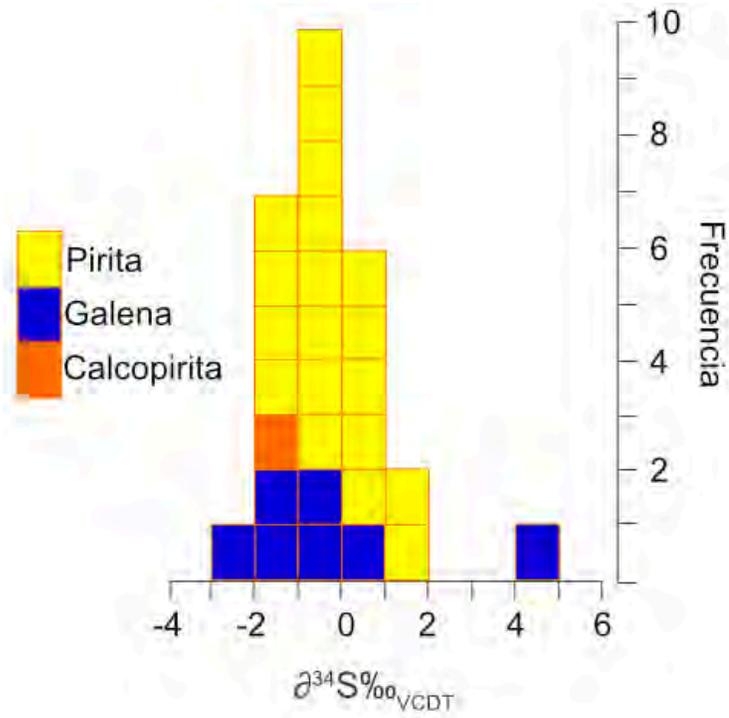


Fig. 4.16. Diagrama  $\delta^{34}\text{S}$  vs frecuencia. La pirita muestra un rango más restringido que la galena.

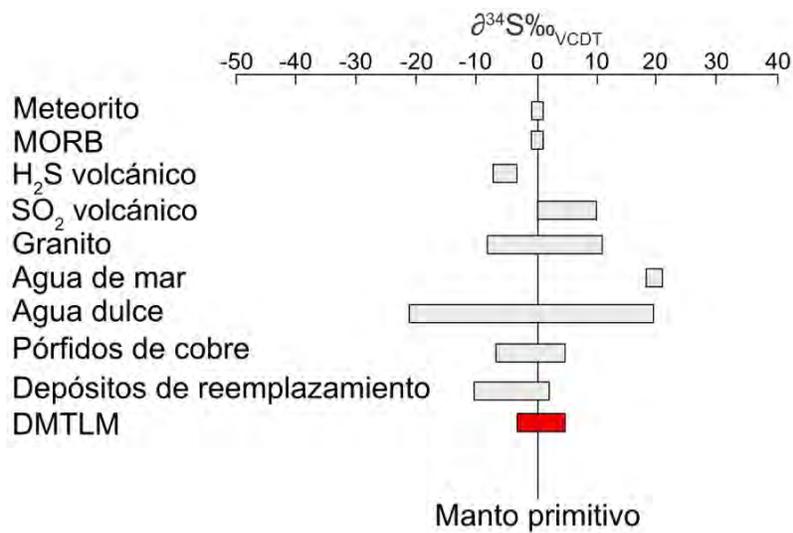


Fig. 4.17. Diagrama de comparación  $\delta^{34}\text{S}$ . Valores del DMTLM en comparación con diversos tipos reservorios y yacimientos minerales. Modificado de Hoefs (1997) y Zúñiga-Hernández (2010).

#### 4.4 Inclusiones fluidas

El análisis microtermométrico de inclusiones fluidas (IF) de la porción SW del DMTLM fue realizado a partir de 48 mediciones de minerales translucidos (cuarzo, calcita, granate, anfíbol y fuchsita). Estos minerales están asociados a las fases progradada y retrogradada del skarn y se encuentran distribuidas en las minas 5 Señores (n=4), Santa Cruz (n=16) y el Dorado (n=22). A manera de comparación se añadieron mediciones microtermométricas en cuarzo de una zona conocida como La Blanca (n=6) que se ubica al N del skarn, donde se han observado vetas de cuarzo con mineralización metálica (zona actualmente en proceso de estudio). Las IF consideradas fueron principalmente primarias, bifásicas a multifásicas con un tamaño adecuado para diferenciar los cambios de fase (5 a 30 micras). Los resultados se resumen en la tabla 4.6 y las placas de las muestras medidas en este trabajo (Santa Cruz) se muestran en el anexo 6.

Tipo de depósito	Nombre del depósito	Mineral	n	Tipo de IF	Rango de Th (°C)	Promedio (°C)	Rango de Tm (°C)	Rango de salinidad (wt. % NaCl eq.)	Promedio de Tm (°C)	Promedio de salinidad (wt. % NaCl eq.)
Skarn	El Dorado	Cuarzo	27	L+V	280 a 412	384.6	-16.8 a -16	19.4 a 20	-16.2	19.6
	El Dorado	Cuarzo	20	L+V	384 a 461	421.9	-28 a -26	26.2 a 27.4	-27.1	26.8
	El Dorado	Granate	20	L+V	550 a 561	557.4	-15 a -14.5	18.2 a 18.6	-14.7	18.4
	El Dorado	Tremolita	14	L+V	500 a 540	520.4	-15.2	18.8	-15.2	18.8
	El Dorado	Calcita	24	L+V	145 a 186	170.1	-8 a -5.9	9.1 a 11.7	-7.0	10.5
	El Dorado	Granate	6	L+V	550 a 557	553.8	-14	17.8	-14.0	17.8
	El Dorado	Cuarzo mena	25	L+V+S	372 a 486	408.7	-16 a 392	18.6 a 46.6	272.7	37.3
	El Dorado	Cuarzo mena	17	L+V+S	337 a 560	405.4	380 a 515	45.1 a 61.1	410.1	48.9
	El Dorado	Cuarzo (mena)	6	L+V+S	530 a 540	537.3	350 a 370	42 a 43.9	359.0	42.9
	El Dorado	Cuarzo	24	L+V	360 a 389	379.6	-17 a -16	19.4 a 20.2	-16.5	19.9
	El Dorado	Cuarzo	48	L+V+S	345 a 600	438.5	-15 a 483	17.8 a 56.7	85.6	26.0
	El Dorado	Cuarzo	10	L+V+CO <sub>2</sub>	28 a 31	30.0	-58 a -56.6		-57.0	
	El Dorado	Cuarzo	22	L+V+S	300 a 650	536.0	305 a 570	38.6 a 69.2	490.0	59.0
	El Dorado	Tremolita	9	L+V	318 a 322	320.0	-10.5	14.5	-10.5	14.5
	El Dorado	Cuarzo	22	L+V	378 a 410	389.4	-11.5 a -11	15 a 15.5	-11.3	15.2
	El Dorado	Cuarzo	18	L+V+S	330 a 580	392.1	-11.2 a 600	15.2 a 72.5	103.2	25.2
	El Dorado	Cuarzo	12	L+V+S	375 a 537	405.2	-12.5 a 518	16 a 62.1	72.9	23.4
	El Dorado	Cuarzo	24	L+V+S	360 a 480	410.9	-13.5 a 370	16.6 a 44.2	18.5	19.2
	El Dorado	Cuarzo	3	L+V	240 a 248	244.3	-16 a -15.5	19 a 19.4	-15.8	19.3
	El Dorado	Cuarzo	13	L+V	215 a 225	220.8	-6	9.2	-6.0	9.2

	El Dorado	Calcita (distal)	6	L+V	154 a 156	155.0	-4	6.4	-4.0	6.4
	El Dorado	Calcita	27	L+V	130 a 135	132.6	-3 a -2	3.4 a 5	-2.6	4.3
	El Dorado	Calcita	22	L+V	140 a 175	160.8	-4.5 a -3.5	5.7 a 7.2	-4.0	6.5
<i>El Dorado total</i>			<i>419</i>		<i>28 a 650</i>			<i>3.4 a 69.2</i>		
<i>Skarn</i>	<i>5 Señores</i>	<i>Cuarzo (Pb+Zn)</i>	<i>24</i>	<i>L+V+S</i>	<i>260 a 480</i>	<i>367.3</i>	<i>270 a 465</i>	<i>36 a 55.1</i>	<i>367.5</i>	<i>44.6</i>
	<i>5 Señores</i>	<i>Granate (secundario)</i>	<i>29</i>	<i>L+V</i>	<i>150 a 175</i>	<i>159.8</i>	<i>-31 a -29</i>	<i>28 a 29</i>	<i>-30.3</i>	<i>28.8</i>
	<i>5 Señores</i>	<i>Granate</i>	<i>31</i>	<i>L+V</i>	<i>345 a 411</i>	<i>382.5</i>	<i>-16 a -14</i>	<i>18 a 19.5</i>	<i>-14.8</i>	<i>18.5</i>
	<i>5 Señores</i>	<i>Granate</i>	<i>27</i>	<i>L+V</i>	<i>460 a 515</i>	<i>484.2</i>	<i>-17 a -16</i>	<i>19.5 a 20.2</i>	<i>-16.5</i>	<i>19.8</i>
<i>5 Señores total</i>			<i>111</i>		<i>150 a 515</i>			<i>18 a 55.1</i>		
<i>Skarn</i>	<i>Santa Cruz</i>	<i>Cuarzo</i>	<i>5</i>	<i>L+V+S</i>	<i>208 a 417</i>	<i>343.8</i>	<i>217 a 497</i>	<i>33 a 58.8</i>	<i>381.6</i>	<i>47.1</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Anfibol</i>	<i>22</i>	<i>L+V+S</i>	<i>505 a 590</i>	<i>524.7</i>	<i>41 a 505</i>	<i>48.2 a 59.9</i>	<i>423.7</i>	<i>51.8</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Calcita</i>	<i>12</i>	<i>L+V+S</i>	<i>200 a 269</i>	<i>226.3</i>	<i>-14 a 249</i>	<i>7.2 a 34.6</i>	<i>64.4</i>	<i>21.7</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Calcita</i>	<i>10</i>	<i>L+V</i>	<i>200 a 288</i>	<i>238.9</i>	<i>2 a 3.1</i>	<i>12.2 a 13.2</i>	<i>2.7</i>	<i>12.7</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Fuchcita</i>	<i>15</i>	<i>L+V</i>	<i>380 a 563</i>	<i>497.3</i>	<i>-8.8</i>	<i>12.6</i>	<i>-8.8</i>	<i>12.6</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Calcita</i>	<i>7</i>	<i>L+V</i>	<i>160 a 258</i>	<i>202.1</i>	<i>-9.4 a -3.4</i>	<i>5.6 a 13.3</i>	<i>-6.9</i>	<i>10.2</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Calcita</i>	<i>15</i>	<i>L+V</i>	<i>298 a 312</i>	<i>306.5</i>	<i>-6.3 a -6</i>	<i>9.2 a 9.6</i>	<i>-6.1</i>	<i>9.4</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Granate</i>	<i>8</i>	<i>L+V</i>	<i>404 a 443</i>	<i>427.6</i>	<i>4.5</i>	<i>10.0</i>	<i>4.5</i>	<i>10.0</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Calcita</i>	<i>27</i>	<i>L+V</i>	<i>182 a 232</i>	<i>207.2</i>	<i>-5</i>	<i>7.9</i>	<i>-5.0</i>	<i>7.9</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Calcita</i>	<i>18</i>	<i>L+V</i>	<i>222 a 274</i>	<i>249.1</i>	<i>-7.7 a -6.1</i>	<i>9.3 a 11.3</i>	<i>-6.8</i>	<i>10.3</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Calcita</i>	<i>16</i>	<i>L+V</i>	<i>150 a 261</i>	<i>213.4</i>	<i>-6 a -5.7</i>	<i>8.81 a 9.21</i>	<i>-5.9</i>	<i>9.0</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Cuarzo</i>	<i>2</i>	<i>L+V</i>	<i>325 a 329</i>	<i>327.0</i>	<i>-9</i>	<i>12.8</i>	<i>-9.0</i>	<i>12.8</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Cuarzo</i>	<i>3</i>	<i>L+V</i>	<i>521 a 561</i>	<i>544.0</i>	<i>4.8 a 6.2</i>	<i>7.1 a 8.9</i>	<i>5.7</i>	<i>7.7</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Calcita</i>	<i>27</i>	<i>L+V</i>	<i>213 a 269</i>	<i>239.3</i>	<i>-7.2</i>	<i>10.7</i>	<i>-7.2</i>	<i>10.7</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Anfibol</i>	<i>12</i>	<i>L+V+S</i>	<i>420 a 515</i>	<i>457.5</i>	<i>560 a 600</i>	<i>66 a 70.8</i>	<i>575.0</i>	<i>67.9</i>
	<i>Santa Cruz</i>	<i>Granate</i>	<i>10</i>	<i>L+V+S</i>	<i>520 a 595</i>	<i>568.2</i>	<i>440 a 520</i>	<i>51.7 a 62</i>	<i>488.1</i>	<i>57.8</i>
<i>Santa Cruz total</i>			<i>209</i>		<i>125 a 700</i>			<i>5.6 a 70.8</i>		
<i>Hidrotermal tardío</i>	<i>La Blanca</i>	<i>Cuarzo</i>	<i>22</i>	<i>L+V</i>	<i>112 a 125</i>	<i>118.2</i>	<i>-1.9 a -1.7</i>	<i>2.9 a 3.2</i>	<i>-1.8</i>	<i>3.1</i>
	<i>La Blanca</i>	<i>Cuarzo</i>	<i>21</i>	<i>L+V</i>	<i>220 a 253</i>	<i>236.5</i>	<i>-5 a -4.8</i>	<i>7.6 a 7.9</i>	<i>-4.9</i>	<i>7.7</i>
	<i>La Blanca</i>	<i>Cuarzo</i>	<i>25</i>	<i>L+V</i>	<i>230 a 282</i>	<i>256.6</i>	<i>-9 a -8.8</i>	<i>12.6 a 12.8</i>	<i>-8.9</i>	<i>12.7</i>
	<i>La Blanca</i>	<i>Cuarzo</i>	<i>24</i>	<i>L+V</i>	<i>140 a 165</i>	<i>152.7</i>	<i>-7.9 a -7.8</i>	<i>11.5 a 11.6</i>	<i>-7.9</i>	<i>11.5</i>
	<i>La Blanca</i>	<i>Cuarzo</i>	<i>26</i>	<i>L+V</i>	<i>317 a 385</i>	<i>357.2</i>	<i>-8</i>	<i>11.7</i>	<i>-8.0</i>	<i>11.7</i>
	<i>La Blanca</i>	<i>Cuarzo</i>	<i>22</i>	<i>L+V</i>	<i>165 a 199</i>	<i>187.2</i>	<i>-3.8 a -3.5</i>	<i>5.7 a 6.2</i>	<i>-3.7</i>	<i>6.0</i>
<i>La Blanca total</i>			<i>140</i>		<i>112 a 385</i>			<i>2.9 a 11.7</i>		

Tabla 4.6. Resumen de las IF del skarn de la porción SW del DMTLM. Los resultados microtermométricos de El Dorado fueron tomados de Sarabia-Jacinto (2018) y los resultados microtermométricos en letra cursiva fueron tomados de González-Partida (no publicado). Para el cálculo de salinidad se utilizó la tabla de Excel mmel HokieFlincks (Steele-MacInnis, et al., 2012).

#### 4.4.1 Fases pre-ebullición, ebullición y post-ebullición

De acuerdo con las características de las inclusiones y los resultados de microtermometría las IF se dividen en 3 grupos: pre-ebullición, ebullición y post-ebullición.

Las IF del grupo pre-ebullición se caracterizan por estar contenidas en cristales de granate y cuarzo, están dominados por inclusiones bifásicas con tamaños de 5 a 30 micras (10 micras promedio) con fase líquida dominante a vapor dominante. Los valores mínimos de temperatura de homogenización (Th) obtenidos varían de 370 a >600 °C y salinidades calculadas entre 7.7 a 20% en peso de NaCl equivalente (% wt. NaCl eq.). En 3 muestras de granate no se alcanzó a medir la Th máxima ya que la platina utilizada para el procedimiento tiene un límite de temperatura de  $\pm 600$  °C (Fig. 4.18)

Las IF del grupo de ebullición están contenidas en cristales de anfíbol, cuarzo<sup>1</sup>, calcita<sup>1</sup>, fuchsita y granate, son principalmente multifásicas que varían a bifásicas con tamaños de 5 hasta 30 micras, con una relación volumétrica muy heterogénea variando de fases sólido dominante a vapor dominante. Se obtuvieron valores mínimos de Th de 300 a 550 °C y las salinidades calculadas abarcan un rango amplio de 8 a 67% a wt. NaCl eq. El desarrollo de IF baja-moderada salinidad (bifásicas) con IF de alta salinidad (trifásicas-multifásicas) sugiere un proceso de ebullición (Wilkinson, 2001). Los cristales hijo presentes eran de halita > hematita y opacos (¿sulfuros?). Se observaron otros cristales de sal (KCl, CaCl<sub>2</sub>?), sin embargo no fue posible su identificación (Fig. 4.19).

El tercer grupo, las IF se encuentran en cristales de cuarzo<sup>2</sup> y calcita<sup>2</sup> principalmente dominados por IF bifásicas con tamaños inferiores a 15 micras y de fase líquida dominante. Los valores mínimos de Th obtenidos varían de 100 a 300 °C y las salinidades calculadas oscilan entre 4 a 21% wt. NaCl eq. Se clasifican como IF de la fase post-ebullición. Sobresale un cristal de granate con una Th de 160 °C y una salinidad de 28.8 % wt. NaCl eq. (Fig. 4.20).

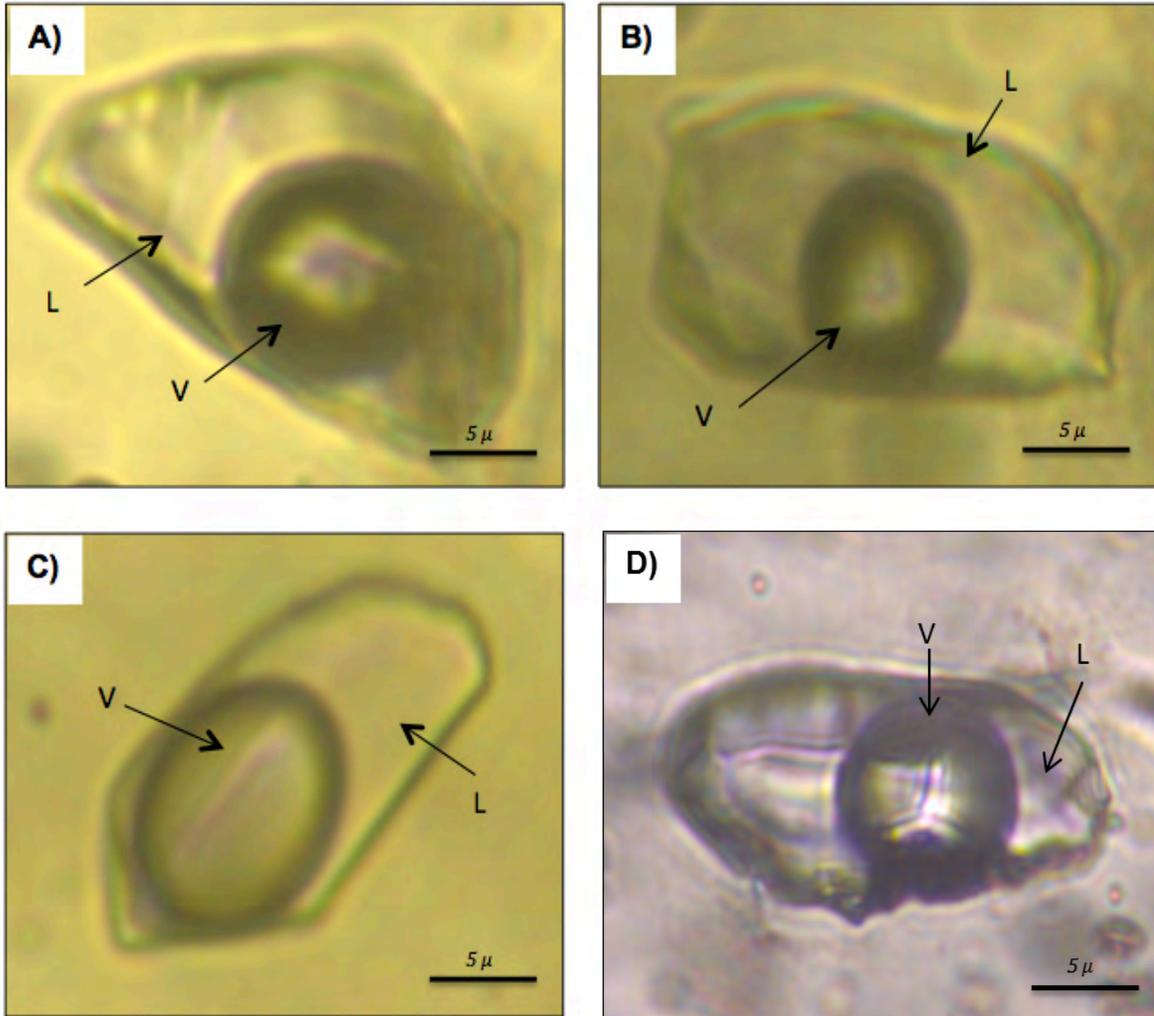


Fig. 4.18. Características petrográficas de las IF del skarn: pre-ebullición. IF bifásicas L+V (líquido dominante a vapor dominante), incluidas en cristales de cuarzo asociado a la porción prógrada. Las Th oscilan entre 370 a >600 °C y las salinidades entre 10 y 20 % wt. NaCl eq. Imagen tomada de González-Partida (sin publicar).

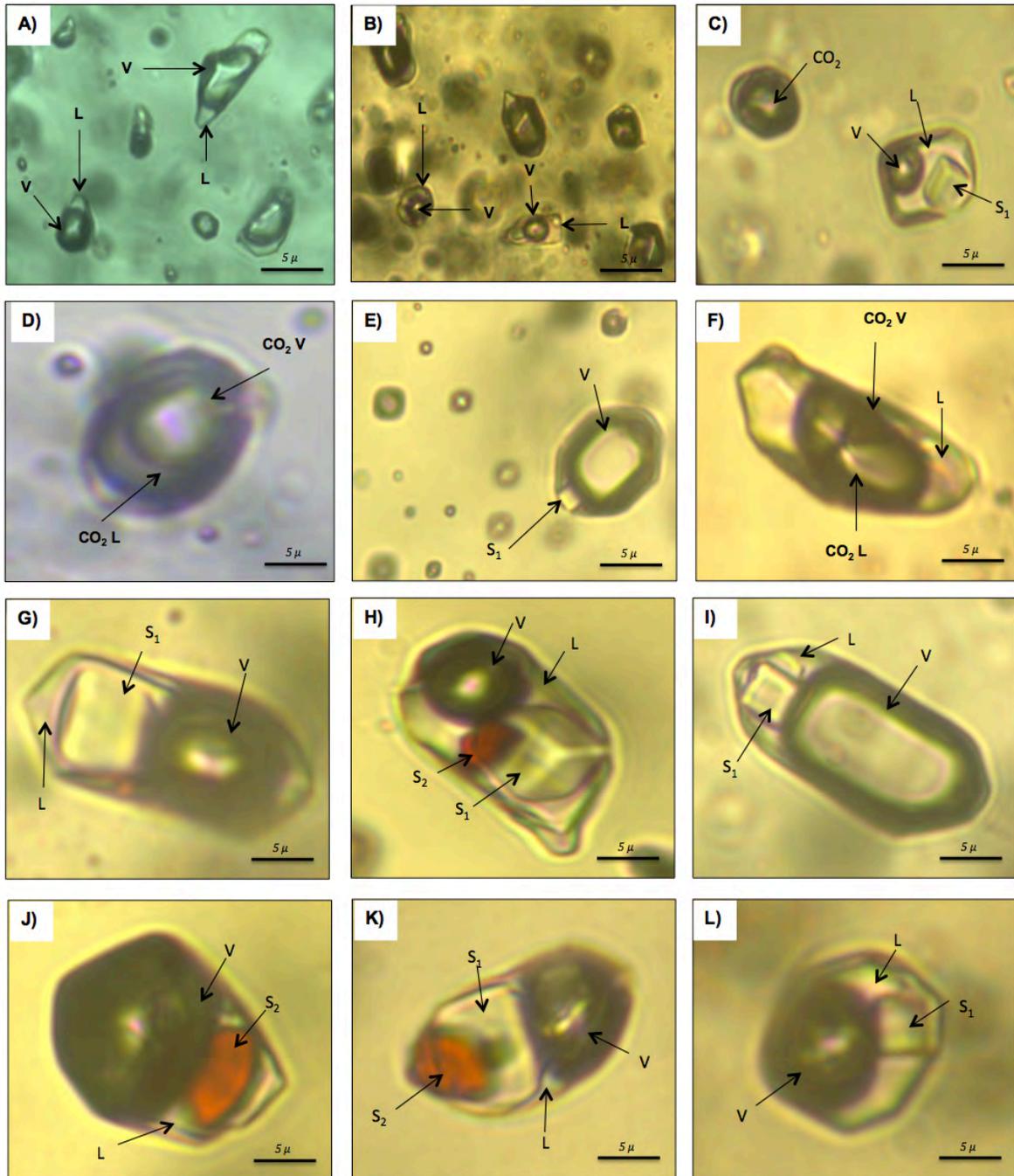


Fig. 4.19. Características petrográficas de las IF del skarn: ebullición. IF trifásicas (vapor dominante a sólido dominante) que varían a bifásicas (vapor dominante), incluidas en cristales de cuarzo, anfíbol y fuchsite, características de la transición progradada-retrogradada asociadas a un proceso de ebullición. La presencia de hematita, minerales hijos y burbujas de doble anillo indican un fluido oxidante, hipersalino y con contenido de CO<sub>2</sub>. Th de 300 a 550 °C y salinidades de hasta 67% wt. NaCl eq. S<sub>1</sub> indica NaCl (CaCl<sub>2</sub>, KCl) y S<sub>2</sub> hematita. Imagen tomada de González-Partida (sin publicar).

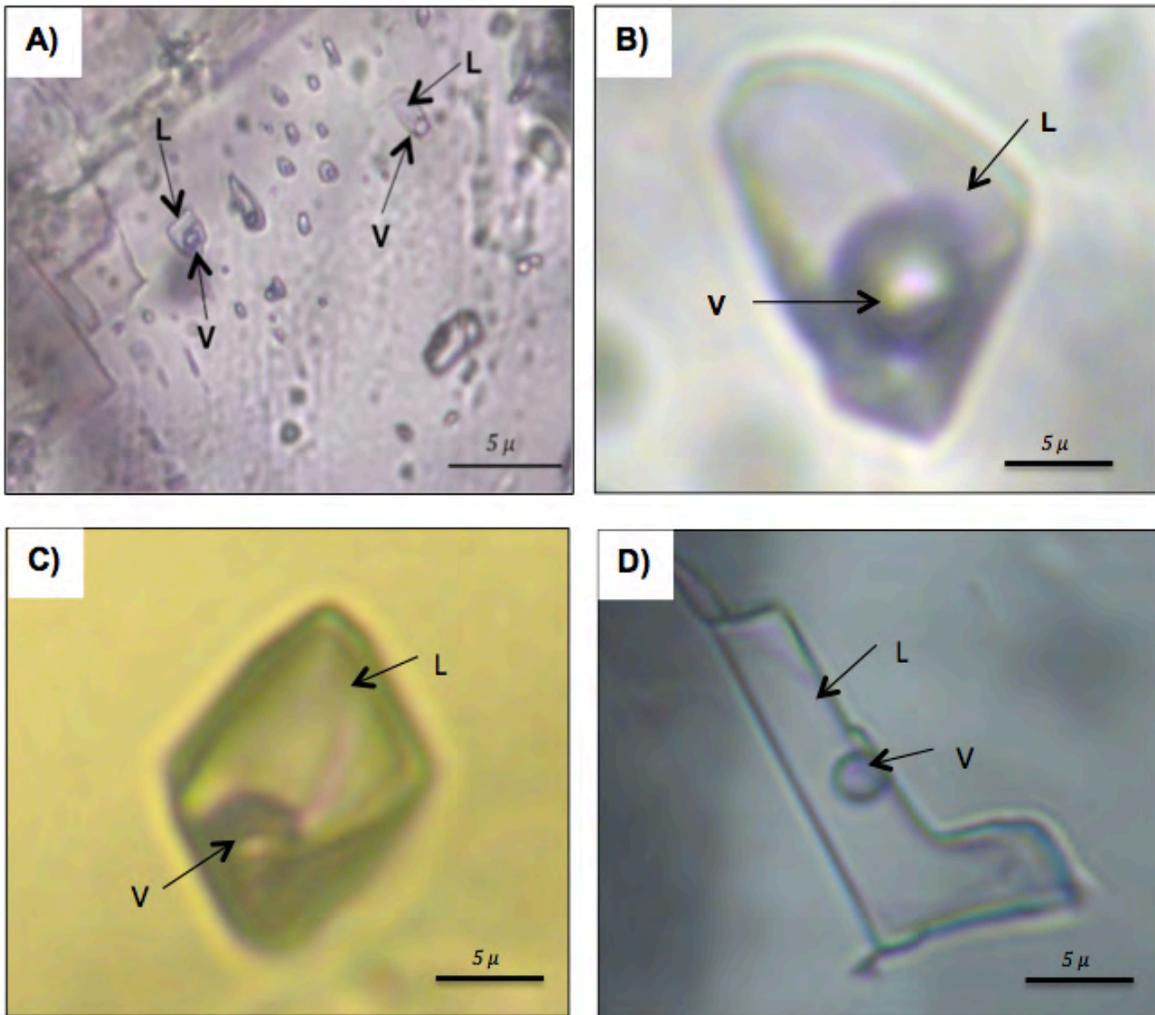


Fig. 4.20. Características petrográficas de las IF del skarn: post-ebullición. IF bifásicas L+V (líquido dominante), incluidas en cristales de cuarzo y calcita asociados a la porción retrógrada, asociadas a la fase tardía de desarrollo de skarn (¿inicio de la zona vetas al norte?), con Th mínimas de 100 a 300 °C y salinidades inferiores a 21% wt. NaCl eq. Imagen tomada de González-Partida (sin publicar).

#### 4.4.2 Fases progradada, retrogradada y retrogradada tardía

Los datos obtenidos se graficaron en un diagrama Th vs salinidad donde a su vez se muestra el mineral medido y la localidad donde proviene (Fig. 4.21). De acuerdo con los minerales observados en las etapas progradada, retrogradada y retrogradada tardía se observa una correlación con las fases pre-ebullición, ebullición y post-ebullición, lo que permite asociar los resultados microtermométricos con esas etapas.

La porción prógrada destaca por presentar cristales de granate y cuarzo de las localidades de 5 Señores, El Dorado y Santa Cruz, siendo los granates de El Dorado los que mostraron Th mayores. Esta porción muestra temperaturas de 370 a >600 °C y salinidades de 7.7 a 20, con una muestra que supera los 50 % wt. NaCl eq.

En la porción retrógrada se observan cristales de cuarzo, anfíbol y fuchcita de las localidades de 5 Señores, El Dorado y Santa Cruz. Los fluidos de esta porción muestran temperaturas de 300 a 550 °C y salinidades que varían de 8 a 67% wt. NaCl eq.

La porción retrógrada tardía se caracteriza por mostrar principalmente cristales de calcita y en menor medida cuarzo y anfíbol de El Dorado y Santa Cruz principalmente. Dentro de este grupo se incluye el cuarzo procedente de la veta de La Blanca cuyos resultados se comportan de manera similar a los obtenidos en el skarn, caracterizados por mostrar baja salinidad y baja temperatura.

Los granates observados en las inmediaciones de los campos retrógrados probablemente corresponden a una superposición de alteraciones, asociados a un desarrollo de skarn gradual y heterogéneo.

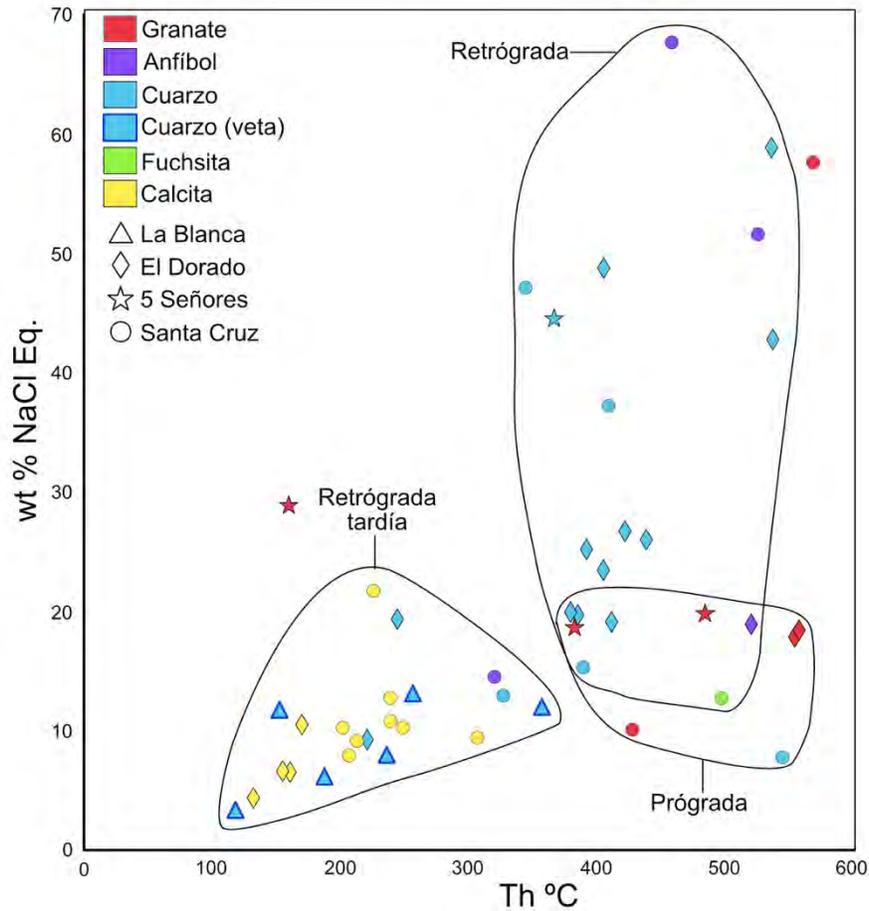


Fig. 4.21. Diagrama Th vs salinidad. Resultados del análisis microtermométrico del skarn en la porción SW del DMTLM, con muestras de las minas 5 Señores, El Dorado y Santa Cruz. Se agregaron los datos de la veta de La Blanca. Los datos se agruparon en 3 porciones: prógrada, retrógrada y retrógrada tardía con base en la temperatura, salinidad y asociación mineral observada en muestras de mano y petrografía. La superposición del campo prógrada y retrógrado sugiere que la evolución del skarn fue gradual.

#### 4.4.3 Evolución de los fluidos

El comportamiento de las IF de la porción SW del DMTLM indica una evolución de fluidos de fase prógrada a retrógrada tardía: inician con moderada salinidad y alta temperaturas (IF pre-ebullición) que posteriormente cambian a fluidos con alta salinidad y enseguida a baja-moderada salinidad y menor temperatura, interpretándose el primer proceso como ebullición y el segundo como mezcla, dilución y enfriamiento de fluidos (post-ebullición) (Fig. 4.22)

De acuerdo con Wilkinson (2001), el proceso de ebullición puede ocurrir por descenso de temperatura o presión, resultando en la producción de vapor y en sistemas abiertos pérdida de H<sub>2</sub>O. Como resultado de la fuerte partición de sales dentro de la fase líquida, el líquido residual llega a ser más salino. Este proceso está relacionado a zonas de transición dúctil-frágil y puede desencadenar la liberación de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S (Drummond y Ohmoto, 1985), observándose IF con CO<sub>2</sub> como se determinó en la mina El Dorado.

Los fluidos al estar en niveles superiores del sistema llegan a mezclarse con fluidos meteóricos mediante un sistema de fracturas (p. ej. González-Partida et al., 2004; Levresse et al., 2004), lo que ocasiona que la salinidad y la temperatura de estos disminuya, dando como resultado inclusiones menos salinas. En las IF procedentes de la zona de la veta muestran un comportamiento similar a las IF del skarn en este grupo (fase progradada tardía), lo que pudiera indicar su relación con un sistema magmático-hidrotermal en común, que varía de skarn en etapas tempranas a vetas en etapas tardías.

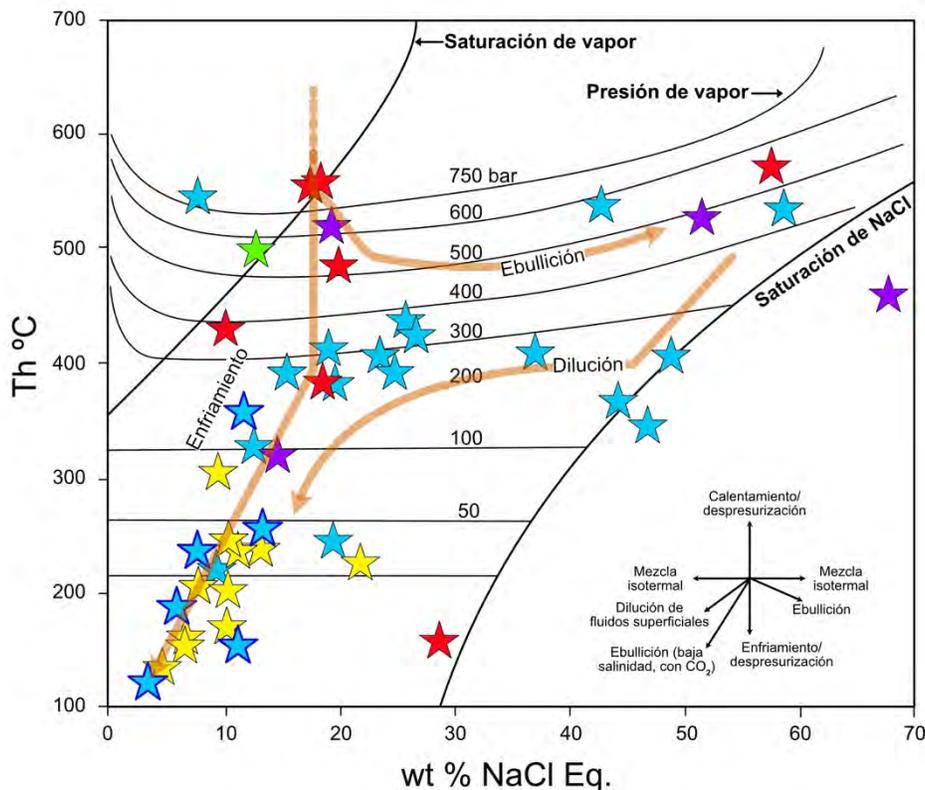


Fig. 4.22. Diagrama de evolución de los fluidos del skarn. Se observa la evolución de los fluidos durante el desarrollo del skarn evidenciando procesos de ebullición, mezcla, dilución y enfriamiento de los fluidos (Wilkinson, 2001). La línea naranja continua indica los procesos que ocurrieron durante el desarrollo del skarn. La línea naranja discontinua indican el inicio de la evolución de los fluidos, moderada densidad y alta temperatura. Estrella roja: granate; estrella verde: fucsita; estrella morada: anfíbol; estrella azul: cuarzo; estrella azul con borde azul marino: cuarzo de veta; estrella amarilla: calcita. Modificado de Hezarkhani y Williams-Jones (1998).

#### 4.4.4 Condiciones de presión y profundidad

Los resultados de Th y salinidad se graficaron en el diagrama de profundidad vs presión y se estimaron las profundidades (km) y presión litostática (bar). Los resultados indican el skarn inició su desarrollo aproximadamente a 3.1 km de profundidad y 780 bar de presión litostática (Fig. 4.23).

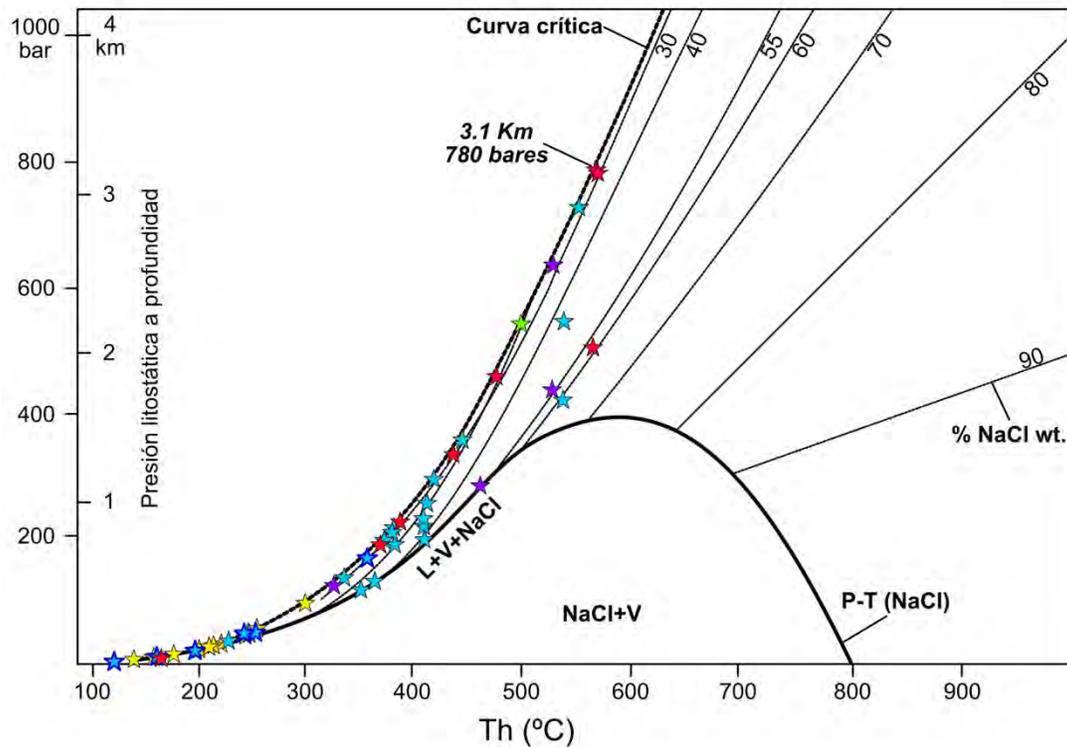


Fig. 4.23. Diagrama T-P-H- $X_{\text{salinidad}}$ . Datos de Th y salinidad del skarn y la veta. Los datos máximos de profundidad y presión fueron obtenidos considerando cristales de granate (porción prograda). Estrella roja: granate; estrella verde: fuchsita; estrella morada: anfíbol; estrella azul: cuarzo; estrella azul con borde azul marino: cuarzo de veta; estrella amarilla: calcita. Modificado de Hezarkhani y Williams-Jones (1998).

#### 4.5 Condiciones $fO_2$ , $fS_2$ y pH de los fluidos

Con base en las secuencias paragenéticas determinadas es posible estimar la evolución de las condiciones de  $fO_2$ ,  $fS_2$  y pH a partir de los conjuntos minerales de las etapas prógrada y retrógrada. Para este fin los diagramas de estabilidad para silicatos, óxidos y sulfuros son útiles. Los valores determinados se presentan como una estimación ya que los campos de estabilidad están diseñados a

ciertas presiones, temperaturas y cantidades de CO<sub>2</sub>, sin embargo, son aproximadas a las condiciones estimadas en el skarn.

Los diagramas pH vs  $fO_2$  ( $aO_2$ ) (Fig. 4.24 A y B) indican que los fluidos evolucionaron a partir de pH altos (magnetita, etapa prógrada) a pH bajos (pirita, etapa retrógrada) y con condiciones de un aumento en la oxidación (relación magnetita → calcopirita → hematita, magnetita → pirrotita → calcopirita → pirita-hematita). La composición isotópica de la pirita sugiere valores pH de 6 a 8 y valores de  $\log fO_2$  de -44 a -37.

El diagrama de temperatura vs  $fO_2$  y  $fS_2$  (Fig. 4.25 A y B) indican una evolución a partir de condiciones oxidantes, poco sulfuradas y de alta temperatura (etapa prógrada) a condiciones oxidantes, mas sulfuradas y de baja temperatura (etapa retrógrada).

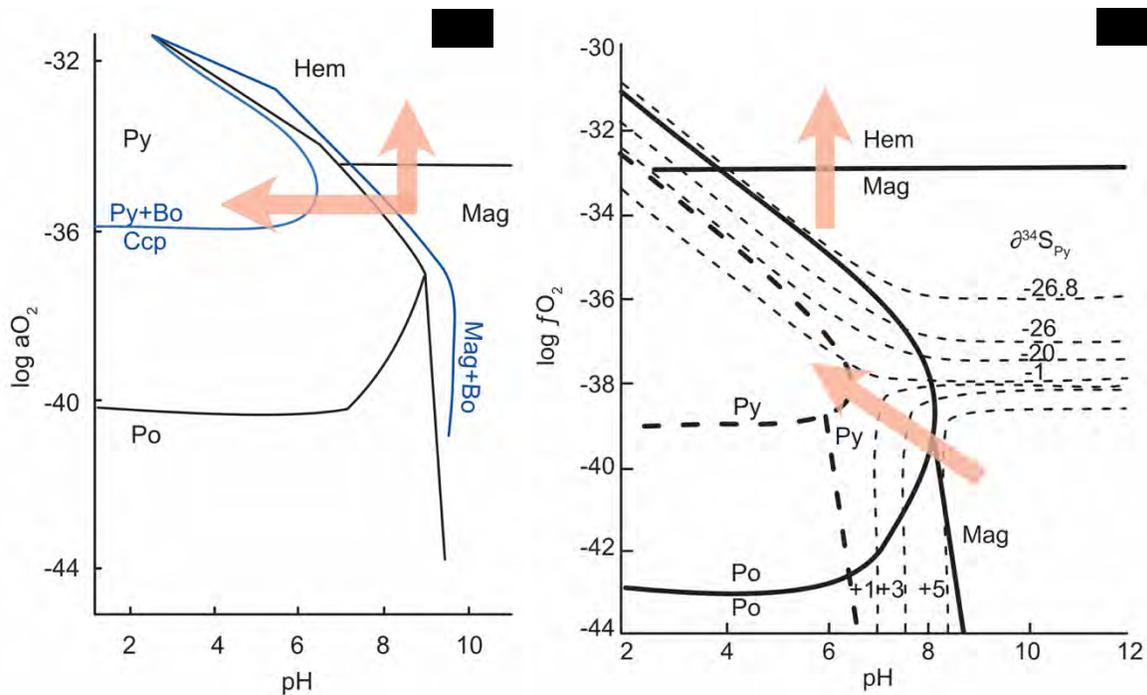


Fig. 4.24. Diagramas de  $fO_2$  vs pH de los fluidos. A) Diagrama de estabilidad para el sistema Fe-S-O (línea negra) y para el sistema Cu-Fe-S-O (línea azul) en función de  $\log aO_2$  vs pH calculado a 250 °C y 40 bares de presión de vapor. La flecha naranja indica la posible evolución del desarrollo del skarn. Modificado de Barton y Skinner (1979) y Pinto (2008). B) Diagrama de estabilidad del sistema Fe-S-O y del comportamiento de  $\delta^{34}S_{Py}$  (discontinua delgada) a 250 °C y  $\delta^{34}S_{SS}=0$  en función de  $\log fO_2$  y pH a  $\Sigma S= 0.1$  moles/kg H<sub>2</sub>O (continua gruesa) y 0.01 moles/kg H<sub>2</sub>O (discontinua gruesa). Modificado de Rye y Ohmoto (1974) y Pérez-Segura (2006).

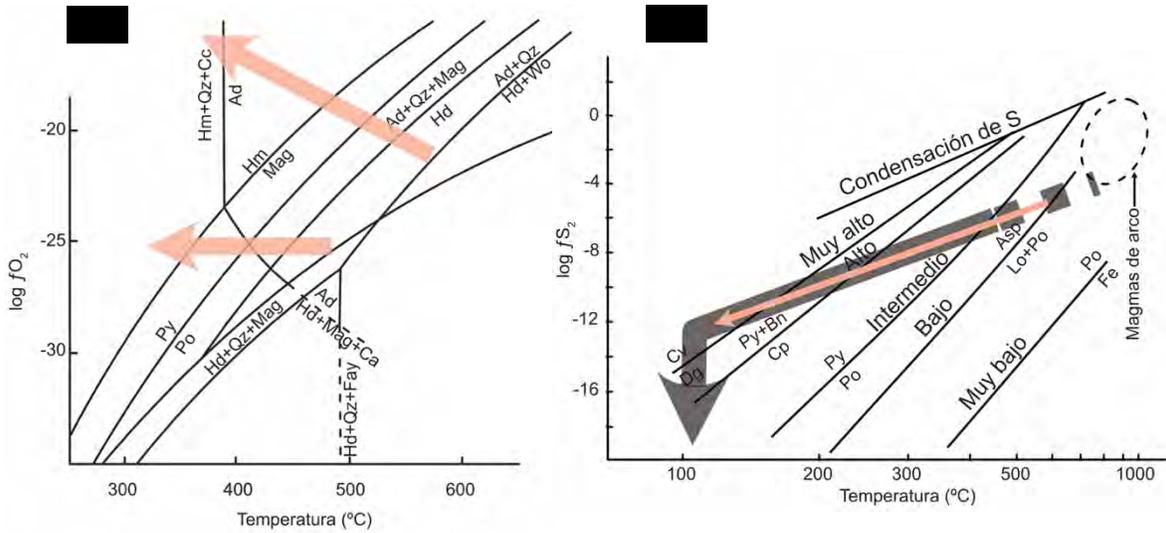


Fig. 4.25. Diagramas de  $f_{O_2}$  y  $f_{S_2}$  vs T de los fluidos. A) Diagrama  $f_{O_2}$  vs temperatura en función de la estabilidad de silicatos, óxidos y sulfuros en skarn a 500 bar de presión y  $X(CO_2)=0.1$ . Modificado de Meinert (1998) y Pérez-Segura (2006). B) Diagrama de  $f_{S_2}$  vs temperatura definiendo los estados de sulfuración de fluidos hidrotermales. La línea gris indica los fluidos magmático-hidrotermales activos. La línea roja indica la porción retrógrada y la línea azul la porción retrógrada del DMTLM. Lo: loellinguita. Reacciones minerales a 500 bares y sistema hidrotermal a 1 bar. Modificado Einaudi et al. (2003).

## CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

### 5.1 Origen de los intrusivos y el rol de las adakitas

Los resultados geoquímicos de los intrusivos del DMTLM evidencian una firma sub-acalina, calci-alcalina y metaluminosa en la mayoría de las muestras, con valores Nb/Y y Rb/Y+Nb moderados, estos resultados sugieren magmas originados en un límite de placas convergente con poca interacción con la corteza (Frost et al., 2001; Pearce et al., 1984; Winter, 2013), con edades que varían entre 12 y 15 Ma. El empobrecimiento de elementos HSFE, anomalía negativa de Nb y positiva de Rb, Ba y K, así como valores bajos de Yb, moderada a baja relación La/Yb, moderados valores de Y y bajos en la relación Sr/Y son consistentes con una firma adakítica (Drummond y Defant, 1990; Martin, 1986; 1999; Martin et al., 2005).

Estos datos sugieren una “conexión adakítica” con el inicio del CVM en su porción oriental (Gómez-Tuena et al., 2005) durante el Mioceno medio, dado que, para esa época, se ha propuesto una configuración tectónica de bajo ángulo o subhorizontal y una fusión parcial de sedimentos y corteza oceánica subducida, este hecho propició un magmatismo adakítico entre ~15-11 Ma (Ferrari et al., 2012; Gómez-Tuena et al., 2003, 2005; Mori et al., 2007) (Fig. 2.1). Las rocas de afinidad adakítica han sido caracterizadas por estar asociadas espacial y temporalmente a diversos yacimientos minerales ricos en Cu-Au, lo que sugiere una relación genética entre magmatismo y mineralización (Mungall, 2002; Qiang et al., 2006; Sajona y Maury, 1998; Thiéblemont et al., 1997). En México la asociación de mineralización con adakitas ya ha sido documentada (p. ej. Distrito de Mezcala).

Por otro lado, la configuración tectónica propuesta para esta porción del país es consistente con las configuraciones tectónicas para generar mineralización rica en Cu y Au por fusión de corteza (subducción de litósfera joven o muy lenta o convergencia oblicua, subducción plana y presencia de slab estancado o cese de subducción). Los procesos clave asociados a la fusión del slab implican condiciones de alta  $fO_2$  y movilización de elementos calcófilos (Sillitoe, 1997; Mungall, 2002).

La corteza oceánica subduciendo presenta condiciones de alta  $fO_2$  debido al equilibrio con el agua de mar durante la alteración hidrotermal y depositación de sedimentos terrígenos. Los fluidos derivados de estos slabs (deshidratación) pueden traer ese potencial oxidante dentro del manto, lo que puede desestabilizar los sulfuros del manto y liberar Cu y Au, dando paso a una extracción mineral por escape de fluidos (Mungall, 2002; Qiang et al., 2006; Sillitoe, 1997).

Por su parte, los mismos magmas generados (adakíticos) elevan también la  $fO_2$  del manto, lo que induce la oxidación de sulfuros metálicos en el manto y movilización de elementos calcófilos, requeridos para producir mineralización asociada a Cu. Estos magmas son eficientes en el reciclado de Au hidrotermal y sulfuros de Cu de la corteza oceánica (Sajona y Maury, 1998; Qiang et al., 2006). Los magmas asociados a altas  $fO_2$  implica intrusivos graníticos tipo I oxidados o de la serie magnetita y los depósitos presentan evidencia de haber sido formados en condiciones  $fO_2$  altas (ricos en magnetita, hematita primaria) (Qiang et al., 2006). Los intrusivos dentro del DMTLM muestran una dominancia de contenido de magnetita y ocasionalmente se observó ilmenita, lo que sugiere una tendencia a la serie magnetita o de granito tipo I. Por otro lado, la mineralización resultante en el yacimiento es rico en magnetita y hematita, consistente con condiciones de alta  $fO_2$ .

## **5.2 Intrusivos y su relación con el skarn**

Los intrusivos observados se caracterizan por una textura fanerítica dominante y una clasificación que va de intrusivos gabroicos a graníticos (clasificación geoquímica y modal), lo que implica que estos cuerpos fueron emplazados a profundidad y posiblemente experimentaron una evolución magmática: diorita → granodiorita → granito, secuencia que es concordante con las relaciones de campo, sin embargo, esta idea contrasta con la secuencia propuesta por Dorantes-Castro (2016) y que consiste en granito → granodiorita/diorita. Por otro lado, se observó que intrusivos de composición máfica cortaron rocas más evolucionadas, lo que indica que los intrusivos máficos son posteriores, sumándole el hecho de que estos cuerpos muestran una firma toleítica (2 muestras) y no calci-alkalina (23 muestras). Esto sugiere que su origen y edad es diferente de los cuerpos del DMTLM y probablemente no participaron en el desarrollo del skarn. Las relaciones de corte y los enclaves observados en los intrusivos apoyan esta idea.

La configuración estructural dentro del DMTLM es concordante con la dirección y forma de emplazamiento de los intrusivos, proponiendo que estos aprovecharon estas zonas de debilidad durante su ascenso, Por su parte, un skarn disectado e irregular puede indicar que este fallamiento se mantuvo activo al menos hasta la formación del skarn y probablemente propicio el emplazamiento de la zona de vetas al N. Un estudio estructural de la zona permitiría conocer más detalles.

De manera general, Meinert (1995) menciona que los intrusivos asociados a skarn muestran una firma geoquímica subalkalina y calci-alkalina. Con base en el elemento abundante se observan 2

grandes grupos: skarn de Sn, Mo y W, asociados a plutones evolucionados (SiO<sub>2</sub> mayor a 65% wt.) que han experimentado mayor interacción con la corteza (granitos tipo S, peraluminosos) y por otro lado skarn de Au, Cu y Fe, los cuales están asociados a plutones menos evolucionados (SiO<sub>2</sub> 59- 65% wt.) que no muestran interacción con corteza (granitos tipo I, metaluminosos). En el DMTLM la variedad de intrusivos muestra una composición de SiO<sub>2</sub> de 44 a 78 % wt. de SiO<sub>2</sub> sin embargo los intrusivos asociados a la mineralización oscilan entre 55 y 67 % wt., lo que implica que estos intrusivos muestran afinidad hacia skarns de Au, Cu y Fe.

Se ha propuesto que las condiciones de formación de skarn varían entre 1 a 3 kb y 5 a 15 km para los skarn profundos y 0.3 a 1 kb y 1 a 6 km para los someros (Einaudi et al., 1981; Meinert et al., 2005; Pirajno, 2009). Las profundidades de formación pueden intervenir en el tamaño, geomometría y estilo de alteración. En una profundidad somera el comportamiento del intrusivo con la roca caja puede ser de una manera frágil, lo que permitiría permeabilidad y mejor circulación de los fluidos, propenso a un proceso de ebullición (Meinert et al., 2005). Las condiciones de formación del skarn en el DMTLM estimadas varían entre 3.1 km de profundidad y 780 bar de presión litostática, por lo que se considera como skarn somero con evidencia de ebullición.

### 5.3 Skarn vs IOCG

Dadas las características mineralógicas observadas, el skarn se clasifica como skarn de Ca (andradita/piroxeno) con variación a skarn de Mg (olivino/serpentina), reflejando el carácter heterogéneo de los carbonatos que van de calizas con intercalaciones de dolomías. También puede clasificarse como un skarn de Au-Cu-(Fe) dado el contenido anómalo de estos elementos.

Una tercera clasificación ha sido propuesta por Dorantes-Castro (2016) y Sarabia-Jacinto (2017), quienes consideran al skarn como tipo IOCG (Iron Oxides-Copper-Gold deposits) debido a la abundancia de magnetita y los altos valores de Au y Cu. En la tabla 4.7 se resumen las principales características de ambos sistemas.

	<b>IOCG</b>	<b>DMTLM</b>
Suite metálica	Fe-Cu-U-Au-REE	Fe-Cu-Au
Ambiente tectónico	Rift, subducción, colapso de cuenca.	Subducción
Estilos de mineralización	Reemplazamiento, vetas, brechas	Reemplazamiento
Alteración	Na (±Ca)-K (±H <sup>+</sup> )	Ca ± Mg
FeOx	Abundante mag y/o hem	Abundante mag

Fluidos asociados	Magmático-meteórico	Magmático-meteórico
Th y salinidad	150-400, 600°C, 7-23, 42 wt % NaCl (Mag)	100-550, >600 °C, 4-67, 15 wt % NaCl (Mag)
Asociación espacial con intrusiones ígneas	No es clara (dioritas-granito)	Sí, dioritas-granodioritas
Edad	Arqueano-Plioceno	Mioceno

Tabla 4.7. Resumen de los IOCG vs skarn. Resumen de las principales características de los depósitos IOCG y su comparación con el skarn de la porción SW del DMTLM (Hitzman, et al., 1992; Hitzman y Valenta, 2005; Williams, et al., 2005).

Si bien estas dos tipologías muestran características propias, comparten algunas similitudes en asociación mineral, ambiente tectónico de formación, estilo de mineralización, abundante contenido de óxidos de Fe, fluidos asociados y condiciones de Th y salinidad. Por otro lado, muestran algunas diferencias como en la abundancia de ciertos elementos (en el DMTLM no se ha reportado U o REE anómalas), alteración (en el DMTLM la alteración es cálcica o magnésica, propilítica y sericitica en la porción retrógrada) y la asociación espacial con intrusiones ígneas (en el DMTLM si se observa una relación con cuerpos dioríticos-granodioríticos).

Finalmente, el skarn de la porción SW del DMTLM no se adhiere completamente a las características generales de los yacimientos tipo IOCG, sin embargo, puede considerarse como parte del clan IOCG (skarn de Au-Cu-Fe del clan IOCG) considerando la clasificación propuesta por Camprubí (2013).

Algunos depósitos clasificados como skarn del clan IOCG en México destacan: Las Truchas (Skarn Fe), Aquila (Skarn Fe), Peña Colorada (Skarn Fe, Kiruna), Mezcala (Skarn Fe-Au), Cerro del Oro (Skarn Fe-Cu), Chutla (Skarn Fe), Cosalá (Skarn Fe), Arteaga (Skarn Fe), Cerro Mercado (Skarn Fe), Tibor (Skarn Fe), El Burro-La Minita (Skarn Fe-Cu-Ni), Buena Vista de Cuellar (skarn Fe), El Anteojo (Skarn Fe), Chorreras (Skarn Fe), Dinamita (Skarn Fe-Cu), Los Vasitos (Skarn de Fe), con edades que van del Paleoceno al Mioceno medio (Camprubí, 2013).

#### 5.4 Origen y evolución de los fluidos

Los fluidos asociados al skarn provienen principalmente de una fuente magmática. Estos a profundidad propiciaron la extracción de metales del manto, de la corteza oceánica subducida (sedimentos marinos) y probablemente durante su ascenso al cruzar por corteza continental (zonas pre-enriquecidas previamente en metales, intrusivos) (Gammons y Williams-Jones, 1997; Hendenquist y Lowenstern, 1994; Wilkinson, 2013). La extracción de Cu se da principalmente del

manto con más o menos contribuciones del slab que subduce, mientras que para el Au y la Ag se cree derivan de fuentes de subducción, sin embargo, hay evidencia de contribuciones adicionales de la corteza de la placa superior (especialmente para la Ag).

En un principio la interacción del intrusivo con la roca caja es isoquímica permitiendo una marmolización de los carbonatos y posteriormente cambia a un proceso metasomático (etapas prógrada y retrógrada) donde inicia la interacción de fluidos. En el DMTLM los fluidos iniciales de esta interacción presentaron salinidades moderadas (etapa prógrada), posteriormente aumentan su salinidad (etapa retrógrada) y finalmente presentan salinidades bajas (etapa retrógrada tardía). Estas características se asocian a procesos de ebullición y dilución, con predominancia de fluidos magmáticos en la prógrada y magmático-meteóricos en la etapa retrógrada (Einaudi et al., 1981; Meinert et al., 2005; Wilkinson, 2001).

Los resultados de Th y salinidad son consistentes con las temperaturas y salinidades reportadas para skarns prógrados: 300 a 600 °C y para la porción retrógrada: 250 a 500 °C (Einaudi et al., 1981; Meinert, 1998; Pirajno, 1992). Las salinidades reportadas oscilan entre 10 a 50 % wt. NaCl eq. (Einaudi et al., 1981; Meinert et al., 2005).

De acuerdo con el set andradita-clinopiroxeno-magnetita en la etapa prógrada y la presencia de hematita (como mineral hijo en IF la etapa retrógrada) sugieren que en estas dos fases perduró un ambiente con  $fO_2$  progresiva elevada (Einaudi et al., 1981). Los estados de oxidación pueden ser definidos como  $SO_2$ - $H_2S$  (estado oxidado) y como  $CO_2$ - $CH_4$  (estado reducido). Si bien hay evidencia de alta  $fO_2$  en etapas prógrada-retrógrada, es probable que en estas etapas predominaron fluidos con concentraciones de  $SO_2$  y  $H_2S$ , (asociados a magmas tipo I que son más oxidados) (Gammons y Williams-Jones, 1997).

Los resultados isotópicos de carbono y oxígeno (en calcitas de la porción retrógrada y caliza) obtenidos muestran tendencias positivas, con una fuente magmática inicial. Choi et al. (2003) considera que la tendencia de decremento de isótopos de carbono y oxígeno de calizas menos a más alteradas está en función del incremento del metasomatismo. De acuerdo con Zheng y Hoefs (1993) las variables que controlan la composición isotópica final de las calcitas hidrotermales involucra la composición isotópica del fluido y la roca caja inicial, temperatura y especies carbonosas disueltas, también menciona que las correlaciones positivas entre  $\delta^{13}C\text{‰}$  y  $\delta^{18}O\text{‰}$  pueden producirse por precipitación de calcita a partir de fluidos con  $H_2CO_3$  dominante debido a un efecto de temperatura

(temperaturas debajo de los 300 °C) junto con desgacificación de CO<sub>2</sub> o con una interacción W/R o por mezcla de 2 fluidos con diferentes concentraciones (alcalina-clorurada). Una tendencia con pendiente más pronunciada indicaría un incremento en CO<sub>2</sub>, esto sugeriría un sistema abierto donde el fluido migrado adsorbe progresivamente el C de la pared.

A partir del diagrama de caja (Fig. 4.15), Bowman (1998) considera que estas tendencias corresponden a un proceso de interacción W/R con valores de 0.3 a 5 y una proporción de CO<sub>2</sub> (XCO<sub>2</sub>) = 0.01 a 0.5, lo que sugiere alto contenido de CO<sub>2</sub> para los fluidos en esta etapa, sin embargo, este resultado contrasta con los valores estimados de X(CO<sub>2</sub>) en sistemas tipos skarn que oscilan entre 0.05 y 0.1 (p. ej. Bowman et al., 1985; Einaudi et al., 1981; Meinert, 1982; Tornos, 1990). El alto contenido de CO<sub>2</sub> estimado se vería reflejado en los fluidos e implicaría observar diversas manifestaciones de CO<sub>2</sub> en las IF, como efectivamente se observó en la mina El Dorado.

Los resultados isotópicos de azufre expresan un rango de valores  $\delta^{34}\text{S}$  (-3 a +4.2) lo que sugiere una homogeneidad relativa en la composición de azufre y condiciones fisicoquímicas similares durante el proceso de formación de mena. De acuerdo con Velasco et al. (1998) los valores  $\delta^{34}\text{S}$  negativos (-26 a +3) se asocian a minerales de texturas diagenéticas tempranas menos evolucionadas (coliforme, framboidal, texturas primarias) mientras que los valores más altos (0 a +10) se asocian a texturas tipo stockwork (euhedrales, stockwork, texturas de recristalización), que pudieran indicar dos fuentes de azufre. Por su parte Hendenquist y Lowenstern (1994) consideran que valores con un rango de -3 a +9  $\delta^{34}\text{S}$  pueden ser causados por contribuciones de la roca hospedante.

Con base en Ohmoto (1972), la composición isotópica tanto del carbono como del azufre en minerales hidrotermales son controlados por la  $f\text{O}_2$  y pH, temperatura y la composición isotópica del azufre y carbono en los fluidos. Así mismo indican ciertos estados de oxidación de fluidos formadores de mineralización: variable S + uniforme C: alta  $f\text{O}_2$ . Uniforme S + uniforme C: intermedia  $f\text{O}_2$ . Uniforme S + variable C: bajo  $f\text{O}_2$ .

Considerando los valores isotópicos obtenidos, los fluidos del DMTLM tienen un origen magmático para la etapa prógrada que evolucionan por interacción W/R a fluidos magmático-hidrotermales. Si bien se estiman condiciones de alta  $f\text{O}_2$  con base en la mineralogía e IF tanto para la etapa prógrada y retrógrada, la baja  $f\text{O}_2$  dada por los isotópicos de S en sulfuros indicaría que su precipitación fue enseguida del proceso de ebullición e inicio de la dilución, donde probablemente comenzaron a descender los valores de  $f\text{O}_2$  con texturas diagenéticas tempranas principalmente.

Con base en los diagramas de pH vs  $fO_2$ , temperatura vs  $fO_2$  y temperatura vs  $fS_2$  (Fig. 4.22) de manera general la evolución del skarn en su porción prógrada muestra valores de pH altos, condiciones de  $fO_2$  altos y condiciones de  $fS_2$  bajos que varían en su porción retrógrada a pH bajos y condiciones  $fO_2$  y  $fS_2$  altos, datos que corresponden con los valores estimados con la mineralogía, IF e isótopos estables del skarn.

## 5.5 Transporte y precipitación

Se ha documentado que el transporte de metales es a través de complejos clorurados ( $Cl_2$ ) y bisulfurados ( $HS_2$ ), esto dependerá de condiciones como la T, P y química de la solución (Gammons y Williams-Jones, 1997; Hendenquist y Lowenstern, 1994; Ohmoto, 1972).

Los complejos clorurados son eficientes a altas temperaturas, mientras que los complejos bisulfurados son eficientes a menor temperatura (bajo 450-400 °C) (Richards, 2011; Gammons y Williams-Jones, 1997). En zonas con altos valores  $fO_2$ , el  $H_2S$  es oxidado a  $SO_2$  y/o sulfato acuoso, lo que bruscamente decrece la movilidad de metales como complejo bisulfurado, consecuentemente condiciones muy oxidantes favorecerán el transporte como complejos clorurados vs bisulfuros a cualquier temperatura (Gammons y Williams-Jones, 1997). Por otro lado, procesos como la ebullición, dilución y en ocasiones las reacciones W/R (interacción magma-roca carbonatada) son considerados como procesos eficientes en la precipitación de Au (Wilkinson, 2001; Gammons y Williams-Jones, 1997; Ohmoto, 1972; Pirajno, 1992).

El proceso de ebullición es consecuencia de una pérdida de presión y subsecuentemente implica cambios de temperatura y aumento de salinidad y ha sido propuesto como uno de los mecanismos mas eficientes de mineralización de metales preciosos (Gammons y Williams-Jones; Richards, 2011; Wilkinson, 2001, entre otros), mientras que el proceso de dilución es propiciado por una mezcla de aguas, enfriamiento (descenso de T) o adición o remoción de agua (o mezcla con una solución más salina, implica un sistema abierto, altas concentraciones de  $CO_2$ ) (Gammons y Williams-Jones, 1997) y finalmente el proceso de interacción W/R estaría relacionado con altas tasas de flujo o largas duraciones en la interacción. Si la roca caja es particularmente reactiva a soluciones hidrotermales ácidas (carbonatos) bastarían menores tasa de flujo o menores duraciones en la interacción. Si los carbonatos presentan paquetes mas permeables (dolomitas) permitirán mayores ingresos y reacciones adicionales (Gammons y Williams-Jones, 1997). Esta serie de procesos que

podrían actuar de manera separada o en conjunto, desencadenarían aumento de pH, descenso de niveles de  $H_2S$  y un decremento de Cl, lo que produciría un descenso en la solubilidad del Au y consecuentemente su precipitación (Drummond y Ohmoto, 1985; Gammons y Williams-Jones, 1997).

Dentro del skarn del DMTLM se ha observado una tendencia de zonas en ricas en Au-Cu-Ag, siendo la relación Au-Cu más abundante y se ha reportado mayor presencia de Au en zonas de magnetita masiva y en zonas de sulfuros masivos. La magnetita está íntimamente relacionada a la fase prógrada del skarn, lo que sugiere una formación temprana. La concentración de Au en magnetita puede indicar que el Au se puede transportar y precipitar bajo las mismas condiciones que la magnetita. Las condiciones que favorecen el transporte de magnetita (y Au) son a partir de complejos clorurados a altas temperaturas y las condiciones oxidantes (relación  $fO_2/fS_2$  alta) son propensas para la concentración de este set mineral (Sillitoe, 1979). Por su parte, Gammons y Williams-Jones (1997) mencionan que bajas concentraciones de  $H_2S$  pueden favorecer la deposición de magnetita, especialmente a altas temperaturas.

En contra parte, la presencia de sulfuros se ha observado asociada a la fase retrógrada, indicando que su formación es enseguida de la fase prógrada. La precipitación de sulfuros tomaría lugar después del periodo principal de crecimiento del skarn, asociado al declive de temperatura, reacciones locales oxidación-reducción implicadas por la asociación periférica de sulfuros con zonas calco-silicatadas específicas, o neutralización de fluidos con el contacto con el mármol. De acuerdo con Richards (2011), a temperaturas de 400 °C, donde la fase  $SO_2$  del fluido empieza a ser desproporcionada respecto a  $H_2S$  y  $H_2SO_4$  (aumenta  $H_2S$ ) se puede propiciar la precipitación de sulfuros (calcopirita, pirita, bornita, entre otros). Gammons y Williams-Jones (1997) consideran que, en condiciones de saturación de azufre, los sulfuros (de Cu) tienden a secuestrar el Au y consecuentemente la solubilidad del Au es reducida, coprecipitando Cu y Au (p. ej. Au en calcopirita). Por otro lado, la producción o abundancia de  $H_2S$  también podría desencadenar la deposición de calcopirita que podría incorporar cantidades de Au.

Respecto a la Ag, esta se relaciona a la presencia de complejos sulfurosos neutros o alcalinos y T inferiores de 300 °C. La Ag es transportada como  $Ag(HS)_2$  y puede precipitar por un decremento en la concentración de S acuoso, un cambio de pH o un decremento en estado de oxidación. La asociación Au-Ag puede llevarse a cabo a partir de la formación de  $AgS_2$ , que pudiera limitar la

solubilidad de Au en fluidos ricos en Ag (Gammons y Barnes, 1988; Gammons y Williams-Jones, 1997).

Finalmente, las características de los fluidos observados en el skarn (contenidos variables de Cl en condiciones oxidantes) asociados a zonas de magnetita masiva (alta T) como a zonas de sulfuros (baja T), sugiere que los metales fueron transportados principalmente por complejos clorurados a temperaturas por encima de los 400 °C en condiciones oxidantes (etapas prógrada y parte de la retrógrada) y posteriormente el transporte cambia a través de complejos bisulfurados en etapas tardías con menor temperatura manteniendo las condiciones oxidantes. Los procesos de ebullición (al final de la etapa prógrada e inicios de la etapa retrógrada), dilución (finales de la etapa retrógrada) e interacción W/R son responsables de la precipitación de Au-Cu-Ag. Las condiciones de la etapa prógrada permitieron el transporte y concentración de magnetita. Hacia la etapa tardía, las condiciones de los fluidos cambian a más sulfurosas y de menor temperatura, lo que propicia la concentración de sulfuros. La poca evidencia de cristales de Au (observado como agregados en cristales de bornita y pirrotita ¿?) y de Ag (no observado ni nativa ni en minerales) sugiere que estos elementos se presentan en tamaños microscópicos apenas visibles con técnicas de microscopía convencionales, asociados a magnetita (Au-Cu) y sulfuros (Au-Cu-Ag). La abundancia de Cu se explica por la presencia de sulfuros como la bornita, calcopirita, calcocita, covelita y digenita.

## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES**

La porción SW del DMTLM ha demostrado poseer potencial económico, cuyo éxito ha sido producto de la exploración y del entedimiento del yacimiento. Los resultados obtenidos en este trabajo dan una nueva visión del yacimiento tipo skarn y proporcionan datos que pueden ser útiles para las futuras campañas de exploración.

Los datos obtenidos sugieren que la firma geoquímica adakítica de los intrusivos evidencia intrusivos fértiles que probablemente fueron capaces de transportar mineralización. Este criterio puede ser utilizado para discriminar intrusivos con potencial mineralizante.

Por otro lado, la firma isotópica de C y O en calcitas puede proporcionarnos una idea de la cercanía o lejanía de la zona mineralizada. La calcita proveniente de zonas de skarn muestra valores bajos de C y O, mientras que la calcita derivada de zonas marmolizadas muestra valores altos de C y O.

Estos criterios pueden ser aplicados en zonas donde no se observa mineralización en superficie y solo se observan afloramientos de intrusivo o zonas recristalizadas.

### **6.1 Conclusiones particulares**

Los intrusivos emplazados en el DMTLM son concordantes en edad (~12.18 y ~15.27 Ma) y en composición (calci-alcalinas) con el inicio del CVM en su porción E a partir de la subducción entre la placa de Cocos debajo de la placa de Norteamérica.

La afinidad adakítica observada en la mayoría de los intrusivos es concordante con el modelo de subducción propuesto para el CVM en el Mioceno, el cual fue de bajo ángulo o subhorizontal con fusión parcial de sedimentos y corteza oceánica. La presencia de adakitas en esta área coincide con el tren de magmas adakíticos de 11 a 15 Ma en la porción E del CVM.

Las adakitas propiciaron la liberación de metales del manto y del slab debido a sus condiciones de alta  $fO_2$  (magmas oxidados, con presencia de magnetita). Estos metales fueron transportados por el magma en ascenso hacia niveles someros de la corteza continental.

Las características geoquímicas de los intrusivos propiciaron el desarrollo de un skarn de Au-Cu-(Fe). Estos intrusivos de tipo diorítico y granodiorítico. La influencia de la diorita fue principalmente a profundidad mientras que la influencia de la granodiorita fue en niveles más someros. El granito y el gabro son pulsos tardíos que cortan a los intrusivos y al skarn. Dadas sus características geoquímicas y relaciones de corte, los intrusivos gabróticos son de edad y origen diferente a los intrusivos asociados al skarn.

El skarn desarrollado se clasifica como cálcico con variación a magnésico de acuerdo con su contenido en silicatos y como skarn de Au-Cu-(Fe) de acuerdo con sus valores anómalos en estos elementos. Una tercera clasificación puede ser skarn de Au-Cu-(Fe) del clan IOCG.

Las condiciones de formación inicial del skarn son someras, a 3.1 km de profundidad y 780 bares de presión litostática. Los fluidos que participaron en el desarrollo del skarn son magmáticos dominantes en las etapas tempranas y magmático-meteóricos en etapas tardías.

La secuencia endoskarn – exoskarn – mármol indica que los carbonatos sufrieron inicialmente metamorfismo isoquímico y posteriormente evolucionó a metasomático, donde hubo una importante interacción fluido-mármol que permitió el desarrollo completo del skarn.

La etapa prógrada se caracteriza por contener granate, magnetita, piroxeno y cuarzo (endoskarn) con textura masiva irregular, así como piroxeno, granate, magnetita y wollastonita (exoskarn) con textura bandeada. También se observa mármol con bandas de magnetita.

Para la etapa prógrada se estiman en un rango de temperatura de 370 a >600 °C, con salinidades de 8 a 19.8 y una muestra alcanzando los 57.8 % wt. NaCl eq. (491.6 °C y 15.4 % wt. NaCl eq. en promedio). Los fluidos de esta etapa se caracterizaron por ser clorurados, moderadamente salinos y de alta  $fO_2$  y temperatura.

La etapa retrógrada reemplazó tanto al endoskarn como al exoskarn. Muestra un primer reemplazamiento de anfíbol y fuchsita, seguido de epidota, clorita, cuarzo y calcita, con gran cantidad de sulfuros (calcopirita, pirita, bornita, calcocita, covelita y digenita).

En la etapa retrógrada se estimaron temperaturas de 300 a 550 °C con salinidades de 8 a 67 % wt. NaCl eq. (406 °C y 30 % wt. NaCl eq. en promedio). Los fluidos en esta etapa se caracterizaron

por ser principalmente bisulfurados, altamente salinos (que varían a pobremente salinos en la etapa retrógrada tardía), de  $fO_2$  constante (varía de alta a baja) y menor temperatura. Estos evolucionaron a partir de la interacción W/R (fluidos magmáticos-mármol), ebullición (descompresión por fracturamiento) y dilución (mezcla de agua magmática con meteórica) con contenido importante de  $CO_2$ .

Hacia la etapa retrograda tardía se observa principalmente calcita y la pirita. Muestran temperaturas inferiores a los 300 °C y salinidades de 3 a 30 % wt. NaCl eq. (209 °C y 11 % wt. NaCl eq. en promedio).

El transporte de metales (Au-Cu-Ag) fue propiciado por la condición oxidante, clorurada (a mayor temperatura) y bisulfurada (a menor temperatura) de los fluidos. Procesos como la interacción W/R, ebullición y dilución desencadenaron su precipitación a lo largo del desarrollo del skarn.

La edad de la mineralización (etapa retrógrada) estimada a partir de la fuchsita (área de Santa Cruz) indica una edad de ~12.49 Ma. Considerando la edad de cristalización de la intrusión (~15.27 Ma, área de Santa Cruz) se estima un lapso de ~3 Ma de duración del sistema hidrotermal.

## REFERENCIAS

- Aguilera-Martínez, M. A., Zárate-López, J., De La Calleja-Moctezuma, A., Cureño-Suriano, R., López-Gallardo, A. (2000). Carta Geológica-Minera Minatitlán E15-7 escala 1:250,000 estados de Veracruz y Oaxaca: Pachuca, Hidalgo, Consejo de Recursos Minerales, informe técnico, 54 p.
- Barton, P. B., y Skinner, B. J. (1979). Sulfide mineral stabilities, in: *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 2<sup>nd</sup> edition. Barnes, H. L. (ed.). Wiley Interscience Publication, pp. 278–403.
- Bowman, J. R. (1998). Stable-isotopes systematics of skarns. Mineralized intrusion-related skarn systems, short course series-Mineralogical Association of Canada, 26, pp. 99-146.
- Bowman, J. R., Covert, J. J., Clark, A. H., Mathieson, G. A. (1985). The CanTung E Zone Scheelite skarn orebody, Tungsten, Northwest territories: oxygen, hydrogen, and carbon isotopes studies. *Econ. Geol.*, 80, pp. 1872-1895.
- Camprubí, A., (2013). Tectonic and metallogenetic history of Mexico. *Soc. Econ. Geol. Special Publications*, 17, pp. 201-243.
- Carrasco-Núñez, G., López-Martínez, M., Hernández, J., Vargas, V. (2017). Subsurface stratigraphy and its correlation with the surficial geology at Los Humeros geothermal field, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geothermics*, 67, pp. 1-17.
- Castro-Mora, J., Hernández-Pérez, I., Vélez-López, J., Baca-Carreón, J.C. (1994). Monografía Geológico-Minera del estado de Veracruz: Pachuca, Hidalgo, Consejo de Recursos Minerales, 123 p.
- Castro-Mora, J., Ortiz-Hernández, L. E., Escamilla-Casas, J. C., Cruz-Chávez, E., Dorantes-Castro, C. G. (2016). Metalogénesis de la mineralización tipo IOCG relacionada al skarn del Distrito Minero Las Minas, Estado de Veracruz. *Tópicos de investigación en Ciencias de la Tierra y materiales*, 3, pp. 128-143.
- Chesapeakegold. (2018). Tatatila. Recuperado de: <http://chesapeakegold.com/tatatila.php> el 5 de mayo del 2019.
- Choi, S. -G. Kim, S.-T., Lee, J. G. (2003). Stable isotope systematics of Ulsan Fe-W skarn deposit, Korea. *J. Geochem. Explor.*, 78-79, pp. 601-606
- Cox, K. G., Bell, J. D., Pankhurst, R. J. (1979). *The interpretation of igneous rocks*. Boston, George Allen and Unwin, 459 p.
- Dorantes-Castro, C. G. (2016). Características petrológicas y geoquímicas de los intrusivos relacionados a la mineralización y paragénesis del Skarn tipo IOCG en la Zona Minera de Las Minas, Estado de Veracruz. Instituto Politécnico Nacional. Tesis de licenciatura, 120 p.
- Drummond, M. S., Defant, M. J. (1990). A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: archean to modern comparisons. *J. Geophys. Res.*, 95 (B13), pp. 21503-21521.

- Drummond, S. E., Ohmoto, H. (1985). Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Econ. Geol.*, 80, pp. 126-147.
- Eiguiluz-de Antaño, S., Aranda-García, M., Marrett, R. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Bol. Soc. Geol. Mex.*, 53, pp. 1-26.
- Einaudi, M. T., Hendequist, J. W., Inan, E. E. (2003). Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transition from porphyry to epithermal environments. *Econ. Geol.* Special publication 10, pp. 285-313.
- Einaudi, M. T., Meinert, L., Newberry, R. (1981). Skarn deposits. *Econ. Geol.*, 75<sup>th</sup> Anniv., pp. 317-391.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522-523, pp. 122-149.
- 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. *J. Petrol.*, 42 (11), pp. 2033-2048.
- Gammons, C. H., Barnes, H. L. (1988). The solubility of Ag<sub>2</sub>S in near-neutral aqueous sulfide solutions at 25 to 300 °C\*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, pp. 279-290
- Gammons, C. H., Williams-Jones, A. E. (1997). Chemical mobility of gold in the porphyry-epithermal environment. *Econ. Geol.*, 92, pp. 45-59.
- Geoconsulting Ingenieros. (2010). Geologic map of Las Minas Project area: contracted geologic mapping for Source Exploration Corp.
- Goldstein, R. H. (2003). Petrographic analysis of fluid inclusions. In: I. Samson, A. Anderson, D. Marshall (Eds.). *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineral. Assoc. Can., Short Course Ser. 32, pp. 9-53.
- Gómez-Tuena A., LaGatta A., Langmuir C., Goldstein S., Ortega-Gutiérrez F., Carrasco-Núñez G. (2003). Temporal control of subduction magmatism in the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: mantle sources, slab contributions and cristal contamination, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4 (8), pp. 1-33.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Bol. Soc. Geol. Mex.*, 57 (3), pp. 227-283.
- González-Partida, E., Camprubí, A., Tritlla, J., Levresse, G., Carrillo-Chávez, A. (2004). Fluidos asociados al skarn Au(-Cu) de La Joya, distrito de Mezcala, Guerrero, México: implicaciones regionales para depósitos formados a partir de rocas calcoalcalinas vs. adakíticas. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* [en línea], 21 (3), pp. 371-381.
- González-Partida, E., González-Sánchez, F., Tritlla, J., Levresse, G. (2005). Adakitas y mineralización de Cu y Au en México: ejemplo del distrito minero de Mezcala, Gro., México. En: Corona-esquivel R., Gómez-Caballero, J. A. (Eds.). *AIMMGM XXVI Convencion Internacional de Minería. Acta de Sesiones*.

- González-Partida, E., Levresse, G., Carrillo-Chávez, A., Cheilletz, A., Gasquet, D., & Jones, D. (2003). Paleocene adakite Au–Fe bearing rocks, Mezcala, Mexico: evidence from geochemical characteristics. *J. Geochem. Expl.*, 80 (1), pp. 25-40.
- Hendenquist, J. W., Lowenstern, J. B., (1994). The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, pp. 519-527.
- Hezarkhani, A., Williams-Jones, A. E. (1998). Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Econ. Geol.* (93), pp. 651-670.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., Einaudi, M.T. (1992). Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu\U\Au-REE) deposits. *Precambrian Res.*, 58, pp. 241–288.
- Hitzman, M.W., Valenta, R.K. (2005). Uranium in iron oxide-copper–gold (IOCG) systems. *Econ. Geol.*, 100, pp. 1657–1661.
- Hoefs, J. (1997). *Stable Isotope Geochemistry*. 4<sup>th</sup> edition. Springer-Verlag, 201 p.
- Irvine, T., Baragar, W. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks: *Can. J. Earth Sci.*, 8, pp. 523-548.
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre Le Bas M. J., Sabine P. A., Schmid R., Sorensen, H., Streckeiden, A., Wolley, A. R., Zanettin, B. (1989). *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell, Oxford, 193 p.
- Levresse, G., González-Partida, E., Carrillo-Chávez, A., Tritlla, J., Camprubí, A., Cheilletz, A., Gasquet, D., Deloule, E. (2004). Petrology, U/Pb dating and (C-O) stable isotope constraints on the source and evolution of the adakite-related Mezcala Fe-Au skarn district, Guerrero, Mexico. *Miner. Deposita*, 39, pp. 301-312.
- López-Ramos, E., 1979, *Geología de México*. México, D.F., Tomo 2, 454 p.
- Lozano, R., Bernal, J. P. (2005). Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis. *Rev. Mex. Cienc. Geol.*, 22 (3), pp. 329-344.
- Martin, H., (1986). Effect of steeper Archaean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 14, pp. 753–756.
- Martin, H. (1999). Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids, *Lithos*, 46, pp. 411-429.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp R., Moyen, J.-F., Champion, D. (2005). An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution, *Lithos*, 79, pp. 1-24.
- McCrea, J. M. (1950). On the isotopic chemistry of carbonates and paleotemperature scale. *J. Chem. Phys.*, 18, pp. 849–857.

- Meinert, L. D. (1982). Skarn, manto and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea Mining District, Sonora, México. *Econ. Geol.*, 77, pp. 919-949.
- Meinert, L. D. (1995). Compositional variations of igneous rocks associated with skarn deposits: chemical evidence for genetic connections between petrogenesis and mineralization. In: Thompson, J. F. H. (Ed.). *Magma, Fluids, and Ore Deposits*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 23, pp. 401-419.
- Meinert, L. D. (1998). A review of skarns that contain gold in Lentz, D. R. (Ed.). *Mineralized intrusions-related skarns systems*, Short course vol. 26, Min. Assoc. Canada, pp. 359-414.
- Meinert, L. D., Dipple, G. M., Nicolescu, S. (2005). World skarn deposits. *Econ. Geol.*, 100th Anniversary, pp. 299-336.
- Mesino-Hernández, J. C. (2019). Microanálisis de elementos mayores y traza en granate por LA-ICP-MS y su uso como trazador de procedencia en rocas sedimentarias detríticas, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de maestría, 78 p.
- Mexican Gold. (2017). Las Minas, current maps. Recuperado de: <http://www.mexicangold.ca/las-minas/current-maps/> el 5 de mayo del 2019.
- Mori, L., Gómez-Tuena, A., Cai, Y., Goldstein, S. L. (2007). Effects of prolonged flat subduction on the Miocene magmatic record of the central Trans-Mexican Volcanic Belt, *Chem. Geol.*, 244, pp. 452-473.
- Mori, L., Gómez-Tuena, A., Schaaf, P., Goldstein, S. L., Pérez-Arvizu, O., Solís-Pichardo, G. (2009). Lithospheric Removal as a Trigger for Flood Basalt Magmatism in the Trans-Mexican Volcanic Belt. *J. Petrol.*, 50 (11), pp. 2157-2186.
- Mungall, J. E. (2002). Roasting the mantle: slab melting and the génesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 30, pp. 915-918.
- Ohmoto, H. (1972). Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits: *Econ. Geol.*, 67, pp. 551-578.
- Ohmoto, H., Rye, R. O. (1979). Isotope of sulfur and carbón. In: Barnes, H. L. (Ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Deposits*, John Wiley & Sons, pp. 509-567.
- Ordoñez, A. (1904). Las barrancas de las Minas y de Tatatila. *Bol. Soc. Geol. Mex.*, 1, pp. 119-133.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25 (4), pp. 956-983.
- Pérez-Cruz, J. L. (2018). Exploración geológico-minera del proyecto Las Minas, Universidad Nacional Autónoma de México. Informe de actividades profesionales, 59 p.
- Pérez-Segura, E. (2006). Estudio metalogenético de los yacimientos de Ni-Co (Cu-Zn) de la Esperanza, Sonora central: caracterización de los depósitos y relaciones con el magmatismo. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de doctorado, 197 p.

- Pinto-Linares, P. J. (2008). Geología y génesis de la mineralización económica en el distrito minero de La Paz, S. L. P., México. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de doctorado. 169 p.
- Pirajno, F. (1992). *Hydrothermal mineral deposits. Principles and fundamental concepts for the exploration geologist*. 1st edition. Springer, Berlin. 709 p.
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer, Berlin. 1250 p.
- Qiang, W., Ji-Feng, X., Ping, J., Zhi-Wei, B., Zhen-Huan, Z., Chao-Feng, L., Xiao-Lin, X., Jin-Long, M. (2006). Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *J. Petrol.*, 47 (1), pp. 119-144.
- Ramdohr, P. (1980). *The ore minerals and their intergrowths*. Pergamon Press, vol. 2, 1207 p.
- Read, J., Shoemaker, S. (2017). NI 43-101 Technical report mineral resource estimate Las Minas Gold-Copper Project. Prepared for Mexican Gold Corp. Veracruz state, Mexico. Recuperado de [http://www.mexicangold.ca/\\_resources/reports/MEX-NI-43-101\\_Technical\\_Report.pdf](http://www.mexicangold.ca/_resources/reports/MEX-NI-43-101_Technical_Report.pdf)
- Richards, J. P. (2011). Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. *Ore Geol. Rev.*, 40, pp. 1-26.
- Rye, R. E., Ohmoto, H. (1974). Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: *Econ. Geol.*, 69, pp. 826-842.
- Sajona, F. G., Maury, R. C. (1998). Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines. *C.R. Acad. Sci. Paris. Sciences de la terre et des planètes*, 326, pp. 27-34.
- Salinas-Rodríguez, J. M. y Lemus-Bustos, O. (2007). Carta geológica Minera y Geoquímica Perote, E14-B26, escala 1:50,000, estado de Veracruz, Pachuca, Hidalgo, México. SGM. Informe técnico, 156 p.
- Sarabia-Jacinto, L. O. (2017). Caracterización termo-barométrica de los fluidos mineralizantes de la mina El Dorado, del Distrito Minera de Tatatila-Las Minas, Veracruz. Universidad de Guanajuato. Tesis de licenciatura, 126 p.
- Sillitoe, R. H. (1979). Some thoughts on gold-rich porphyry copper deposits: *Miner. Deposita*, 14, pp. 161-174.
- Sillitoe, R. H. (1997). Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region: *Aust. J. Earth Sci.*, 44, pp. 373-388
- 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 (1), pp. 5-18.
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P., Bodnar, R. J. (2012). HOKIEFLINCS\_H2O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H2O-NaCl. *Computers & Geosciences*, XX, XXXX-XXXX.

- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth Sci. Rev.*, 12, pp.1-33.
- Sun, S. S., McDonough, W. E. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.). *Magmatism in the Oceanic Basins. Geol. Soc., London, Spec. Publ. 42*, pp. 313–345.
- Thiéblemont, D., Stein, G., Lescuyer, J. L. (1997). Gisements épithermaux et porphyriques: la connexion adakite. *C.R. Acad. Sci. Paris. Sciences de la terre et des planètes*, 325, pp. 103-109.
- Tornos-Arroyo, F. (1990). Los skarns y mineralizaciones asociadas del Sistema Central Español: modelo de caracterización petrológica, geoquímica y metalogenética. Universidad Complutense de Madrid. Tesis de doctorado, 408 p.
- Velasco, F., Sánchez-España, J., Boyce, A. J., Fallick, A. E., Sáez, R., Almodóvar, G. R. (1998). A new sulphur isotopic study of some Iberian Pyrite Belt deposits: evidence of a textural control on sulphur isotope composition. *Miner. Deposita*, 34, pp. 4-18.
- Vermeesch, P. (2018). IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology, *Geoscience Frontiers* (in Press).
- Viniegra, F. (1965). Geología del Macizo de Teziutlán y de la cuenca cenozoica de Veracruz. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol.* 17, pp. 7-12.
- Wilkinson, J. J. (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55, pp. 229-272.
- Wilkinson, J. J. (2013). Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs. *Nature Geosci.*, 6, pp. 917–925
- Williams, P. J., Barton, M. D., Johnson, D. A., Fontboté, Ll., Haller, A. D., Mark, G., Oliver, N. H. S., Marschik, R. (2005). Iron Oxide Copper-Gold Deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin. In: Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., Richards, J. P. (Eds.). *Econ. Geol.*, 100th Anniversary, pp. 371-405.
- Winter, J. D. (2013). *Principles of igneous and metamorphic petrology*. 2nd edition. Pearson, 729 p.
- Zheng, Y. F., Hoefs, J. (1993). Carbon and oxygen isotopic covariations in hydrothermal calcites. *Miner. Deposita*, 28 (2), pp. 79-89.
- Zúñiga-Hernández, H. A. (2010). El Gachi: un depósito de reemplazamiento de Pb, An (Ag), en el distrito de Arizpe, Sonora, México. Tesis de licenciatura. Universidad de Sonora, 109 p.
- Zürcher, L., Ruiz, J., Barton, M. D. (2001). Paragenesis, elemental distribution and stable isotopes at the Peña Colorada iron skarn, Colima, México. *Econ. Geol.*, 96, pp. 535-557.

## ANEXOS

### Anexo 1. Descripciones petrográficas: intrusivos del DMTLM.

**Muestra:** TMG1

**Localidad:** DMTLM

**Coordenadas:** N 2176551, 699173

**Color:** Gris claro

**Textura:** Fanerítica inequigranular

**Cristalinidad:** Holocristalina

**Forma:** Euhedral

**Tamaño:** 0.5 mm-2 mm

#### **Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 50%, Amp 25%, Opx>Cpx 15%,

**Accesorios:** Bt 5%, Ol 1%

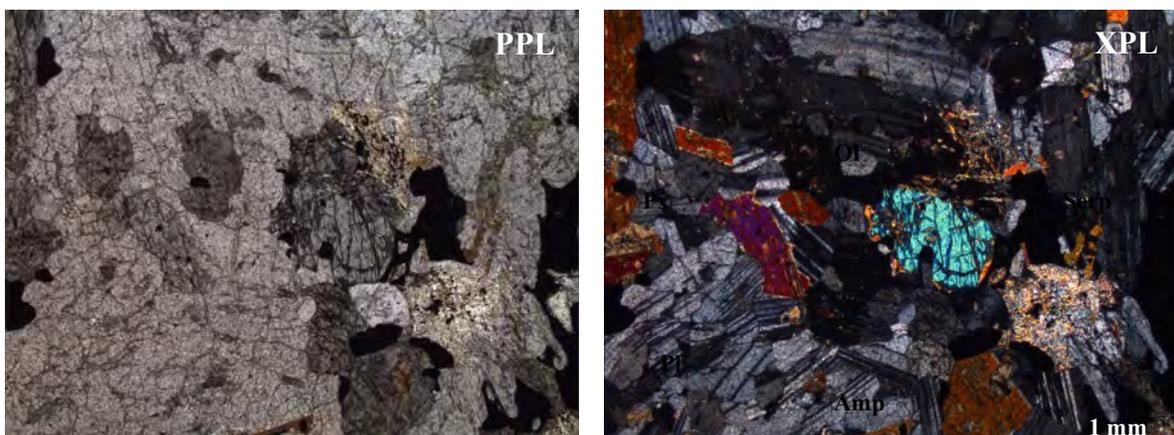
**Opacos:** Mag 3%, Ill 1%

**Alteración:** Débil: Ser, Chl, Serp

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Gabro (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Gabro fanerítico inequigranular grano medio, conformado por plagioclasa+olivino y anfíbol+piroxeno+biotita con escasos aglomerados de plagioclasa, ocasionalmente mostrando un arreglo en l dirección. Débil sericita reemplazando biotita y plagioclasa y rellenando huecos. La serpentina se observa alterando bordes de olivino y anfíbol, también se observan trazas de micas blancas. Presencia de magnetita en pseudo vetillas y de manera esporádica, con trazas de Ill.



Amp: anfíbol, Ol: olivino, Pl: plagioclasa, Px: piroxeno, Serp: serpentina.

**Muestra:** TMG2  
**Coordenadas:** N 2176474, E 698856

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-4 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 60%, Bt 12%, Amp 10%, Opx 7%

**Accesorios:** Kfs 5%, Qz 5%

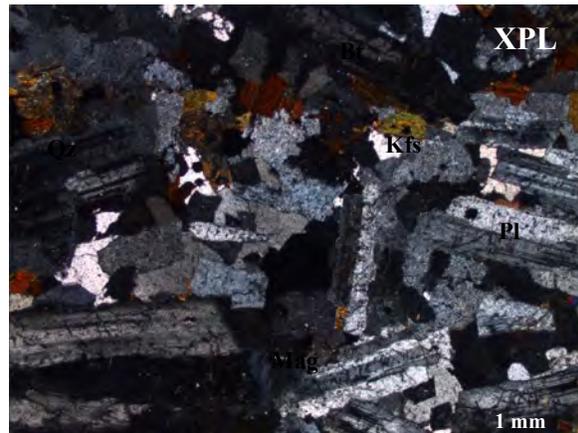
**Opacos:** Mag 2%

**Alteración:** Débil: Ser

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Diorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Diorita fanerítica inequigranular grano medio-grueso comprendida por plagioclasa+feldespato de potasio+cuarzo y biotita+anfíbol+piroxeno, ocasionales aglomerados piroxeno+biotita+anfíbol. Débil sericita reemplazando parcialmente ortopiroxenos. Se observan cristales moderadamente corroídos. Ocasionalmente el cuarzo rellena espacios entre las plagioclasas y muestra textura poiquilítica.



Bt: biotita, Kfs: feldespato de potasio, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG3  
**Coordenadas:** N 2176325, E 698516

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-4 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 50%, Qz 15%, Amp 15%, Kfs 10%, Bt 10%

**Accesorios:**

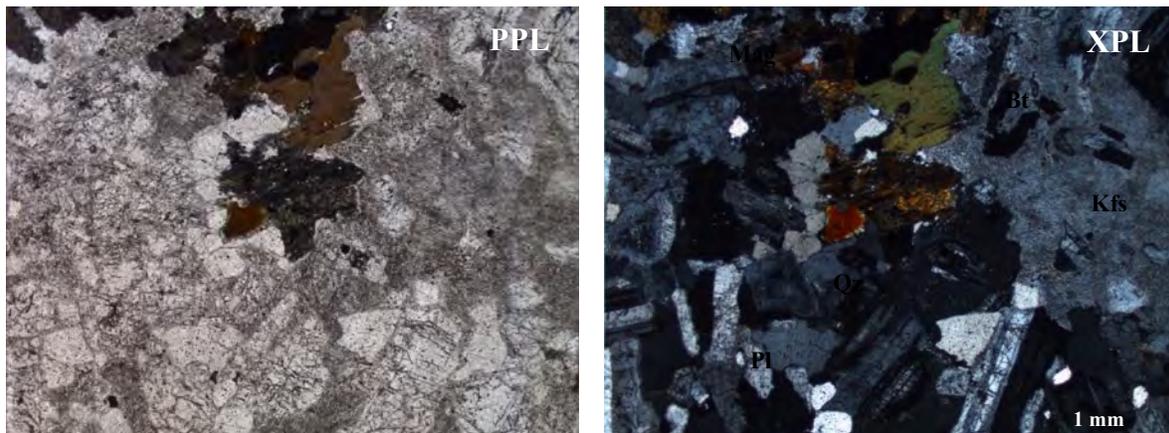
**Opacos:** Mag 3%

**Alteración:** Muy débil: Ser, Chl

**Oxidación:** Débil: Hem

**Clasificación:** Cuarzo monzodiorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Cuarzo monzodiorita inequigranular grano medio-grueso, compuesta de plagioclasa+cuarzo+feldespato de potasio y anfíbol+biotita, ocasionales aglomerados piroxeno+biotita+magnetita. Muy débil sericita en vetillas y débil clorita reemplazando parcialmente a los piroxenos. Cristales de piroxeno moderadamente corroídos. Escasos aglomerados de anfíbol y opacos. Ocasional texturas poiquilíticas, cristales de plagioclasa envueltos en feldespato de potasio.



Bt: biotita, Kfs: feldespato de potasio, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG4  
**Coordenadas:** N 2176599, E 697820

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 2 mm-4 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 55%, Kfs 20%, Qz 10%, Amp 10%, Bt 8%,

**Accesorios:** Px 1%

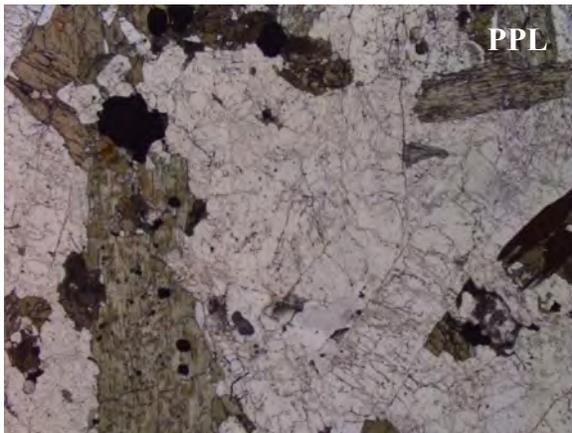
**Opacos:** Mag 3%

**Alteración:** Muy débil: Ser, Chl

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Cuarzo monzodiorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Cuarzo monzodiorita fanerítica inequigranular compuesta de plagioclasa+feldespato de potasio+cuarzo y anfíbol+biotita+piroxeno, ocasionales aglomerados biotita+magnetita, con cristales moderadamente corroídos. Muy débil sericita en plagioclasa y anfíbol y débil clorita en anfíbol. Escasa texturas poiquilíticas con cristales de feldespato de potasio albergando plagioclasas.



Amp: anfíbol, Bt: biotita, Chl: clorita, Kfs: feldespato de potasio, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG5  
**Coordenadas:** N 2176999, E 697764

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 4 mm-8 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 55%, Kfs 20%, Bt 12%, Amp 8%

**Accesorios:** Qz 5%, Opx 1%

**Opacos:** Mag 2%, Py 1%

**Alteración:** Muy débil: Ser, Chl

**Oxidación:** Débil: Hem

**Clasificación:** Monzodiorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Monzodiorita fanerítica inequigranular compuesta de plagioclasa+feldespato de potasio+cuarzo y biotita+anfíbol+ortopiroxeno, ocasionales aglomerados biotita+ortopiroxeno+magnetita. Cristales de ortopiroxeno y biotita moderadamente corroídos. El feldespato de potasio y el cuarzo rellenan espacios entre plagioclasas.



Amp: anfíbol, Ap: apatito, Bt: biotita, Kfs: feldespato de potasio, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG6  
**Coordenadas:** N 2177577, E 696871

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 2 mm-5 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

**Mineralogía:**

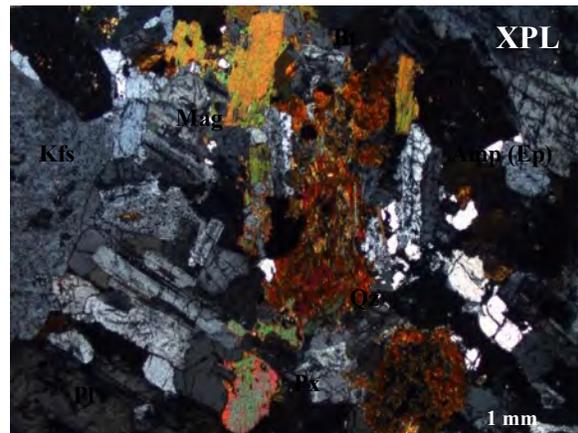
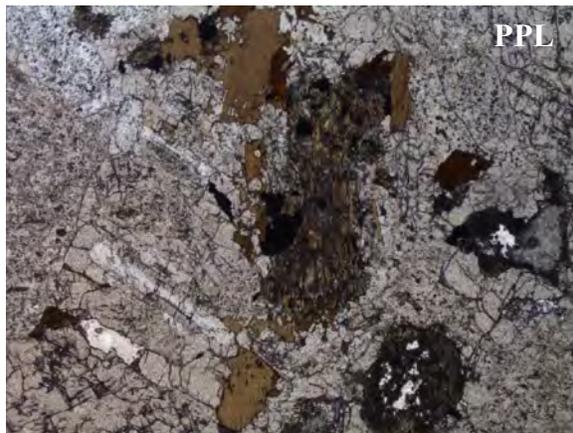
**Esenciales:** Pl 60%, Kfs 15%, Qz 10%  
**Accesorios:** Bt 5%, Amp 5%, Opx 5%, Zrn 1%  
**Opacos:** Mag 3%

**Alteración:** Muy débil: Ep, Ser

**Oxidación:** Débil: Hem

**Clasificación:** Cuarzo monzodiorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Cuarzo monzodiorita de textura fanerítica inequigranular compuesta de plagioclasa+feldespato de potasio+cuarzo y biotita+anfíbol+ortopiroxeno. El anfíbol, piroxeno y feldespato de potasio muestran moderada corrosión y son alterados selectivamente por epidota y sericita, el feldespato de potasio solo por sericita. Ocasionalmente se observan aglomerados de anfíbol+piroxeno+biotita+magnetita.



Amp: anfíbol, Bt: biotita, Ep: epidota, Kfs: feldespato de potasio, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa, Px: piroxeno, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG7  
**Coordenadas:** N 2179299, E 692733

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-2 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

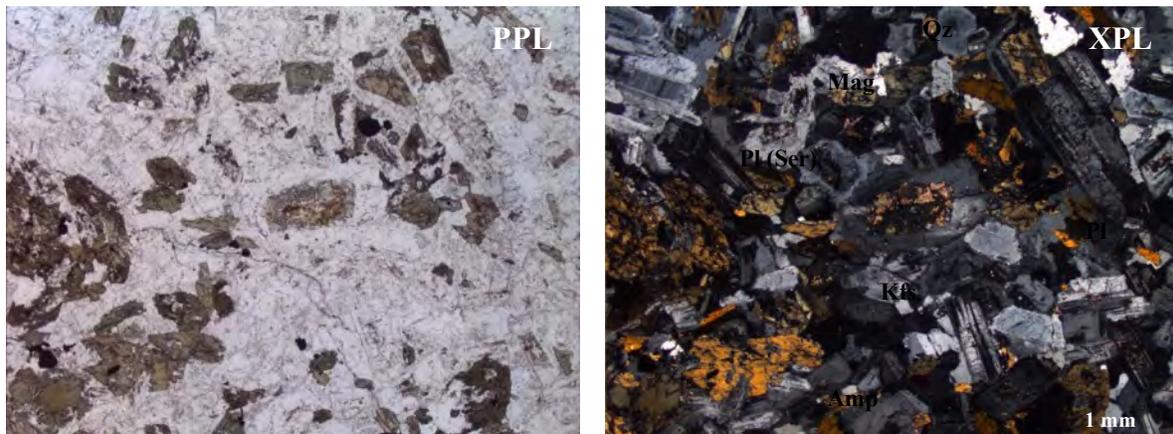
**Mineralogía:**  
**Esenciales:** Pl 60%, Amp 15%, Qz 10%  
**Accesorios:** Kfs 5%, Bt 2%, Ap 1%  
**Opacos:** Mag 1%

**Alteración:** Muy débil: Chl, Ser

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Cuarzo diorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Cuarzo diorita fanerítica inequigranular, compuesta de plagioclasa+cuarzo+feldespato de potasio y anfíbol+biotita. La plagioclasa+anfíbol muestran moderada corrosión y son alteradas débilmente a sericita. La clorita está reemplazando a la biotita y al anfíbol principalmente. Las plagioclasas muestran zoneamiento composicional y maclado tipo “tenedor”. Ocasionalmente se observan aglomerados de anfíbol+magnetita.



Amp: anfíbol, Kfs: feldespato de potasio, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo, Ser: sericita.

**Muestra:** TMG8  
**Coordenadas:** N 2179241, E 692919

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-4 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 50%, Amp 15%, Bt 10%, Opx 10%

**Accesorios:**

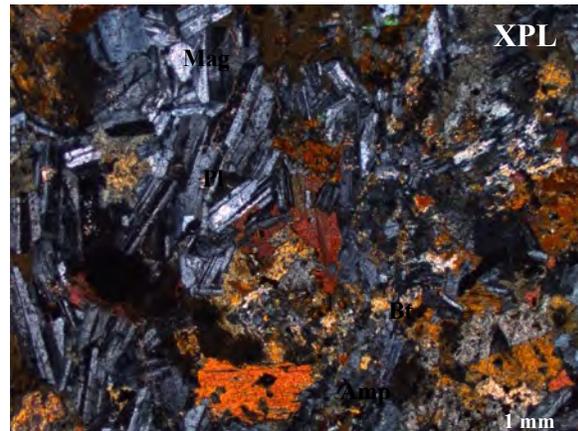
**Opacos:** Mag 1%

**Alteración:** Débil: Chl, Ser, Ep

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Diorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Diorita de textura fanerítica inequigranular, compuesta de plagioclasa y anfíbol+biotita+ortopiroxeno con escasas texturas aglomeradas y poiquiliticas (cristales de plagioclasa albergados en anfíbol) con cristales corroídos. Débil alteración de clorita, epidota y sericita selectiva, con cristales de ortopiroxeno con bordes de serpentina.



Amp: anfíbol, Bt: biotita, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa.

**Muestra:** TMG9  
**Coordenadas:** N 2178838, E 692782

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris verdoso  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-4 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

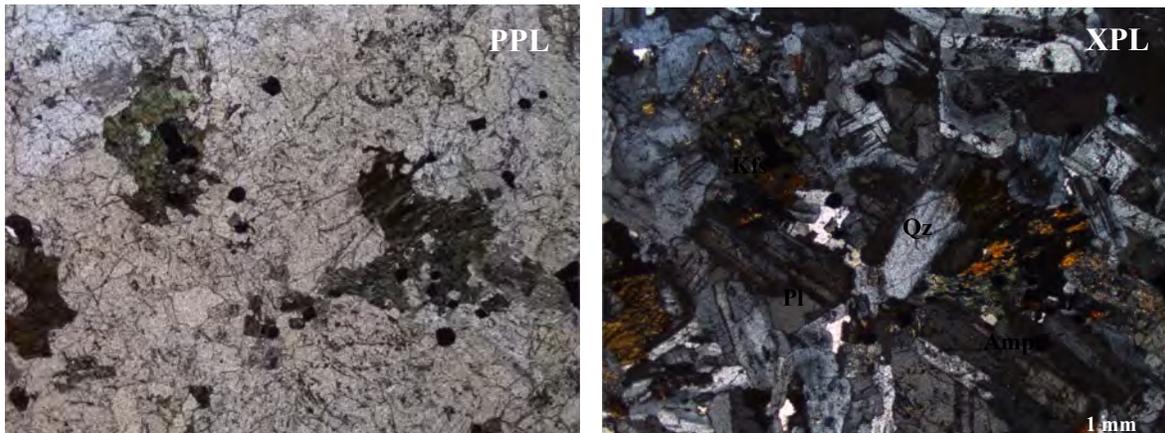
**Mineralogía:**  
**Esenciales:** Pl 60%, Amp 25%  
**Accesorios:** Bt 5%, Qz <5%  
**Opacos:** Mag 3%

**Alteración:** Muy débil: Ser, Chl, Ep

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Diorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Diorita fanerítica inequigranular, compuesta de plagioclasa+cuarzo y anfíbol+biotita, formando ocasionalmente aglomerados de plagioclasa. Cristales ligeramente corroídos. Reemplazamiento selectivo de sericita, seguida de epidota y clorita. El cuarzo crece entre los espacios de la plagioclasa.



Amp: anfíbol, Kfs: feldespato de potasio, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG10  
**Coordenadas:** N 2183672, E 701856

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-5 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

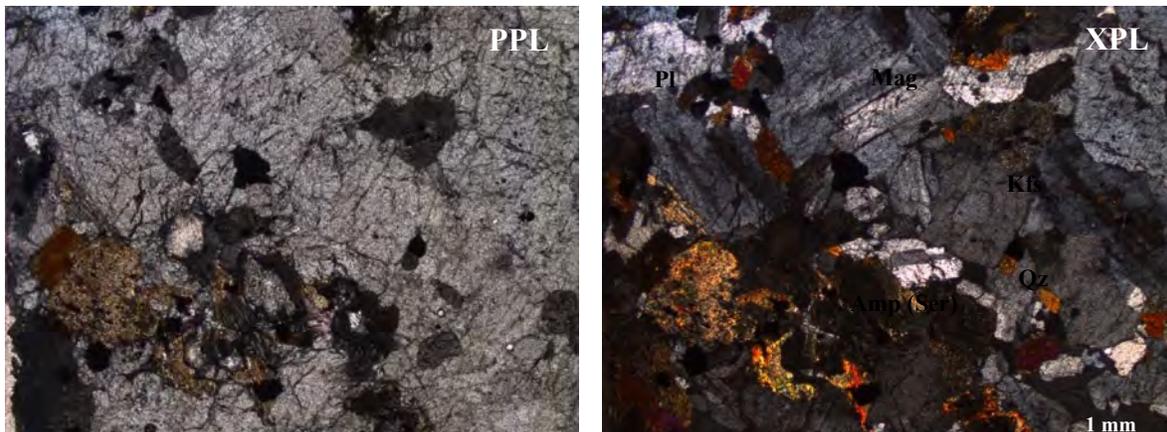
**Mineralogía:**  
**Esenciales:** Pl 55%, Amp 20%, Bt 10%  
**Accesorios:** Opx 5%, Kfs 5%, Qz <5%  
**Opacos:** Mag 2%

**Alteración:** Débil: Ser, Ep, Chl

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Diorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Diorita fanerítica inequigranular compuesta de plagioclasa+feldespato de potasio+cuarzo y anfíbol+biotita+ortopiroxeno, con minerales escasamente corroídos con débil alteración selectiva. Escasa serpentina en bordes de anfíbol.



Amp: anfíbol, Kfs: feldespato de potasio, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo, Ser: sericita.

**Muestra:** TMG11  
**Coordenadas:** N 2182995, E 701275

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-2 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 50%, Kfs 20%, Amp 10%

**Accesorios:** Bt 5%, Qz <5%

**Opacos:** Mag 2%, Py 1%

**Alteración:** Muy débil: Chl, Ser, Ep

**Oxidación:** Débil, Hem

**Clasificación:** Monzodiorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Monzodiorita fanerítica inequigranular, compuesta de plagioclasa+feldespatos de potasio+cuarzo y anfíbol+biotita con en arreglos aglomerados ocasionales (biotita+magnetita). Muestra muy débil alteración de clorita+sericita+epidota de manera selectiva.



Amp: anfíbol, Bt: biotita, Kfs: feldespatos de potasio, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG12  
**Coordenadas:** N 2183034, E 701201

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-4 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 40%, Kfs 40%, Bt 10%, Amp 10%

**Accesorios:** Qz <5%

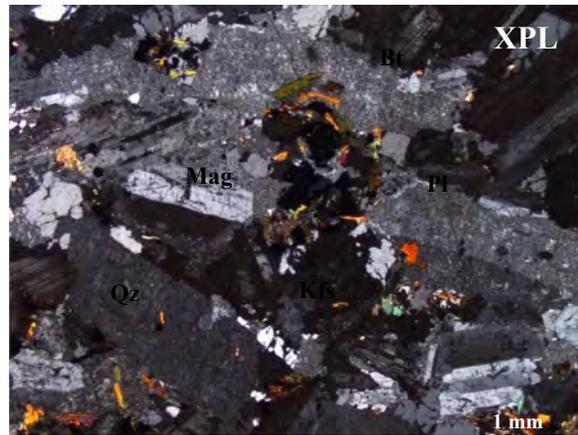
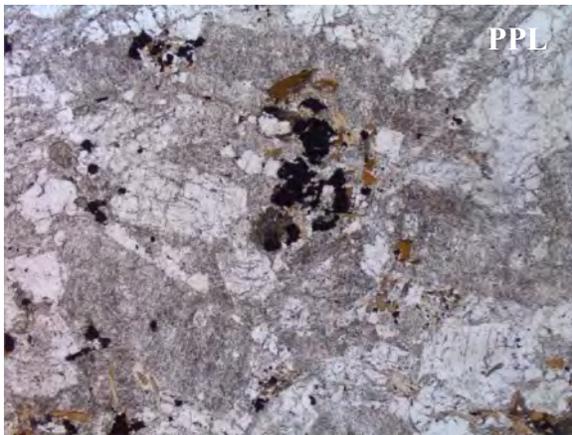
**Opacos:** Mag 2%

**Alteración:** Débil: Ser, Chl

**Oxidación:** Débil, Hem

**Clasificación:** Monzonita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Monzonita fanerítica inequigranular, compuesta de plagioclasa+feldespatos de potasio+cuarzo y biotita+anfíbol, con arreglos aglomerados de biotita+anfíbol+magnetita. Se observan cristales ligeramente corroídos y débilmente alterados. Escasos cristales de feldespato de potasio muestran intercrecimientos de plagioclasa.



Bt: biotita, Kfs: feldespato de potasio, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG13  
**Coordenadas:** N 2183290, E 700794

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris oscuro  
**Cristalinidad:** Hipocristalina  
**Tamaño:** 0.1 mm-4 mm

**Textura:** Porfídica microcristalina  
**Forma:** Subhedral

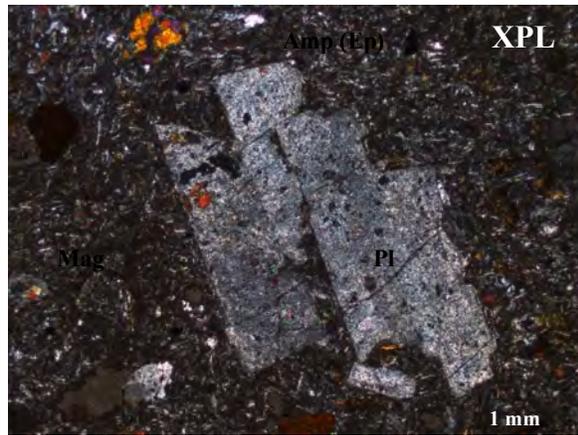
**Mineralogía:**  
**Esenciales:** Pl 60%, Qz 10%  
**Accesorios:** Amp 5%, Bt 5%  
**Opacos:** Mag 1%

**Alteración:** Débil: Ep, Chl

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Cuarzo diorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Cuarzo diorita porfídica compuesta de plagioclasa+cuarzo y anfíbol+biotita, los cuales están inmersos en matriz criptocristalina con microlitos de plagioclasa en arreglo traquítico. Los cristales se observan moderadamente corroídos y algunas plagioclasas con inclusiones de anfíbol (¿epidota?) y ocasionalmente albergando cristales de piroxeno.



Amp: anfíbol, Ep: epidota, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa.

**Muestra:** TMG14  
**Coordenadas:** N 2181985, E 699639

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris verdoso  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-2 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Kfs 40%, Pl 30%, Amp 15%, Bt 10%

**Accesorios:** Opx > Cpx < 5%, Qz < 5%, Zrn 1%

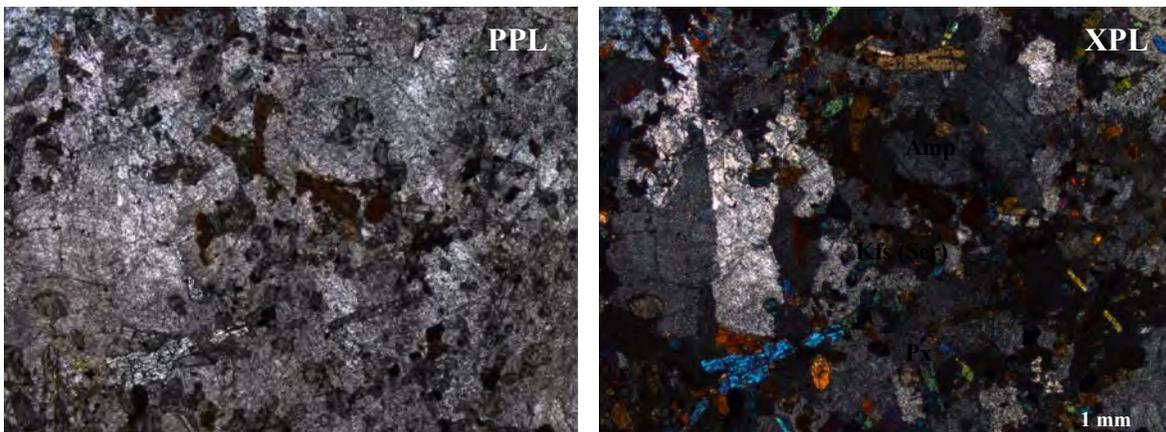
**Opacos:** Mag 3%

**Alteración:** Muy débil: Ep, Chl

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Monzonita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Monzonita fanerítica inequigranular, compuesta de feldespato de potasio+plagioclasa+cuarzo y anfíbol+biotita+piroxeno, con cristales moderadamente corroídos e inclusiones de anfíbol en cristales de feldespato de potasio (textura poiquilítica). Muy débil alteración selectiva de anfíbol y piroxeno.



Amp: anfíbol, Kfs: feldespato de potasio, Px: piroxeno, Ser: sericita.

**Muestra:** TMG15  
**Coordenadas:** N 2180926, E 699490

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris verdoso  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-2 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Kfs 50%, Pl 20%, Bt 15%, Amp 10%

**Accesorios:** Qz <5%, Zrn <1%

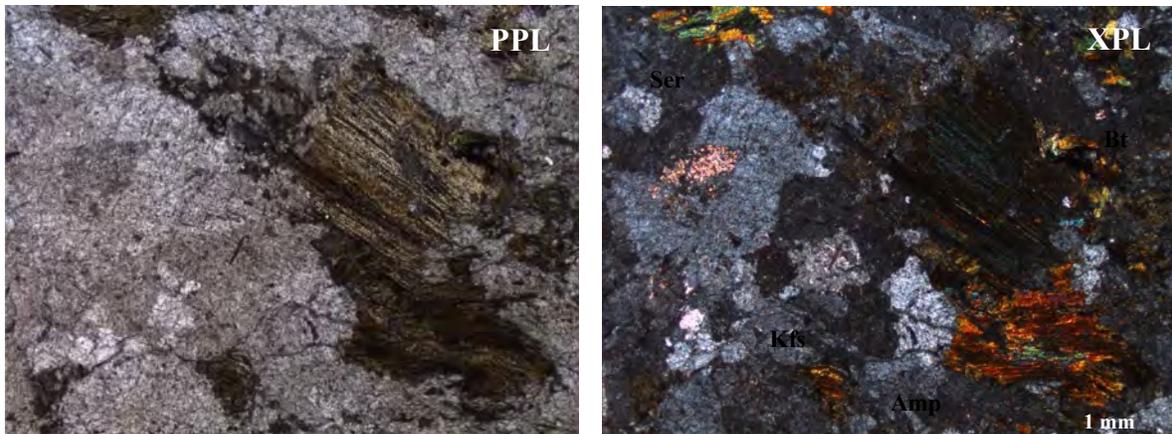
**Opacos:** Mag <1%

**Alteración:** Débil: Chl, Ser, Ep

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Sienita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Sienita fanerítica inequigranular, compuesta de feldespato de potasio+plagioclasa+cuarzo y biotita+anfíbol con cristales moderadamente corroídos. El feldespato de potasio muestra inclusiones de sericita (¿antes ferromagnesianos?).



Amp: anfíbol, Bt: biotita, Kfs: feldespato de potasio, Ser: sericita.

**Muestra:** TMG16  
**Coordenadas:** N 2181248, E 698062

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris verdoso  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-4 mm

**Textura:** Glomeroporfídica inequigranular  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 60%, Qz 15%, Kfs 10%, Bt 10%

**Accesorios:** Amp 5%, Opx 1%, Zrn <1%

**Opacos:** Ill 3%, Mag 2%

**Alteración:** Débil: Ser, Chl

**Oxidación:** Débil, Hem

**Clasificación:** Cuarzo monzodiorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Cuarzo monzodiorita glomeroporfídica, compuesta de plagioclasa+cuarzo+feldespatos de potasio y biotita+anfíbol+ortopiroxeno con cristales moderadamente corroídos. Microcristales subredondeados de plagioclasa+cuarzo+anfíbol+magnetita se encuentra rodeando los aglomerados. La sericita se observa en vetillas y reemplazando escasos cristales de anfíbol. La biotita se observa parcialmente oxidada.



Amp: anfíbol, Kfs: feldespatos de potasio, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG17  
**Coordenadas:** N 2181931, E 698283

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris verdoso  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 1 mm-4 mm

**Textura:** Glomeroporfídica inequigranular  
**Forma:** Subhedral

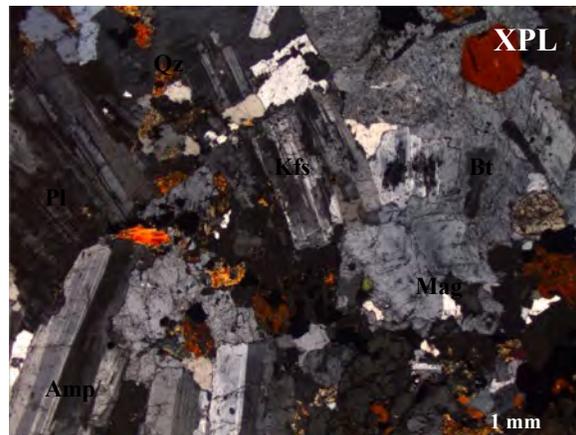
**Mineralogía:**  
**Esenciales:** Pl 55%, Kfs 10%, Amp 10%  
**Accesorios:** Bt 5%, Qz <5%, Zrn <1%  
**Opacos:** Mag 2%

**Alteración:** Muy débil: Ser, Chl

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Monzodiorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Monzodiorita fanerítica inequigranular, compuesta de plagioclasa+feldespato de potasio+cuarzo y anfíbol+biotita con cristales débilmente corroídos. Escasos aglomerados biotita+anfíbol+magnetita. El feldespato de potasio se observa rellenando espacios entre la plagioclasa. La sericita está reemplazando principalmente al anfíbol.



Amp: anfíbol, Bt: biotita, Kfs: feldespato de potasio, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG18  
**Coordenadas:** N 2182345, E 698504

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 1 mm-6 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

**Mineralogía:**  
**Esenciales:** Qz 35%, Pl 30%, Kfs 25%  
**Accesorios:** Bt 5%  
**Opacos:** Mag <1%

**Alteración:** Muy débil: Ser

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Monzogranito (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Monzogranito fanerítico inequigranular, compuesto de cuarzo+plagioclasa+feldespatos de potasio y biotita con cristales poco corroídos. La biotita se observa en parches. La sericita está reemplazando a la biotita principalmente.



Kfs: feldespatos de potasio, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG19  
**Coordenadas:** N 2179684, E 694715

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris verdoso  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-2 mm

**Textura:** Porfídica  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 60%, Amp 10%  
**Accesorios:** Bt 5%, Qz <5%, Opx 1%,  
**Opacos:** Mag 2%

**Alteración:** Débil: Ep, Chl

**Oxidación:** Débil: Hem

**Clasificación:** Diorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Diorita porfídica compuesta de plagioclasa+cuarzo y anfíbol+biotita+ortopiroxeno en matriz criptocristalina con microlitos de plagioclasa+anfíbol+magnetita. Los cristales muestran débil corrosión y débil reemplazamiento selectivo de epidota+clorita.



Amp: anfíbol, Bt: biotita, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa.

**Muestra:** TMG20  
**Coordenadas:** N 2180239, E 696828

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-4 mm

**Textura:** Glomeroporfídica  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 40%, Kfs 40%, Bt 10%, Qz 7%

**Accesorios:**

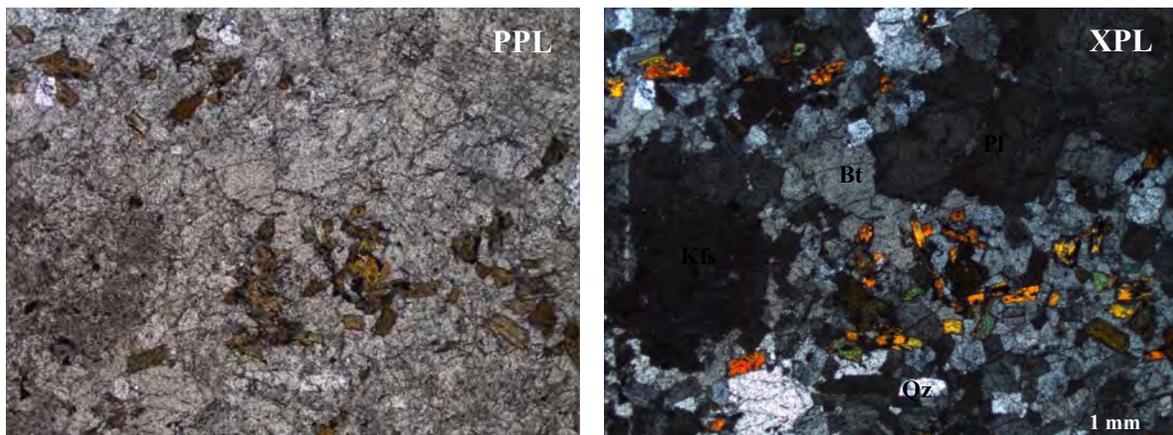
**Opacos:** Mag <1%, Ill 1%

**Alteración:** Muy débil: Chl, Ser

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Cuarzo monzonita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Cuarzo monzonita glomeroporfídica, compuesta de aglomerados de plagioclasa+feldespato de potasio+cuarzo y biotita, albergados en una matriz de grano medio de plagioclasa+feldespato de potasio+cuarzo. Cristales débilmente corroídos, con muy débil alteración selectiva. La plagioclasa muestra maclas en tenedor. El cuarzo se encuentra rellenando espacios y rodeando cristales de plagioclasa.



Bt: biotita, Kfs: feldespato de potasio, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG21  
**Coordenadas:** N 2179917, E 696325

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris verdoso  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 1 mm-2 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**  
**Esenciales:** Pl 70%,  
**Accesorios:** Amp 5%, Qz <5%, Bt 3%  
**Opacos:** Mag 5%, Ill 1%

**Alteración:** Débil: Chl, Ep, Ser

**Oxidación:** Débil: Hem

**Clasificación:** Diorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Diorita fanerítica inequigranular compuesta de plagioclasa+cuarzo y anfíbol+biotita con cristales moderadamente corroídos y con débil alteración selectiva de clorita y sericita.



Amp: anfíbol, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG22  
**Coordenadas:** N 2179384, E 695717

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-2 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Subhedral

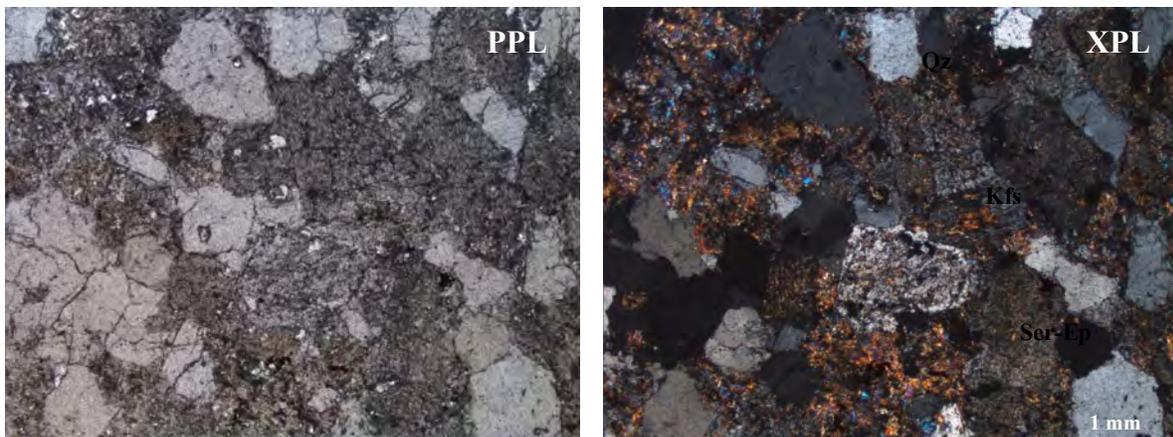
**Mineralogía:**  
**Esenciales:** Qz 40%, Kfs 30%,  
**Accesorios:** Amp <5%, Bt <5%, Pl <5%  
**Opacos:** NP

**Alteración:** Moderada: Ser, Ep

**Oxidación:** Débil: Hem

**Clasificación:** Granito (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Granito fanerítico inequigranular, compuesto de cuarzo+feldespato de potasio+plagioclasa y biotita+anfíbol con cristales moderadamente corroídos. El feldespato de potasio, la biotita y el anfíbol están moderadamente alterados a sericita y epidota.



Ep: epidota, Kfs: feldespato de potasio, Qz: cuarzo, Ser: sericita.

**Muestra:** TMG23  
**Coordenadas:** N 2177628, E 694397

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris verdoso  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 1 mm-4 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Euhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 75%, Amp 10%

**Accesorios:** Qz <5%, Phl 1%

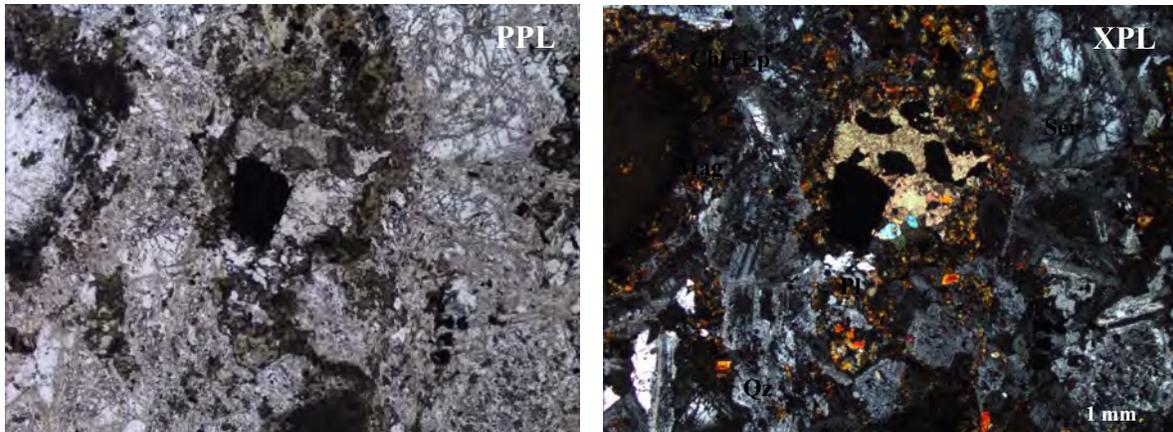
**Opacos:** Mag 3%, Py 1%, Ill 1%

**Alteración:** Moderada: Ser, Ep, Chl

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Diorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Diorita fanerítica inequigranular, compuesta de plagioclasa+cuarzo y anfíbol+micas blancas con cristales moderadamente corroídos y moderada alteración de sericita+epidota+clorita reemplazando principalmente anfíboles y plagioclasas.



Chl: clorita, Ep: epidota, Mag: magnetita, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo, Ser: sericita.

**Muestra:** TMG24  
**Coordenadas:** N 2177867, E 694207

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris verdoso  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 1 mm-4 mm

**Textura:** Fanerítica inequigranular  
**Forma:** Subhedral

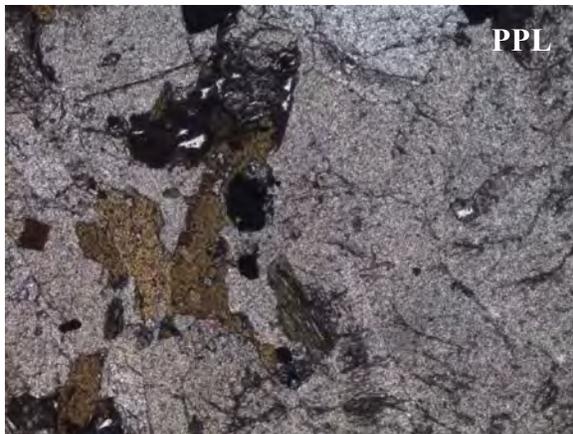
**Mineralogía:**  
**Esenciales:** Pl 65%, Amp 10%, Qz 7%  
**Accesorios:** Bt 5%, Kfs <5%  
**Opacos:** Mag 5%

**Alteración:** Muy débil: Ser

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Cuarzo diorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Cuarzo diorita fanerítica inequigranular, compuesta de plagioclasa+cuarzo+feldespato y anfíbol+biotita con cristales débilmente corroídos. La sericita está reemplazando parcialmente al anfíbol y la plagioclasa.



Bt: biotita, Kfs: feldespato de potasio, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG26  
**Coordenadas:** N 2176784, E 692818

**Localidad:** DMTLM

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Hipocristalina  
**Tamaño:** 0.1 mm-2 mm

**Textura:** Glomeroporfídica  
**Forma:** Euhedral

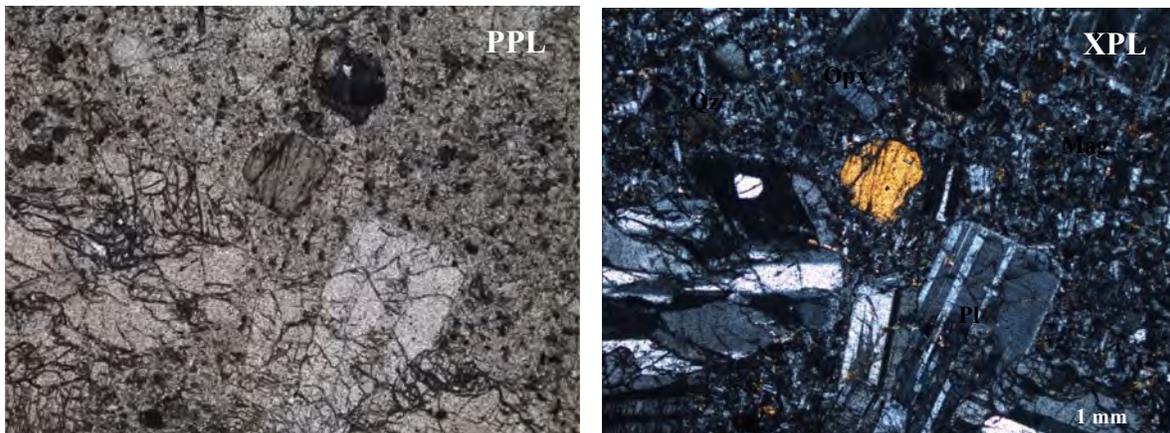
**Mineralogía:**  
**Esenciales:** Pl 80%  
**Accesorios:** Amp <5%, Opx <3%  
**Opacos:** Mag 5%

**Alteración:** Muy débil: Ser, Ep

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Diorita (Streckeisen, 1976)

**Descripción general:** Diorita glomeroporfídica, compuesta de aglomerados de plagioclasa y anfíbol+ortopiroxeno en matriz microlítica de plagioclasa+vidrio. Los cristales se observan débilmente corroídos. Muy débil reemplazamiento selectivo de sericita+epidota en cristales de anfíbol.



Mag: magnetita, Opx: ortopiroxeno, Pl: plagioclasa, Qz: cuarzo.

## Anexo 2. Geoquímica de elementos mayores: intrusivos del DMTLM.

Componente	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SUMA
Unidad	masa%	masa%	masa%	masa%	masa%	masa%	masa%	masa%	masa%	masa%	masa%
TMG-1	43.89	0.81	17.94	13.66	0.22	8.92	13.02	1.30	0.19	0.04	100
TMG-2	61.33	0.75	17.09	5.32	0.07	2.31	4.78	3.95	4.20	0.20	100
TMG-3	62.14	0.71	17.06	5.41	0.07	2.49	4.53	4.10	3.30	0.19	100
TMG-4	58.22	0.78	17.87	6.81	0.11	3.23	5.85	3.93	2.96	0.23	100
TMG-5	58.63	0.85	17.35	6.81	0.12	3.03	5.72	3.97	3.28	0.23	100
TMG-6	61.78	0.71	17.05	5.46	0.10	2.39	4.32	3.82	4.19	0.19	100
TMG-7	59.29	0.60	16.53	6.15	0.13	4.40	7.10	3.68	1.92	0.19	100
TMG-8	48.99	0.73	15.64	9.98	0.17	9.21	12.27	2.24	0.64	0.13	100
TMG-9	52.39	0.85	19.26	9.48	0.15	4.07	8.50	3.93	1.02	0.35	100
TMG-10	55.09	1.47	17.04	7.86	0.14	3.87	7.57	4.13	2.42	0.41	100
TMG-11	62.15	0.90	16.83	5.13	0.10	2.42	4.02	4.60	3.58	0.27	100
TMG-12	63.44	0.88	16.16	4.60	0.11	2.03	3.50	4.51	4.55	0.22	100
TMG-13	59.34	1.00	15.69	6.09	0.17	5.08	4.72	3.76	3.82	0.35	100
TMG-14	55.79	1.05	14.15	5.82	0.10	4.60	10.97	3.47	3.46	0.60	100
TMG-15	59.34	0.61	20.94	4.23	0.05	1.69	4.52	4.92	3.36	0.33	100
TMG-16	55.76	1.18	17.36	8.87	0.17	4.14	7.11	3.10	2.00	0.31	100
TMG-17	57.89	1.16	17.38	6.62	0.12	3.51	6.11	4.12	2.75	0.34	100
TMG-18	71.60	0.25	15.89	1.13	0.02	0.36	1.95	3.64	5.09	0.07	100
TMG-19	63.04	0.82	16.39	4.86	0.11	2.26	4.67	4.22	3.39	0.23	100
TMG-20	63.02	0.52	18.26	4.66	0.07	1.74	5.24	4.71	1.51	0.27	100
TMG-21	52.79	1.47	19.06	8.42	0.15	3.73	7.90	4.27	1.80	0.42	100
TMG-22	77.60	0.09	14.83	0.42	0.00	0.31	1.02	2.78	2.91	0.04	100
TMG-23	60.88	0.54	15.82	6.07	0.13	4.41	6.16	3.97	1.88	0.13	100
TMG-24	55.59	0.79	19.02	7.76	0.14	3.14	8.17	3.75	1.39	0.25	100
TMG-26	58.33	0.92	18.96	6.01	0.10	2.40	6.50	4.17	2.23	0.38	100

### Anexo 3. Geoquímica de elementos traza: intrusivos del DMTLM.

Componente	Li	Be	P	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Cu
Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
TMG-1	10.41	0.48	0.04	19.77	0.85	336.71	109.71	46.43	63.59	9.98
TMG-2	18.39	2.01	0.20	10.62	0.72	106.68	24.75	12.03	13.19	25.61
TMG-3	14.42	2.06	0.19	9.67	0.65	102.97	32.98	10.81	15.39	17.67
TMG-4	20.78	1.80	0.23	10.68	0.75	145.40	46.61	17.02	24.86	65.46
TMG-5	15.65	1.96	0.24	12.40	0.80	143.79	25.73	16.48	15.02	57.07
TMG-6	21.71	2.22	0.19	8.82	0.70	106.15	27.58	14.17	15.98	59.79
TMG-7	4.66	1.09	0.18	14.39	0.57	144.73	147.41	17.73	45.05	16.30
TMG-8	2.85	0.73	0.12	35.53	0.69	222.77	438.99	40.15	125.95	44.98
TMG-9	2.80	1.04	0.34	12.12	0.78	210.81	29.58	19.41	13.33	12.13
TMG-10	12.25	2.06	0.43	19.45	1.47	175.30	38.49	20.68	19.64	72.53
TMG-11	21.63	2.69	0.27	12.46	0.83	106.97	22.99	11.77	12.35	25.98
TMG-12	10.97	2.63	0.22	12.29	0.79	100.45	25.74	9.92	10.76	42.84
TMG-13	24.95	2.64	0.35	18.79	0.89	139.84	160.33	20.25	66.75	39.44
TMG-14	9.64	3.20	0.59	17.16	0.96	171.71	131.04	19.67	32.34	94.74
TMG-15	22.67	3.09	0.33	9.65	0.57	118.47	13.32	6.14	18.40	47.05
TMG-16	14.20	1.41	0.31	21.06	1.16	191.06	17.87	14.09	4.49	6.91
TMG-17	10.17	2.25	0.35	12.62	1.13	147.96	48.94	14.88	20.40	53.18
TMG-18	8.03	1.11	0.07	1.41	0.23	11.74	2.97	1.30	0.13	0.64
TMG-19	8.15	2.13	0.23	14.76	0.79	101.29	18.97	10.77	6.77	23.39
TMG-20	4.58	2.01	0.27	5.61	0.47	77.35	8.37	8.30	2.90	33.81
TMG-21	7.46	1.63	0.42	15.65	1.38	240.87	13.21	19.85	17.12	63.18
TMG-22	3.83	1.16	0.03	-0.28	0.08	6.41	2.03	-0.06	-0.53	-1.57
TMG-23	10.45	1.62	0.37	14.93	1.29	208.09	18.75	20.12	14.32	58.40
TMG-24	7.03	1.21	0.24	13.74	0.75	161.35	6.21	15.59	4.54	12.66
TMG-26	9.65	1.94	0.37	8.11	0.90	120.98	11.78	12.20	9.27	34.38

Geoquímica de elementos traza: intrusivos del DMTLM (cont.)

Componente	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Sn	Sb
Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
TMG-1	94.35	20.53	5.25	731.84	10.70	32.39	1.16	0.34	0.53	0.05
TMG-2	31.25	18.77	116.18	368.41	29.54	408.71	15.69	2.60	1.39	0.15
TMG-3	31.95	19.07	84.49	383.55	27.00	299.28	12.43	0.83	1.67	0.18
TMG-4	54.42	19.80	73.54	485.78	24.52	235.53	11.03	1.02	1.29	0.14
TMG-5	53.66	19.97	102.15	412.51	28.50	237.00	14.78	2.35	1.81	0.15
TMG-6	54.00	18.99	149.19	344.29	49.66	304.06	18.62	0.58	1.87	0.24
TMG-7	45.61	17.25	30.52	524.35	16.86	110.45	5.36	0.91	0.81	0.05
TMG-8	62.08	16.53	13.63	513.94	17.18	82.24	2.73	1.12	0.62	0.10
TMG-9	51.50	21.53	18.84	761.65	20.99	102.43	5.77	0.36	0.79	0.10
TMG-10	80.69	21.06	44.03	626.13	30.65	246.34	22.97	1.63	1.87	0.05
TMG-11	56.51	20.58	82.95	419.99	25.43	371.97	20.68	0.68	1.85	0.33
TMG-12	62.44	19.65	108.00	351.48	24.65	425.83	20.55	0.82	1.83	0.13
TMG-13	83.06	19.23	95.24	727.70	23.69	263.88	11.23	0.40	1.52	0.38
TMG-14	64.38	20.52	54.81	1124.33	34.36	413.32	17.21	1.09	2.35	0.16
TMG-15	34.44	23.15	69.27	792.45	9.84	256.89	4.19	0.27	0.56	0.13
TMG-16	89.43	20.55	59.36	496.28	36.74	159.13	10.47	0.78	1.48	0.58
TMG-17	57.11	20.62	59.19	536.61	25.91	322.84	19.02	2.85	1.55	0.36
TMG-18	20.65	14.82	79.79	338.12	8.54	168.55	5.49	0.32	0.54	0.18
TMG-19	80.37	18.99	73.33	466.29	20.39	260.61	16.56	1.14	1.19	0.18
TMG-20	30.72	20.66	36.48	845.42	17.22	149.11	8.53	0.48	1.56	0.26
TMG-21	69.19	23.00	25.03	717.80	24.29	172.85	11.56	0.89	1.12	0.12
TMG-22	11.20	12.54	79.74	55.65	7.49	70.92	10.26	0.16	0.60	0.32
TMG-23	72.76	22.34	28.14	644.22	22.53	186.92	14.65	1.77	1.24	0.62
TMG-24	62.20	20.69	31.34	563.93	21.65	20.08	5.58	1.03	0.78	0.08
TMG-26	65.37	21.60	33.51	731.53	21.16	239.47	11.07	0.67	1.14	0.08

Geoquímica de elementos traza: intrusivos del DMTLM (cont.)

Componente	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Tb	Gd	Dy
Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
TMG-1	2.63	89.31	4.81	12.29	1.59	7.69	2.11	0.67	0.33	2.19	2.00
TMG-2	5.60	692.36	28.50	59.17	7.69	29.47	6.18	1.29	0.85	5.66	4.98
TMG-3	3.78	690.67	27.28	54.61	7.20	27.38	5.72	1.30	0.79	5.22	4.58
TMG-4	3.39	628.10	29.72	59.39	7.27	26.77	5.32	1.30	0.71	4.85	4.06
TMG-5	4.02	708.86	30.30	60.74	8.04	30.67	6.41	1.39	0.87	5.80	5.00
TMG-6	8.77	735.52	32.27	56.30	8.40	32.99	7.68	1.58	1.31	8.17	8.73
TMG-7	0.29	499.87	15.34	26.95	3.50	14.34	3.09	0.93	0.45	3.01	2.68
TMG-8	2.61	205.84	10.92	21.44	2.97	13.40	3.35	1.05	0.51	3.36	3.12
TMG-9	0.49	406.33	18.82	40.09	5.24	21.26	4.60	1.37	0.63	4.34	3.77
TMG-10	2.44	689.26	35.72	77.57	10.03	39.54	8.29	2.03	1.03	7.21	5.66
TMG-11	5.09	572.79	41.44	81.94	10.48	38.18	7.29	1.48	0.86	6.14	4.54
TMG-12	4.20	701.13	40.56	82.50	10.28	37.47	7.10	1.43	0.84	5.92	4.48
TMG-13	1.07	1067.10	51.04	103.69	12.69	51.18	10.01	2.38	0.99	7.77	4.62
TMG-14	1.69	1351.37	91.44	198.89	23.31	89.81	20.16	4.18	1.77	14.79	7.46
TMG-15	6.76	796.79	8.51	16.16	2.25	9.35	1.98	0.73	0.28	1.90	1.60
TMG-16	5.26	546.99	24.49	56.34	7.66	31.59	7.22	1.66	1.07	7.03	6.63
TMG-17	2.74	723.95	37.54	74.16	9.77	37.57	7.47	1.80	0.90	6.39	4.81
TMG-18	5.67	2387.17	50.34	91.28	9.25	31.36	3.86	1.63	0.35	2.80	1.35
TMG-19	1.64	734.89	33.82	61.68	7.92	29.11	5.49	1.40	0.68	4.75	3.73
TMG-20	1.35	808.02	15.07	27.79	3.67	15.52	3.23	0.97	0.44	2.98	2.66
TMG-21	1.14	583.71	30.74	63.69	8.85	35.68	7.37	2.05	0.87	6.33	4.58
TMG-22	6.61	518.65	8.67	17.53	1.59	5.71	0.98	0.29	0.16	1.00	0.98
TMG-23	2.47	503.48	24.25	46.53	7.27	29.82	6.49	1.82	0.80	5.70	4.28
TMG-24	0.88	411.36	17.98	37.94	4.83	19.95	4.41	1.33	0.63	4.09	3.65
TMG-26	1.26	660.10	33.47	59.21	8.71	32.97	6.22	1.72	0.73	5.25	3.83

Geoquímica de elementos traza: intrusivos del DMTLM (cont.)

Componente	Ho	Er	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Th	U
Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
TMG-1	0.41	1.05	0.98	0.15	0.92	0.08	0.07	0.08	3.50	0.33	0.21
TMG-2	1.02	2.91	3.02	0.46	10.02	0.99	0.66	0.70	8.36	21.60	4.68
TMG-3	0.92	2.65	2.69	0.41	7.48	0.84	0.76	0.58	8.52	17.62	3.61
TMG-4	0.82	2.34	2.33	0.35	5.87	0.71	0.37	0.48	13.26	11.62	2.62
TMG-5	0.99	2.81	2.81	0.42	6.21	0.93	0.73	0.67	10.46	18.05	2.63
TMG-6	1.89	5.66	6.65	1.13	7.77	1.28	0.76	0.86	12.14	20.65	4.45
TMG-7	0.56	1.59	1.61	0.25	2.77	0.38	0.25	0.11	5.23	5.50	0.79
TMG-8	0.62	1.67	1.54	0.23	2.08	0.16	0.14	0.11	3.00	1.23	0.38
TMG-9	0.75	2.04	1.98	0.30	2.61	0.29	0.17	0.10	3.15	2.33	0.58
TMG-10	1.08	2.97	2.72	0.40	5.47	1.34	0.34	0.30	11.20	9.12	2.53
TMG-11	0.86	2.40	2.23	0.33	8.58	1.39	0.73	0.74	13.84	21.32	4.85
TMG-12	0.86	2.44	2.33	0.35	10.07	1.36	0.42	0.76	20.51	21.48	6.26
TMG-13	0.82	2.23	1.92	0.28	6.57	0.73	0.34	1.25	10.11	19.85	5.31
TMG-14	1.21	3.21	2.47	0.35	10.19	1.10	0.32	0.35	16.60	35.51	8.67
TMG-15	0.34	0.95	1.03	0.18	5.98	0.11	0.97	0.67	10.33	7.43	1.63
TMG-16	1.29	3.67	3.46	0.51	4.06	0.65	0.72	0.60	12.16	7.38	1.39
TMG-17	0.91	2.52	2.34	0.35	7.53	1.19	0.46	0.64	12.57	12.13	3.39
TMG-18	0.28	0.85	0.84	0.14	4.37	0.33	0.33	0.69	11.22	13.96	1.20
TMG-19	0.72	2.06	2.03	0.31	6.25	1.15	1.54	0.63	24.12	16.54	3.89
TMG-20	0.55	1.54	1.68	0.26	3.63	0.60	0.63	0.40	11.67	2.66	2.49
TMG-21	0.87	2.39	2.12	0.31	4.13	0.68	0.22	0.25	8.05	6.24	1.75
TMG-22	0.23	0.66	0.78	0.13	2.24	0.85	0.37	1.09	8.38	1.36	0.89
TMG-23	0.81	2.23	2.00	0.29	4.44	0.85	0.36	0.36	6.26	4.82	1.36
TMG-24	0.74	2.07	2.02	0.30	0.78	0.33	0.22	0.17	3.73	3.01	0.65
TMG-26	0.75	2.11	2.07	0.31	5.66	0.68	0.23	0.33	10.92	9.26	2.37

#### Anexo 4. Descripciones petrográficas: skarn del DMTLM.

**Muestra:** Santa Cruz 24F  
**Coordenadas:** N 2177125, E 694450

**Localidad:** Santa Cruz

**Color:** Verde  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 1 mm-1 cm

**Textura:** Granoblástica-inequigranular  
**Forma:** Subhedral-poligonal

#### **Mineralogía:**

**Esenciales:** Amp 40%, Fuch 30%, Grt 10%, Tur 10%

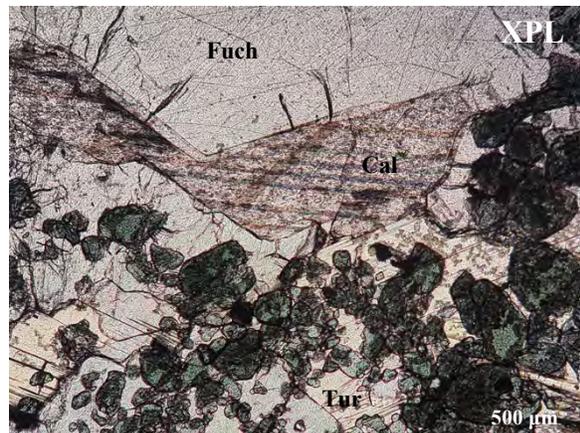
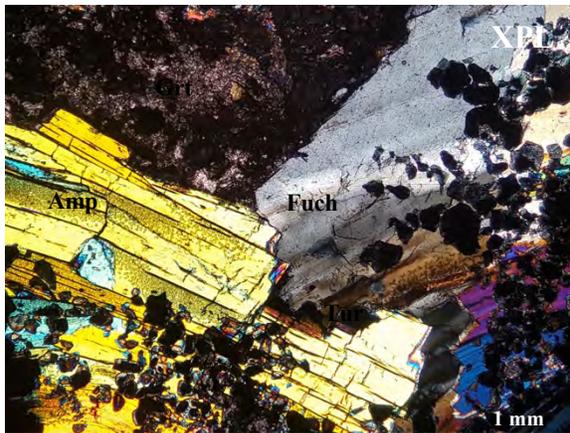
**Secundarios:** Serp 5%, Cal 5%

**Opacos:** Py 1%

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Skarn de anfíbol-granate

**Descripción general:** Cristales de granate de textura granoblástica poligonal, con reemplazamiento de anfíbol+fuchcita+calcita+pirita. Este set es reemplazado a su vez por cristales basales automorfos de turmalina. El anfíbol es reemplazado escasamente por serpentina.



Amp: anfíbol, Cal: calcita, Fuch: fuchcita, Grt: granate, Tur: turmalina.

**Muestra:** Santa Cruz 24E  
**Coordenadas:** N 2177125, E 694450

**Localidad:** Santa Cruz

**Color:** Gris verdoso  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-1 mm

**Textura:** Granoblástica-inequigranular  
**Forma:** Subhedral-poligonal

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Px 15%, Amp 15%, Cal 15%, Qz 15%, Ser 10%.

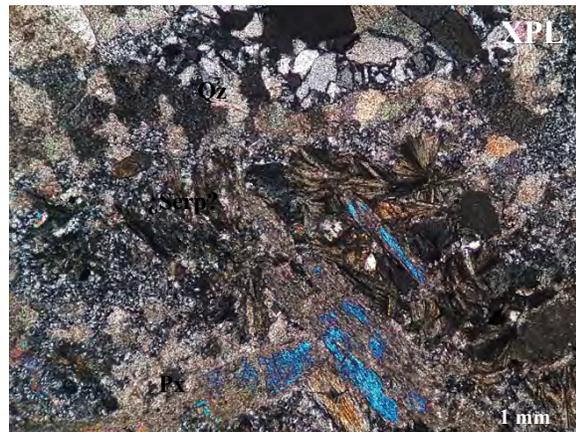
**Secundarios:** Wo 2%, Ep 2%, Ms 1%

**Opacos:** NP

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Skarn de piroxeno

**Descripción general:** Cristales de piroxeno y anfíbol de textura granoblástica inequigranular los cuales han sido reemplazados por epidota+calcita, así como cuarzo en vetillas. Escasos cristales de wollastonita creciendo aleatoriamente y microcristales de cuarzo+clorita rodeando cristales de anfíbol+piroxeno+calcita. Ocasionalmente cristales de micas blancas rellenan espacios entre cristales de Qz.



Amp: anfíbol, Cal: calcita, Chl: clorita, Ep: epidota, Px: piroxeno, Qz: cuarzo, Ser: sericita, Serp: serpentina, Wo: wollastonita.

**Muestra:** Santa Cruz A  
**Coordenadas:** N 2177125, E 694450

**Localidad:** Santa Cruz

**Color:** Gris verdoso  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-3 mm

**Textura:** Granoblástica-inequigranular  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Amp 30%, Px 25%, Grt 15%, Cal 15%

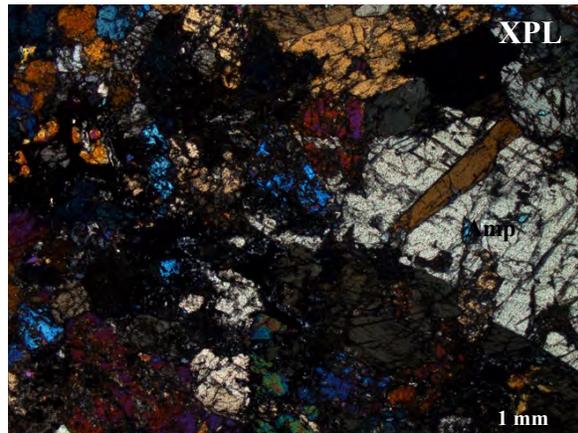
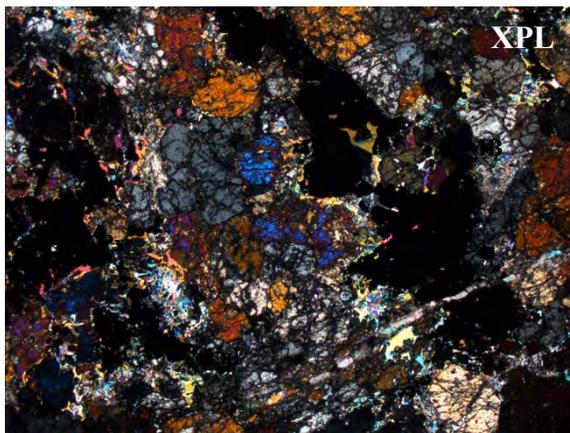
**Secundarios:** Chl 5%, MB 5%, Ser 5%

**Opacos:** NP

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Skarn de piroxeno

**Descripción general:** Cristales de piroxeno+granate albergados en anfíbol con textura poiquilítica. Muestran reemplazamiento parcial e irregular de parches clorita y vetillas de calcita y estos a su vez por micas blancas, esta última reemplaza tanto a los piroxenos (borde) como a la calcita. Al final se sobre impone sericita mediante vetillas y rellenos, asociada al fracturamiento de la roca.



Amp: anfíbol, Cal: calcita, MB: micas blancas, Px: piroxeno.

**Muestra:** Santa Cruz  
**Coordenadas:** N 2177125, E 694450

**Localidad:** Santa Cruz

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.1 mm-1 mm

**Textura:** Granoblástica-inequigranular  
**Forma:** Anhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Chl 30%, Fuch 25%, Ep 15%, Px 15%, Amp 10%

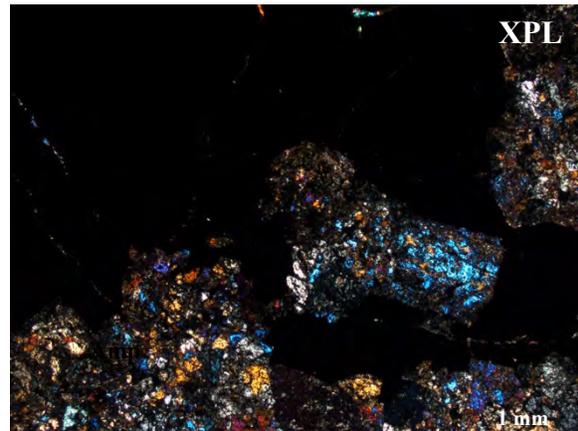
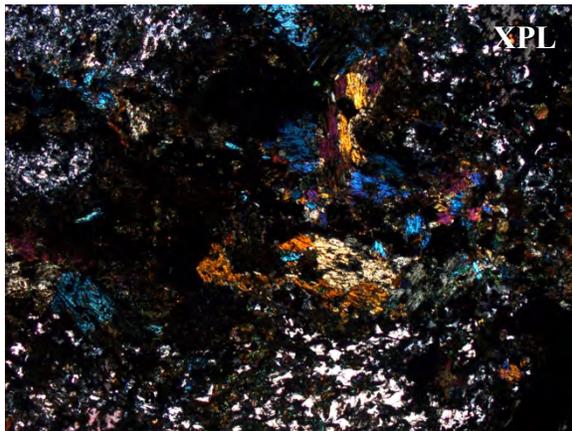
**Secundarios:** Cal 5%

**Opacos:** Py 1%

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Skarn de piroxeno

**Descripción general:** Cristales de piroxeno+anfíbol con textura granoblástica inequigranular, reemplazados parcialmente por fuchcita y estos a su vez por clorita+epidota. Al final se sobre impone reemplazamiento de calcita en parches irregulares. La pirita se observa asociada a la clorita y epidota en parches y vetillas.



Amp: anfíbol, Cal: calcita, Chl: clorita, Px: piroxeno.

**Muestra:** Santa Cruz 25B  
**Coordenadas:** N 2177125, E 694450

**Localidad:** Santa Cruz

**Color:** Gris claro  
**Cristalinidad:** Holohialina  
**Tamaño:** 0.1 mm-0.5 mm

**Textura:** Porfídica-pilotaxítica  
**Forma:** Anhedral

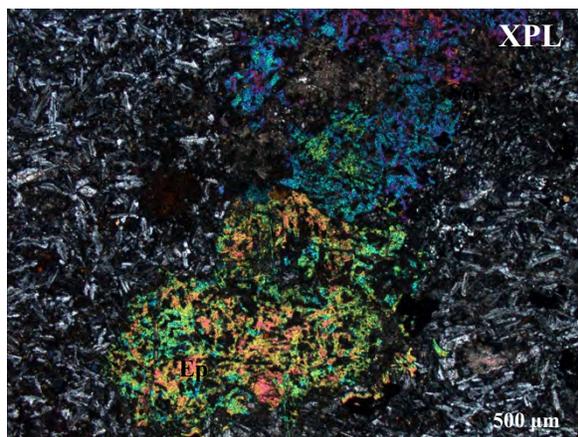
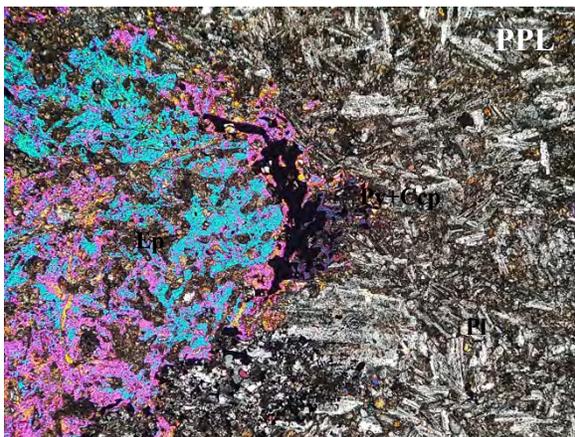
**Mineralogía:**

**Esenciales:** Pl 50%, criptocristales 40%  
**Secundarios:** Ep 3%, Ser 3%, Amp 1%, Cal 1%  
**Opacos:** Py 1%, Ccp 1%

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Endoskarn

**Descripción general:** Escasos cristales de plagioclasa dentro de una matriz criptocristalina con microlitos de plagioclasa+anfíbol en arreglo pilotaxítico. Muestra parches de epidota+sericita y escaso vetilleo de calcita asociado a pirita. Los parches muestran pirita y calcopirita en sus bordes.



Ccp: calcopirita, Ep: epidota, Pl: plagioclasa, Py: pirita, Ser: sericita.

**Muestra:** Mármol 4  
**Coordenadas:** N 2178510, E 693800

**Localidad:** 5 Señores

**Color:** Café claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 1 mm-3 mm

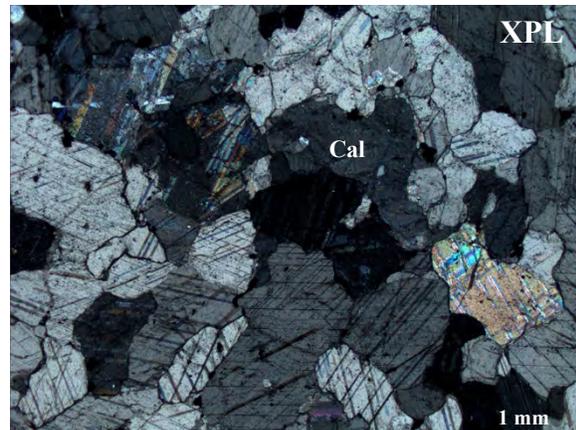
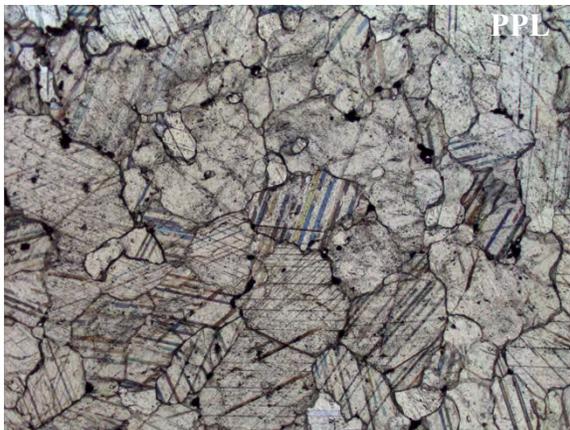
**Textura:** Granoblástica equigranular  
**Forma:** Subhedral-poligonal

**Mineralogía:**  
**Esenciales:** Cal 100%  
**Secundarios:** NP  
**Opacos:** NP

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Mármol

**Descripción general:** Calcita recristalizada de textura granoblástica poligonal.



Cal: calcita.

**Muestra:** Granates 1  
**Coordenadas:** N 2178510, E 693800

**Localidad:** 5 Señores

**Color:** Café-beige  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 1 mm-3 mm

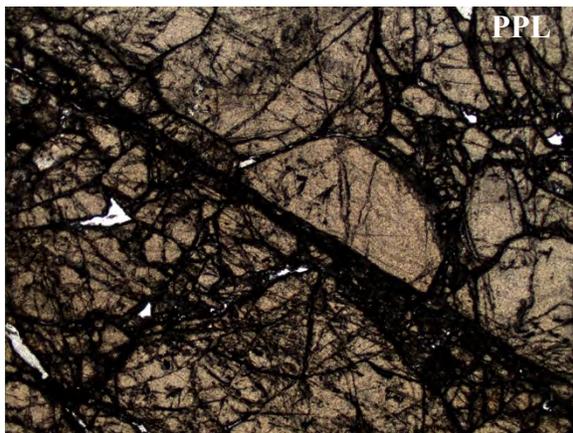
**Textura:** Granoblástica inequigranular  
**Forma:** Subhedral-poligonal

**Mineralogía:**  
**Esenciales:** Grt 90%  
**Secundarios:** Ser 5%  
**Opacos:** Py 3%, Ccp 2%

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Skarn de granate

**Descripción general:** Granate de textura granoblástica poligonal, con reemplazamiento de pirita como relleno entre los cristales de granate. La sericita se sobre impone al final y está asociada a las fracturas que cortan a los granates.



Grt: granate, Ser: sericita.

**Muestra:** TMG 23 Boquillas  
**Coordenadas:** N 2178625, E 694463

**Localidad:** Boquillas

**Color:** Café-beige  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 mm-1 mm

**Textura:** Granoblástica inequigranular  
**Forma:** Subhedral-poligonal

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Grt 70%, Qz 15%, Mag 10%

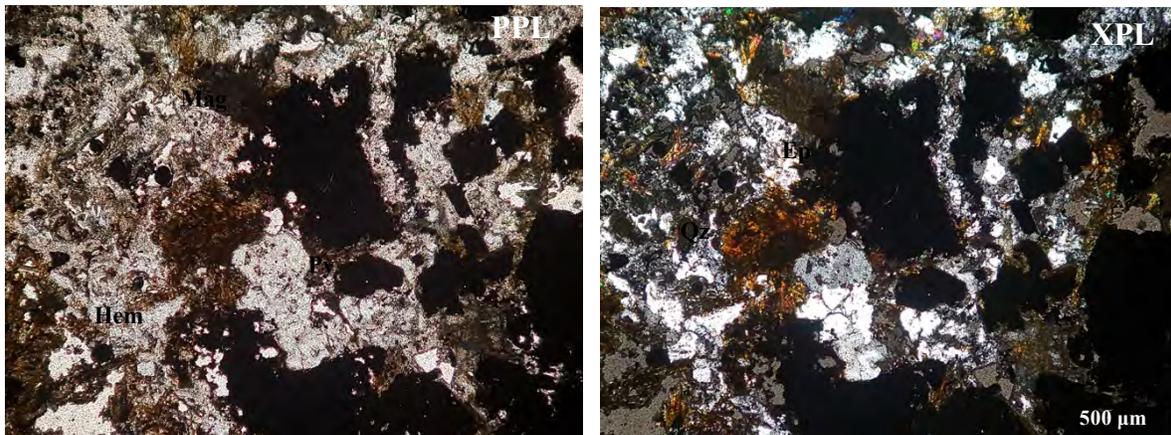
**Secundarios:** Ep 5%

**Opacos:** Py 1%, Ccp 1%

**Oxidación:** Moderada: Hematita+goethita

**Clasificación:** Exoskarn de granate

**Descripción general:** Granates de textura poligonal y magnetita de textura esquelética que varían a bandeada (parches alargados), los cuales son cortados por vetillas de cuarzo en 2 direcciones preferenciales. Se aprecian rastros de ¿anfíbol? reemplazados por hematita+goethita y epidota. Los sulfuros están asociados al cuarzo y muestran la misma dirección preferencial. La disposición en bandeamientos puede indicar un protolito de caliza.



Ep: epidota, Hem: hematita, Mag: magnetita, Py: pirita, Qz: cuarzo.

**Muestra:** 23 F Dorado  
**Coordenadas:** N 2178100, E 694450

**Localidad:** El Dorado

**Color:** Gris verdoso  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** <1 mm

**Textura:** Granoblástica inequigranular  
**Forma:** Subhedral-poligonal

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Grt 35%, Ep 20%, Cal 20%, Chl 15%,

**Secundarios:** Ser 5%, Serp 3%

**Opacos:** Ccp 3%, Py 1%

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Skarn de granate

**Descripción general:** Cristales masivos de granate de textura granoblástica con reemplazamientos de epidota+calcita+clorita+sericita en bordes y en vetillas-parches. La calcopirita+pirita están asociadas a vetillas con calcita. La serpentina se observa principalmente en bordes de los granates.



Cal: calcita, Chl: clorita, Ccp: calcopirita, Ep: epidota.

**Muestra:** 11 El Dorado  
**Coordenadas:** N 2178100, E 694450

**Localidad:** El Dorado

**Color:** Gris verdoso-rosado  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 3 mm-0.5mm

**Textura:** Granoblástica inequigranular  
**Forma:** Anhedral

**Mineralogía:**

**Esenciales:** Grt 30%, Mag 15%, Ep 15%, Cal 15%, Qz 10%,

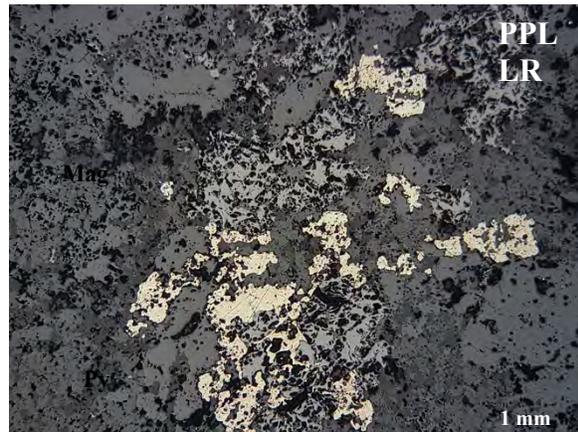
**Secundarios:** Chl 5%, Ser 3%

**Opacos:** Py 5%

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Exoskarn de granate

**Descripción general:** Granate+magnetita de textura granoblástica que varía a pseudobandeada, muestran bordes irregulares reemplazados a epidota+clorita intercrecidas en parches, así como calcita+cuarzo+pirita asociada. Al final se sobre imponen parches de sericita reemplazando al set anterior.



Cal: calcita, Ep: epidota, Grt: granate, Mag: magnetita, Py: pirita.

**Muestra:** 23 E Dorado  
**Coordenadas:** N 2178100, E 694450

**Localidad:** El Dorado

**Color:** Café-gris claro  
**Cristalinidad:** Holocristalina  
**Tamaño:** 0.5 cm-1 mm

**Textura:** Masiva  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Primarios:** Qz 50%, Pl 10% (lítico)

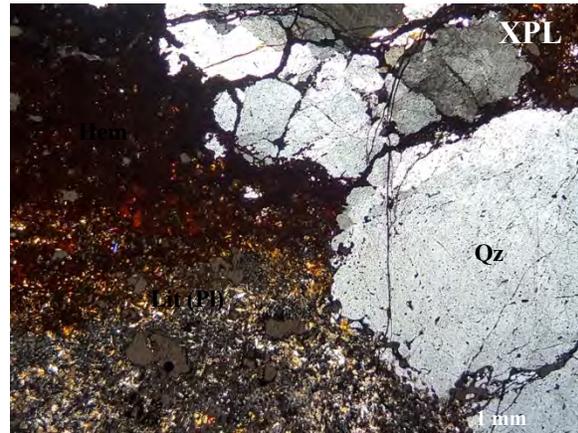
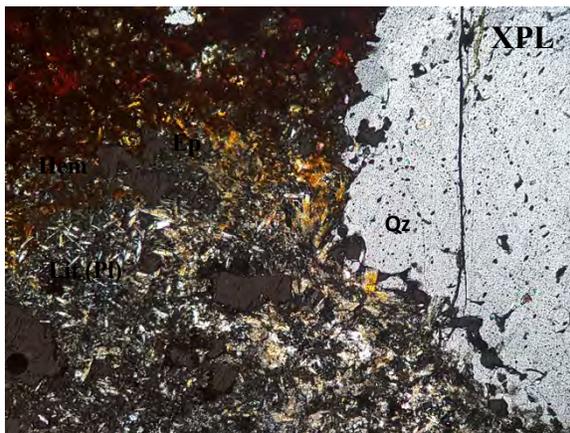
**Secundarios:** Ep 1%

**Opacos:** Hem 40%

**Oxidación:** Moderada: Hem

**Clasificación:** Endoskarn

**Descripción general:** Fragmento de intrusivo con microlitos de plagioclasa en arreglo al azar y escasos microcristales de magnetita, los cuales han sido reemplazados por hematita en su totalidad. Enseguida se emplazó una veta de cuarzo con textura en mosaico. Se observan algunos parches de epidota dentro de los fragmentos líticos.



Ep: epidota, Hem: hematita, Lit: lítico, Lit: lítico, Qz: cuarzo.

## Anexo 5. Descripciones mineragráficas: skarn del DMTLM.

**Muestra:** TMG 24 D.1  
**Coordenadas:** N 2177125, E 694450

**Localidad:** Santa Cruz

**Color:** Gris-verde oscuro  
**Tamaño:** 100  $\mu\text{m}$ -1 cm

**Textura:** Masiva-porfidoblástica  
**Forma:** Subhedral

### Mineralogía:

**Metálicos:** Mag 85%, Sp 5%, Ccp <1%

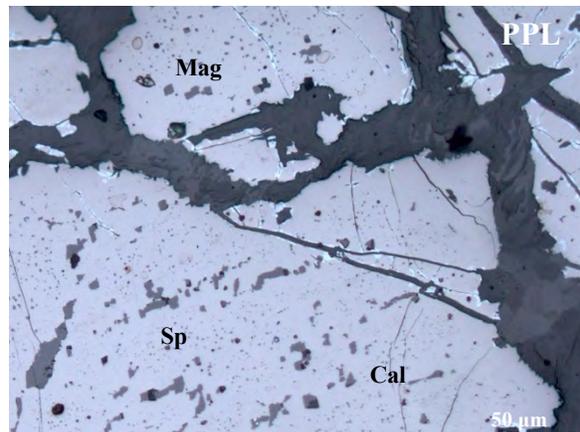
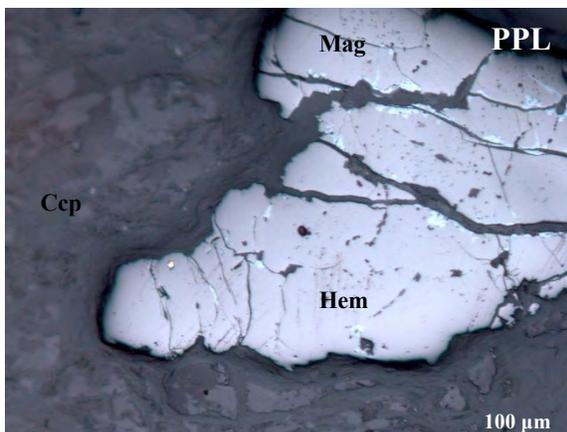
**No metálicos:** Amp 10%, Cal, 2%

**Secuencia paragenética:** Mag  $\rightarrow$  Amp  $\rightarrow$  Sp+Ccp  $\rightarrow$  Cal  $\rightarrow$  Hem

**Oxidación:** Débil, Hem

**Clasificación:** Skarn de piroxeno-anfibol

**Descripción general:** Magnetita de textura porfidoblástica rodeada de anfíbol masivo. Inclusiones de esfalerita+calcopirita dentro de magnetita. Vetillo irregular <0.5 mm de calcita que se sobre impone a toda la muestra. En los contactos entre magnetita y calcita, la magnetita se altera a hematita.



Cal: calcita, Ccp: calcopirita, Hem: hematita, Mag: magnetita, Sp: esfalerita.

**Muestra:** 24 E Santa Cruz  
**Coordenadas:** N 2177125, E 694450

**Localidad:** Santa Cruz

**Color:** Gris-verde claro  
**Tamaño:** 100 µm-1 cm

**Textura:** Masiva-granoblástica  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Metálicos:** Ccp 25%, Bn 10%, Sp 5%, Cc 2%, Cv 2%, Dg 1%

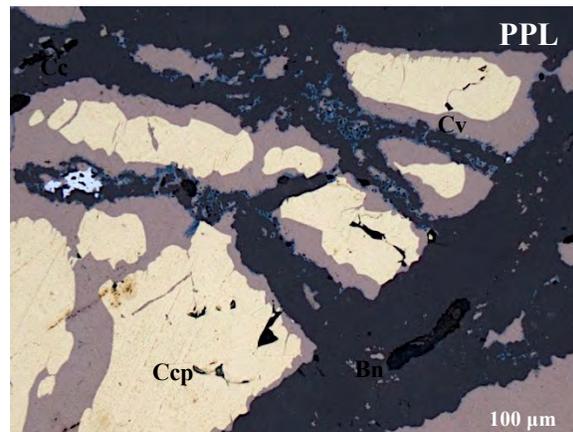
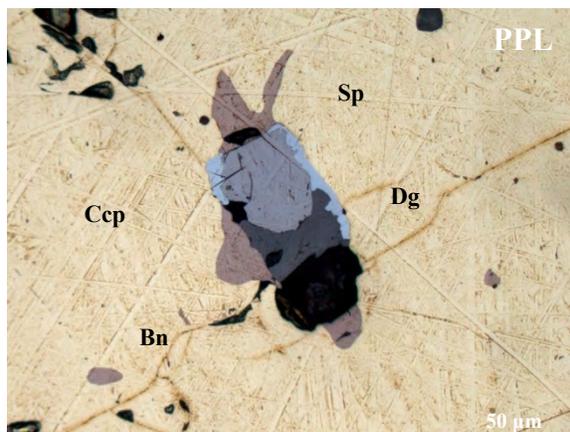
**No metálicos:** Amp 30%, Fuch 10%, Chl 5%, Ep 5%, Cal 1%, Qz 1%

**Secuencia paragenética:** Amp → Bn+Fuch+Chl+Ep+¿Cal? → Ccp → Sp → Cal (Qz) → Cc+Cv+Dg

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Skarn de anfíbol

**Descripción general:** Cristales masivos de anfíbol con reemplazamiento de clorita+epidota+calcita+bornita en textura granoblástica. La calcopirita muestra textura en flamas junto con la bornita y enseguida hay reemplazamiento puntual de esfalerita. Al final la calcita+cuarzo reemplazan toda la roca mediante vetillas irregulares <0.5 mm. Los bordes entre la ganga y los sulfuros se alteran parcialmente a calcocita, covelita y digenita.



Bn: bornita, Cc: calcocita, Ccp: calcopirita, Cv: covelita, Dg: digenita, Sp: esfalerita.

**Muestra:** 24 Sta Cruz C  
**Coordenadas:** N 2177125, E 694450

**Localidad:** Santa Cruz

**Color:** Gris oscuro  
**Tamaño:** 100 µm-0.5 cm

**Textura:** Masiva-granoblástica  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Metálicos:** 30% Mag, <5% Ccp, <1% ¿Au?, <1% Cc

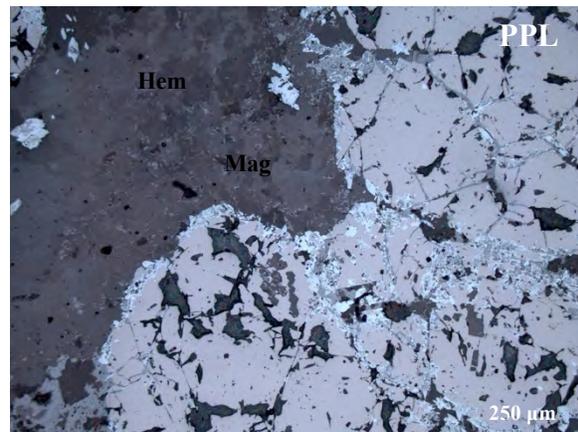
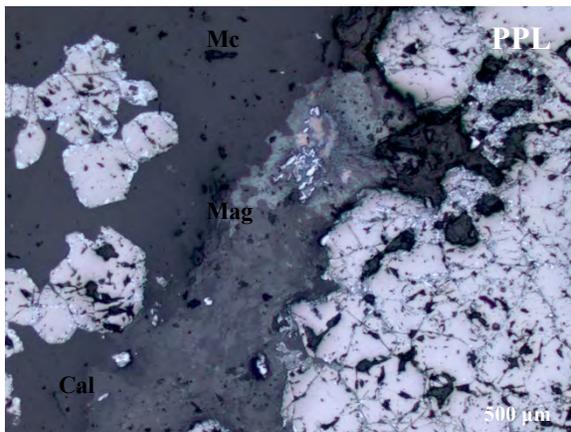
**No metálicos:** 25% Qz, 20% Amp, 15% Cal, 5% Grt, 5% Fuch

**Secuencia paragenética:** Grt → Amp+Fuch → Mag → Qz+Cal+¿Au? → Ccp → Cc → Hm+Mc

**Oxidación:** Débil, Hm

**Clasificación:** Exoskarn de piroxeno-anfibol

**Descripción general:** Cristales de granate reemplazados por anfíbol+fuchsita con textura granoblástica inequigranular-bandeada, que a su vez son reemplazados por magnetita en agregados alargados y por cuarzo+calcita masiva. Probables microcristales de Au dentro de calcita. Finalmente hay reemplazamiento puntual de calcopirita. La calcocita reemplaza a la calcopirita y la hematita reemplaza los bordes de magnetita y los contactos cuarzo+calcita con magnetita.



Cal: calcita, Hem: hematita, Mag: magnetita, Mc: malaquita, Py: pirita.

**Muestra:** 1 5 Señores Py-Cal  
**Coordenadas:** N 2178510, E 693800

**Localidad:** 5 Señores

**Color:** Amarillo  
**Tamaño:** 100 µm-0.5 cm

**Textura:** Masiva-granoblástica  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Metálicos:** Po 40%, Py 20%, Mel 15%, Ccp 10%, Sp 3%, ¿Au? <1%

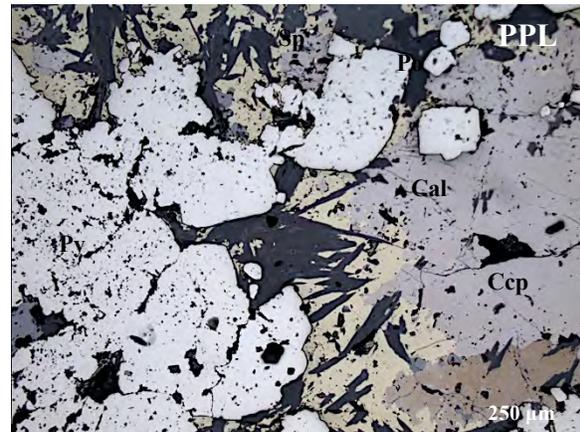
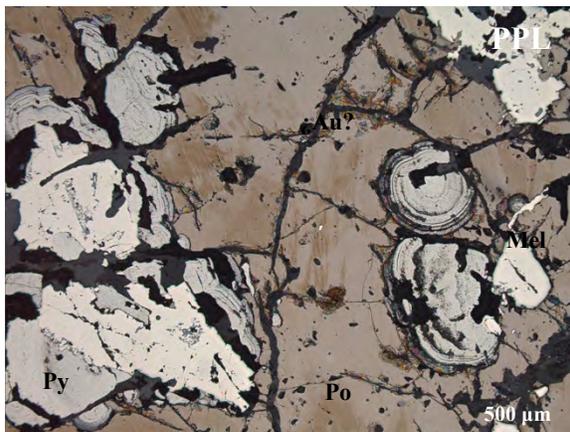
**No metálicos:** Cal 5%, Qz 5%

**Secuencia paragenética:** Po → Sp+Ccp+Cal+Qz+¿Au? → Ccp → Py+Mel → Cal

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Skarn

**Descripción general:** Pirrotita de textura masiva a granoblástica, con reemplazamientos en parches de esfalerita+calcopirita+calcita+cuarzo, con probables microcristales de Au (en pirrotita) y posteriormente exsoluciones de calcopirita locales. Finalmente, la pirita+melnikovita reemplazan de manera masiva y en parches la mineralogía preexistente con calcita+cuarzo en vetilleo irregular < 1 mm y cristales aislados.



Cal: calcita, Ccp: calcopirita, Mel: melnikovita, Py: pirita, Po: pirrotita, Sp: esfalerita.

**Muestra:** Gr 5 Señores (2)  
**Coordenadas:** N 2178510, E 693800

**Localidad:** 5 Señores

**Color:** Gris rosado  
**Tamaño:** 100 µm-1 cm

**Textura:** Masiva-granoblástica  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Metálicos:** Ccp 10%, Py 5%, Sp 5%, Cc 1%

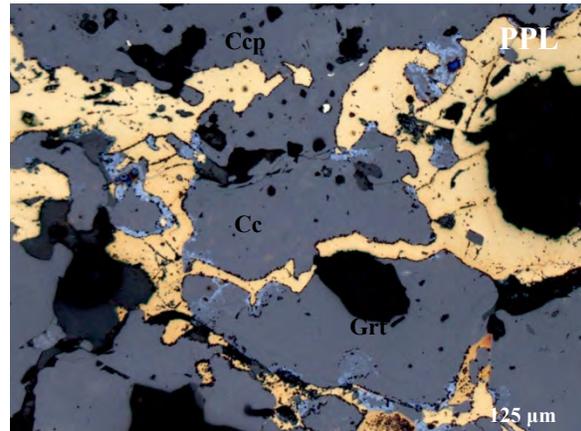
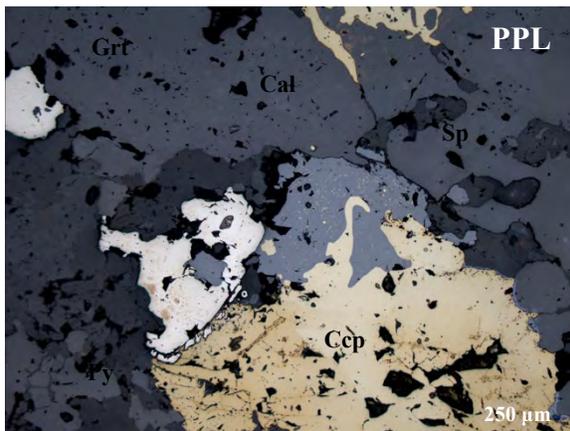
**No metálicos:** Grt 60%, Cal 3%, Ep 3%, Qz 3%

**Secuencia paragenética:** Grt → Sp → Ccp+Cal → Py+Ep+Qz → Cc

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Skarn de granate

**Descripción general:** Granate de textura granoblástica inequigranular con reemplazamiento de esfalerita y calcopirita+calcita como relleno entre los bordes de granate, posteriormente hay reemplazamiento de pirita+epidota+cuarzo. Al final la calcopirita sufre reemplazamiento de calcocita en sus bordes. Se observan exsoluciones de calcopirita.



Cal: calcita, Cc: calcocita, Ccp: calcopirita, Grt: granate, Py: pirita, Sp: esfalerita.

**Muestra:** 1303  
**Coordenadas:** N 2178625, E 694463

**Localidad:** Boquillas

**Color:** Gris oscuro  
**Tamaño:** 20  $\mu\text{m}$ -0.5 cm

**Textura:** Masiva  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Metálicos:** Mag 58%, Py 1%, Ccp 1%

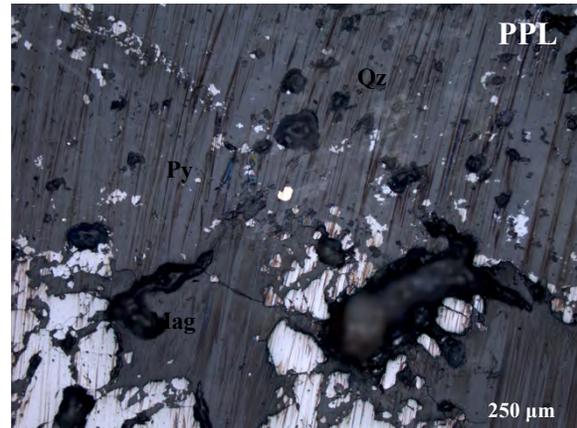
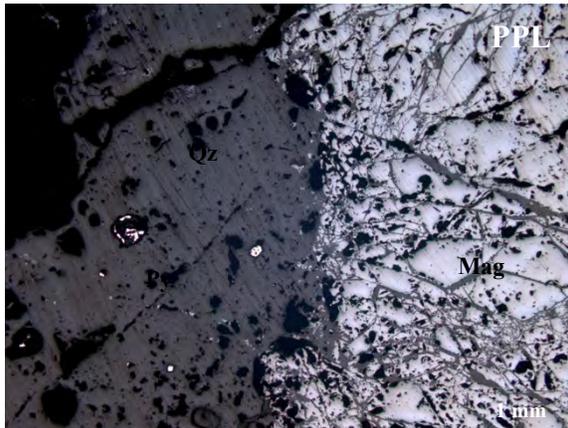
**No metálicos:** Qz 40%

**Secuencia paragenética:** Mag  $\rightarrow$  Qz  $\rightarrow$  Py/Ccp

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Skarn

**Descripción general:** Magnetita de textura masiva con reemplazamiento de cuarzo masivo y en vetillas irregulares <1 mm al contacto con la magnetita. Agregados de pirita+calcopirita en cuarzo y magnetita.



Mag: magnetita, Py: pirita, Qz: cuarzo.

**Muestra:** TMG 23 Boquillas  
**Coordenadas:** N 2178625, E 694463

**Localidad:** Boquillas

**Color:** Gris rojizo  
**Tamaño:** 100  $\mu\text{m}$ -0.5 cm

**Textura:** Masiva-granoblástica  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Metálicos:** Mag 50%, Py 10%, Ccp 5%

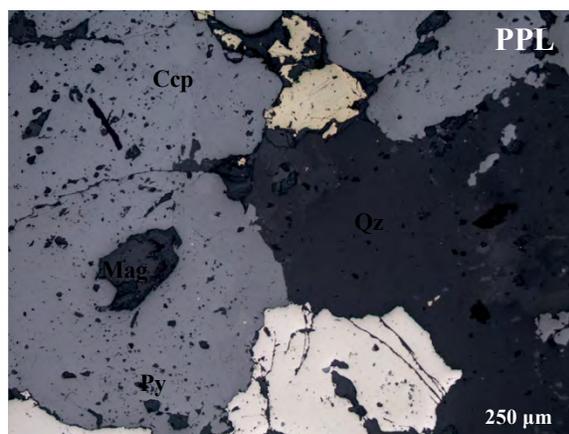
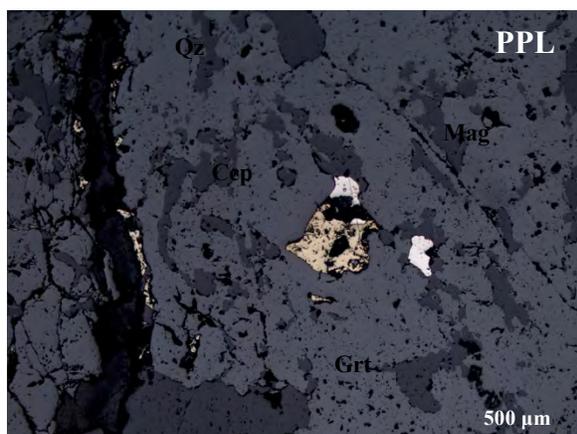
**No metálicos:** Grt 30%, Qz 3%, Cal 3%

**Secuencia paragenética:** Grt  $\rightarrow$  Mag  $\rightarrow$  Ccp<sup>1</sup>+Py<sup>1</sup>+Qz+Cal<sup>1</sup>  $\rightarrow$  Ccp<sup>2</sup>+Py<sup>2</sup>+Qz<sup>2</sup>

**Oxidación:** NP

**Clasificación:** Skarn de granate

**Descripción general:** Granate de textura granoblástica inequigranular con reemplazamiento de magnetita masiva y enseguida parches de calcopirita+pirita+cuarzo+calcita entre cristales de granate y dentro de ellos. Al final se observa una segunda generación de calcopirita+pirita en los bordes de vetillas cuarzo irregulares <1 mm que cortan la mineralogía previa.



Ccp: calcopirita, Grt: granate, Mag: magnetita, Py: pirita, Qz: cuarzo.

**Muestra:** 25 E Boquillas  
**Coordenadas:** N 2178625, E 694463

**Localidad:** Boquillas

**Color:** Gris-verde oscuro  
**Tamaño:** 100  $\mu\text{m}$ -1 mm

**Textura:** Granoblástica  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Metálicos:** Mag 50%, Py 15%, Ccp 10%, Sp 1%

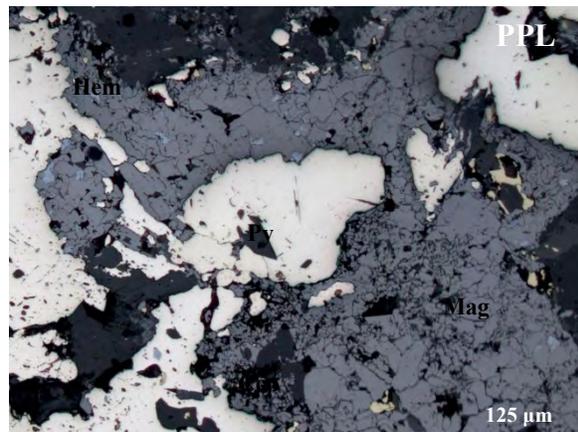
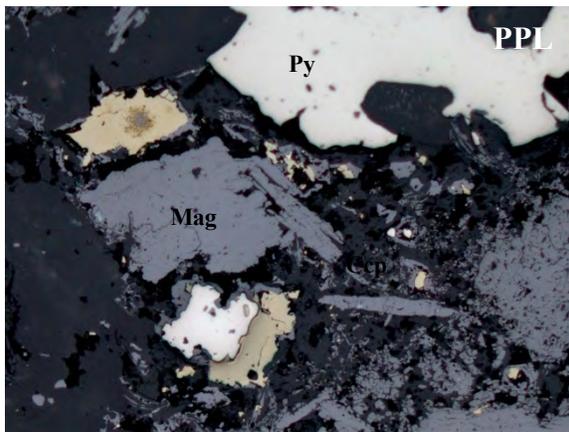
**No metálicos:** Amp 10%, Wo 5%, Qz 5%, Cal 5%

**Secuencia paragenética:** Mag<sup>1</sup>  $\rightarrow$  Amp+Wo?  $\rightarrow$  Ccp<sup>1</sup>  $\rightarrow$  Mag<sup>2</sup>  $\rightarrow$  Ccp<sup>2</sup>+Sp  $\rightarrow$  Py  $\rightarrow$  Hem  $\rightarrow$  Qz+Cal

**Oxidación:** Débil, Hem

**Clasificación:** Skarn de piroxeno-anfibol

**Descripción general:** Magnetita de textura granoblástica inequigranular con reemplazamiento de anfibol e intercrecimientos de wollastonita en hábito radial. Estos muestran reemplazamiento de calcopirita seguida de una segunda generación de magnetita y calcopirita con esfalerita asociada creciendo entre los espacios. Posteriormente la pirita corta a manera de vetillas irregulares <1 mm toda la muestra y finalmente se observa un reemplazamiento de cuarzo+calcita.



Ccp: calcopirita, Hem: hematita, Mag: magnetita, Py: pirita.

**Muestra:** 23 F Dorado  
**Coordenadas:** N 2178100, E 694450

**Localidad:** El Dorado

**Color:** Gris-verde  
**Tamaño:** 50  $\mu\text{m}$ -100  $\mu\text{m}$

**Textura:** Masiva-porfidoblástica  
**Forma:** Subhedral

**Mineralogía:**

**Metálicos:** Ccp 15%, Mag 10%, Py 5%, Sp 3%

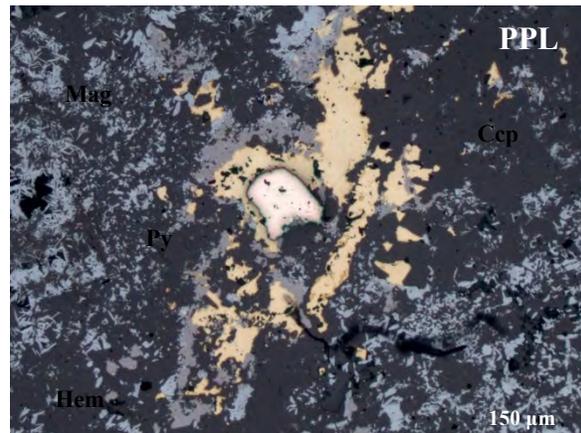
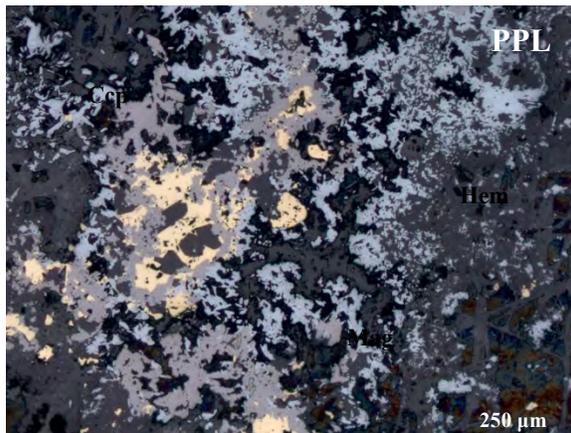
**No metálicos:** Qz 25%, Cal 25%, Grt 10%,

**Secuencia paragenética:** Grt  $\rightarrow$  Ccp  $\rightarrow$  Qz  $\rightarrow$  Mag  $\rightarrow$  Sp<sup>1</sup>  $\rightarrow$  Py  $\rightarrow$  Sp<sup>2</sup>  $\rightarrow$  Qz<sup>2</sup>+Cal  $\rightarrow$  Hm

**Oxidación:** Débil, Hem

**Clasificación:** Skarn de granate

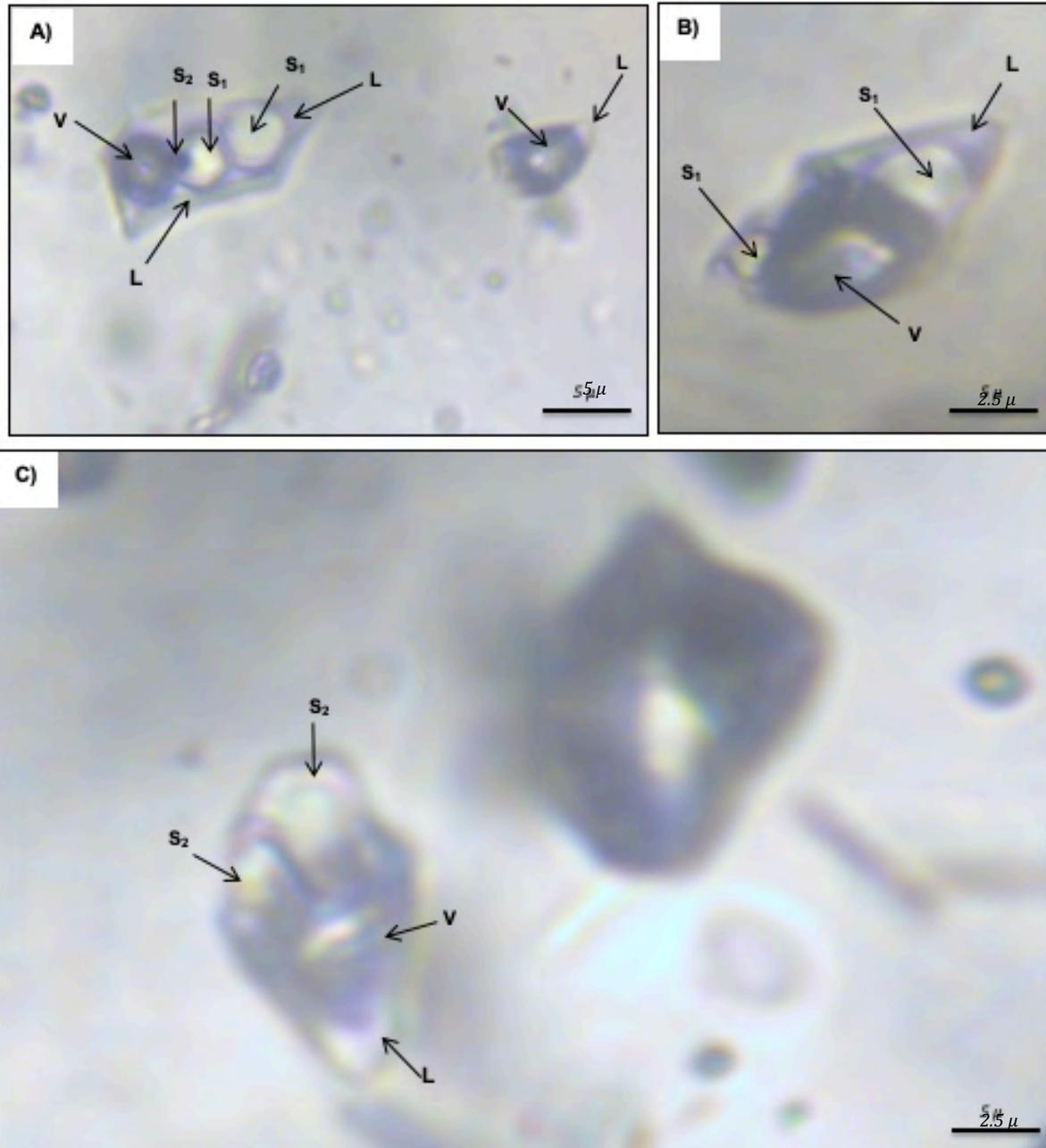
**Descripción general:** Granate de textura masiva que varía a porfidoblástica con vetillas irregulares <0.5 mm y parches de calcopirita, seguida de cuarzo, magnetita, esfalerita y pirita. Le sigue una segunda generación de reemplazamientos irregulares de esfalerita y cuarzo+calcita. Al final se observa reemplazamiento de magnetita por hematita.



Ccp: calcopirita, Hem: hematita, Mag: magnetita, Py: pirita.

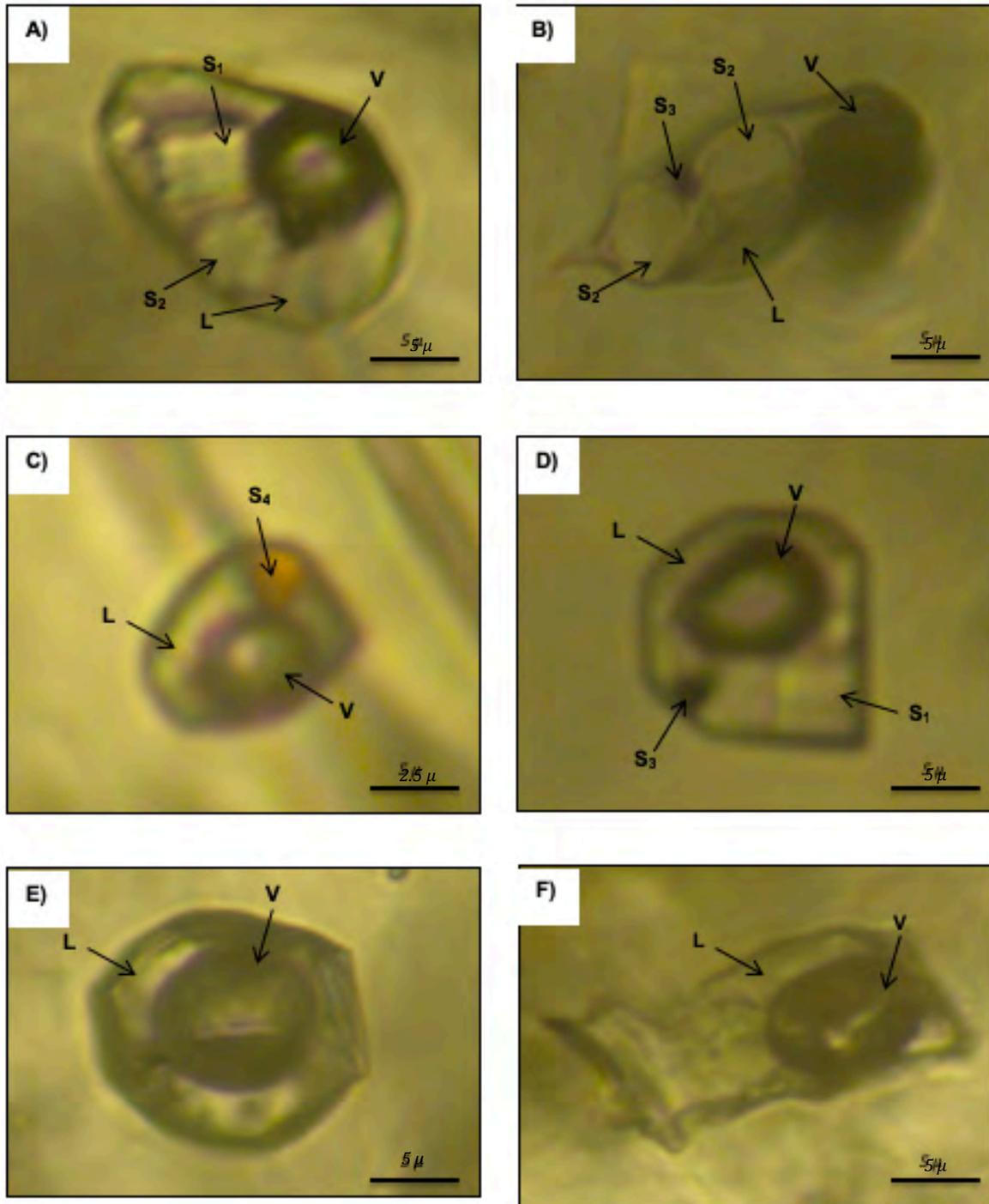
Anexo 6. Petrografía de IF de la zona de Santa Cruz.

Muestra SC-24a



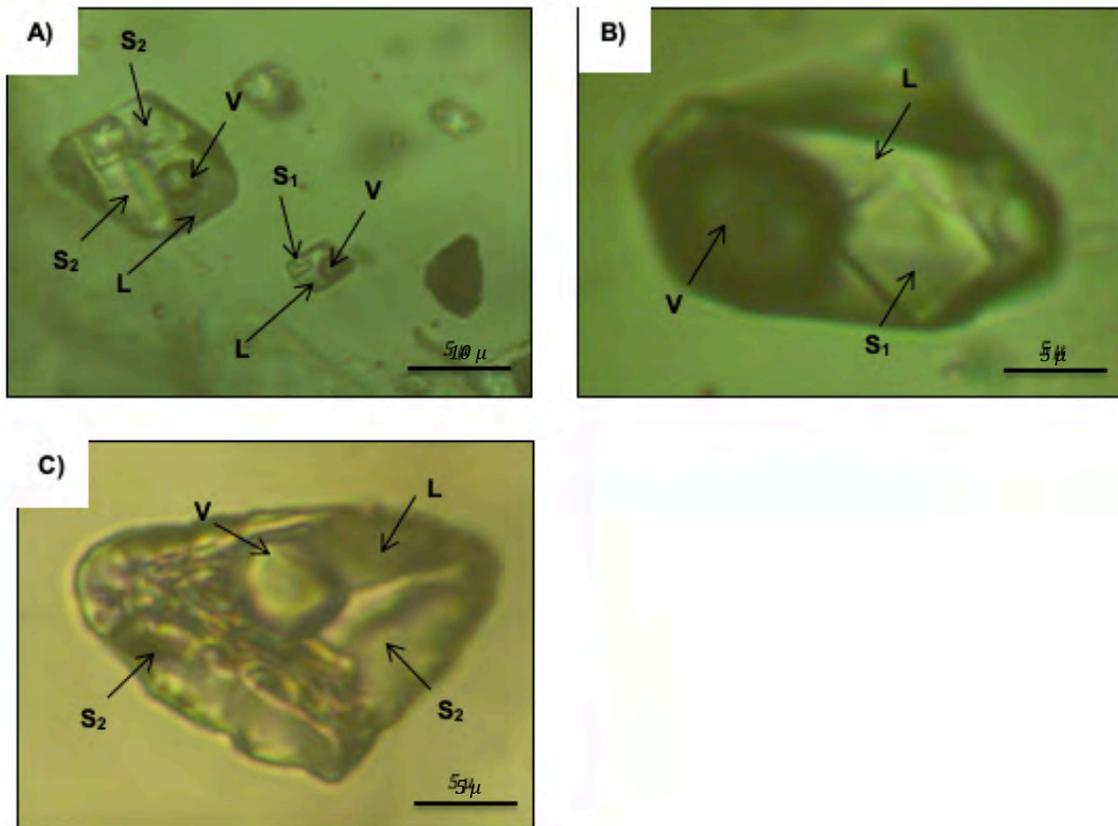
A), B) y C) Inclusiones fluidas multifásicas albergadas en cuarzo sólido dominante: vapor (V) - líquido (L) - sal de diferente composición (S<sub>1</sub>) - mineral opaco (S<sub>2</sub>). Resultados promedio obtenidos: Th°C 343.8; Tf°C 381.6; Salinidad (% peso Eq. NaCl) 47.13.

## Muestra SC-24a



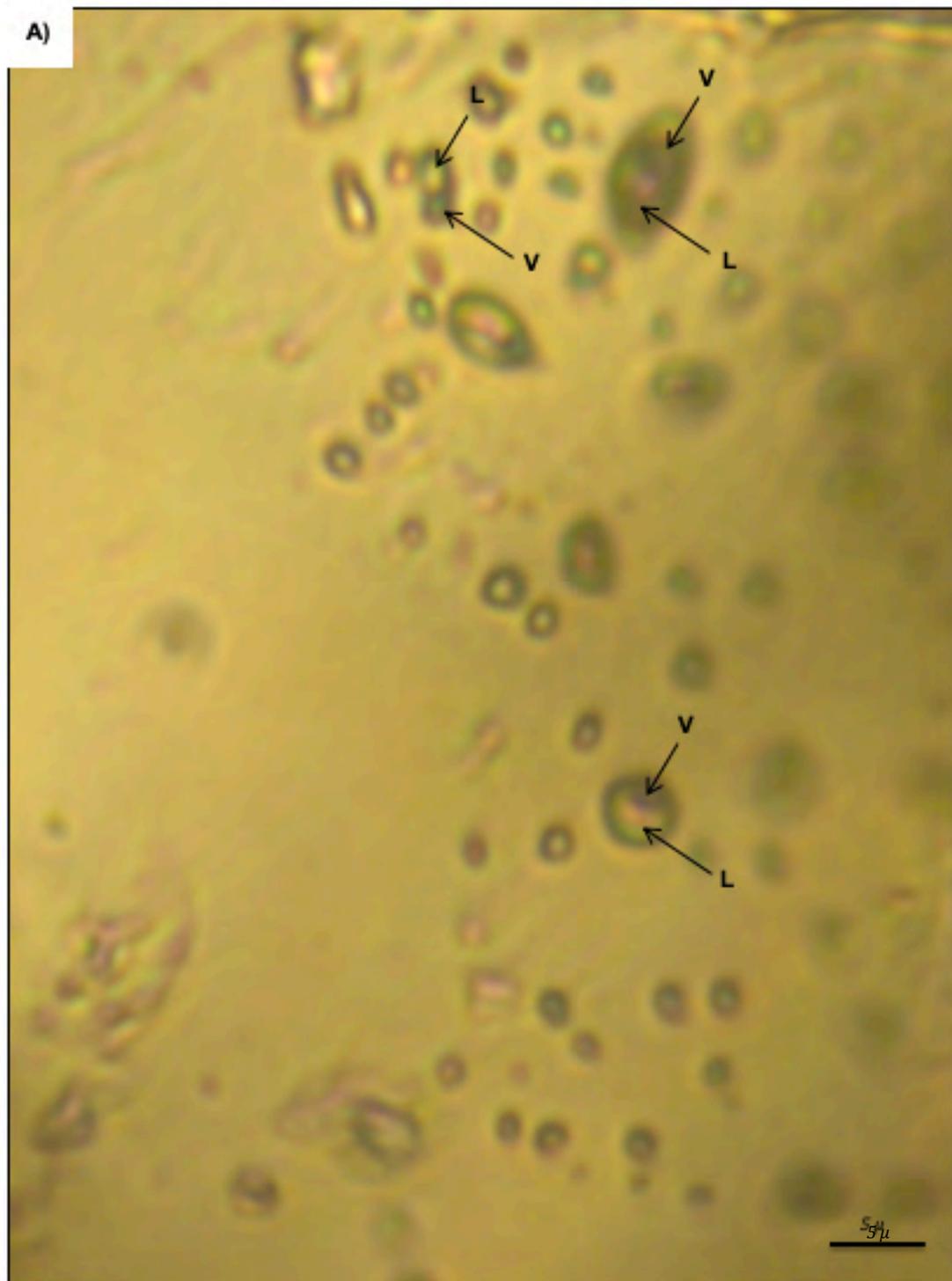
A), B), C) y D) Inclusiones fluidas multifásicas en anfíbol con sólido dominante que varía a vapor dominante: vapor (V) - líquido (L) - cubo de sal (S<sub>1</sub>) - cubo de sal de diferente composición (S<sub>2</sub>) - mineral opaco (S<sub>3</sub>) - hematita (S<sub>4</sub>). E) y F) se muestran inclusiones fluidas bifásicas sólido dominante: vapor (V) - líquido (L). Resultados promedio obtenidos: Th°C 524.68; Tf°C 423.68; Salinidad (% peso Eq. NaCl) 51.77.

## Muestra SC-23a



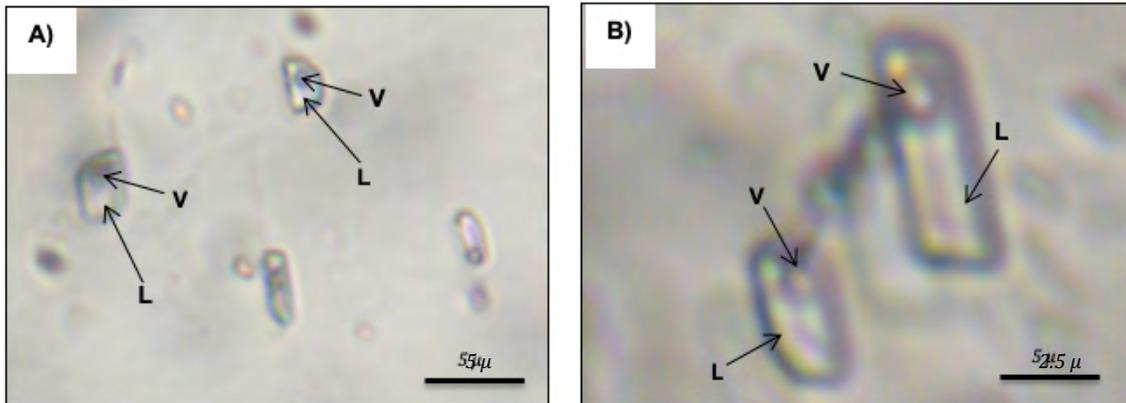
A), B) y C) Inclusiones fluidas trifásicas en fuchsite sólido dominante que varía a vapor dominante: vapor (V) - líquido (L) - cubo de sal (S<sub>1</sub>). Las muestras A) y C) se observa formando hidrolita + hielo (S<sub>2</sub>) a -90 °C la cual se va derritiendo paulatinamente. Resultados promedio obtenidos: Th°C 497.2; Tf°C -8.8; Salinidad (% peso Eq. NaCl) 12.6.

## Muestra SC-24d



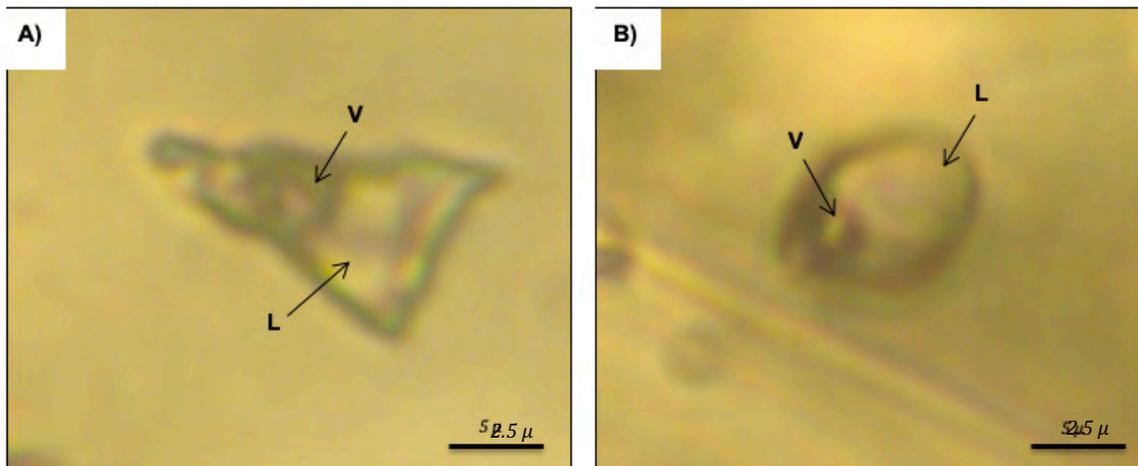
A) Inclusiones fluidas bifásicas en cristales de calcita líquido dominante: vapor (V) - líquido (L). Resultados promedio obtenidos: Th°C 202.14; Tf°C -6.8; Salinidad (% peso Eq. NaCl) 10.16.

### Muestra SC-24



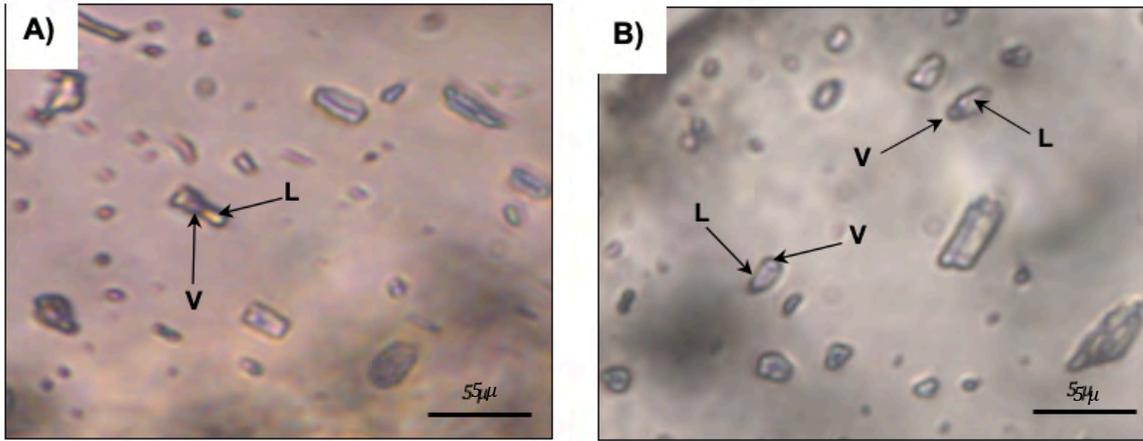
A) y B) Inclusiones fluidas bifásicas en calcita líquido dominante: vapor (V) - líquido (L). Resultados promedio obtenidos: Th°C 226.25; Tf°C 64.41; Salinidad (% peso Eq. NaCl) 21.66.

### Muestra SC-25a



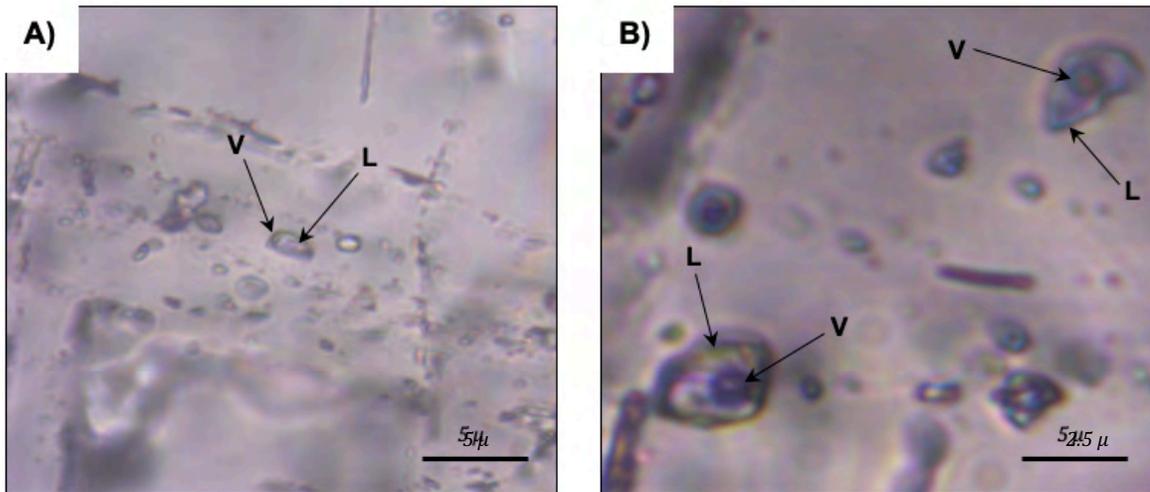
A) y B) Inclusiones fluidas bifásicas en calcita con líquido dominante: vapor (V) - líquido (L). Resultados promedio obtenidos: Th°C 238.9; Tf°C 2.71; Salinidad (% peso Eq. NaCl) 12.67.

## Muestra SC-02



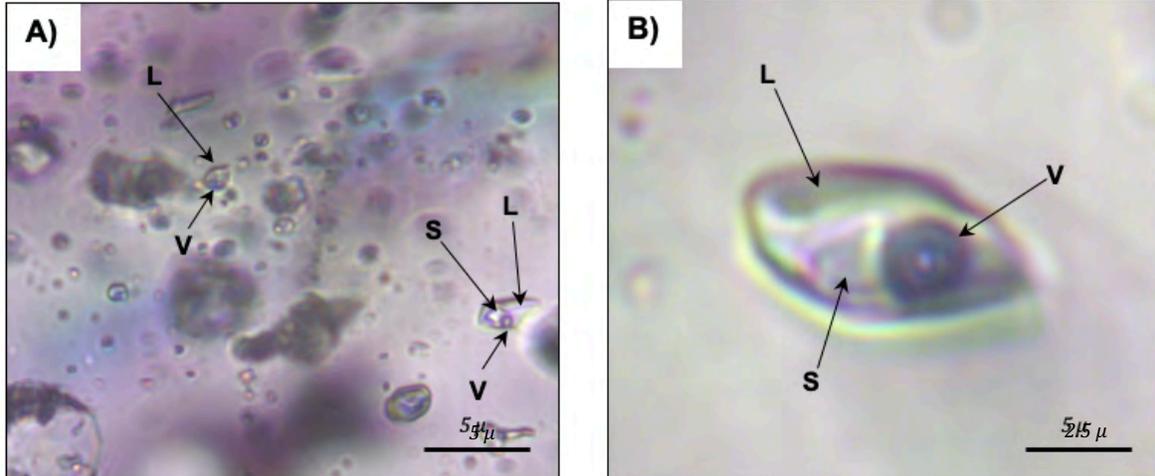
A) y B) Inclusiones fluidas bifásicas en granate con líquido dominante: vapor (V) + líquido (L). Resultados promedio obtenidos: Th°C 427.625; Tf°C 4.5; Salinidad (% peso Eq. NaCl) 10.

## Muestra SC-04



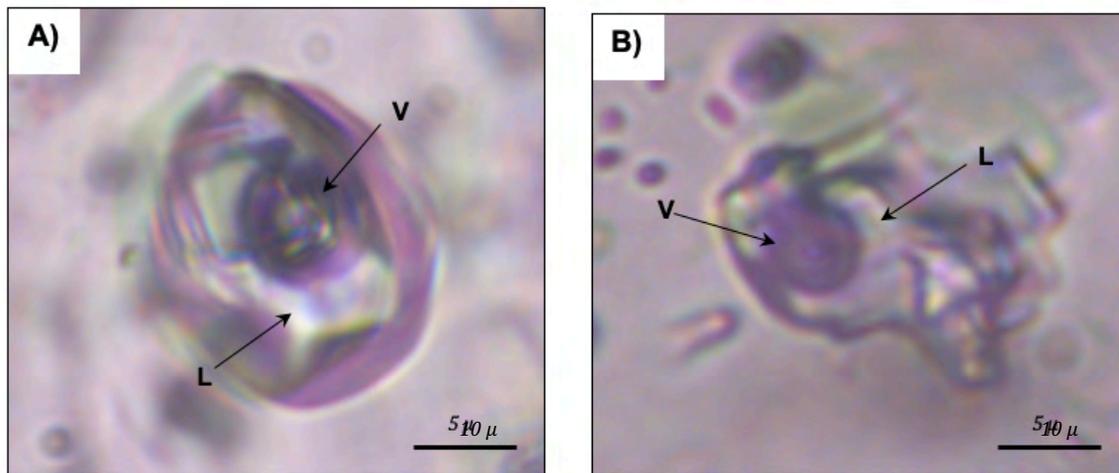
A) y B) Inclusiones fluidas bifásicas en calcita líquido dominante: vapor (V) + líquido (L). Resultados promedio obtenidos: Th°C 207.15; Tf°C -5; Salinidad (% peso Eq. NaCl) 7.8.

### Muestra SC-05



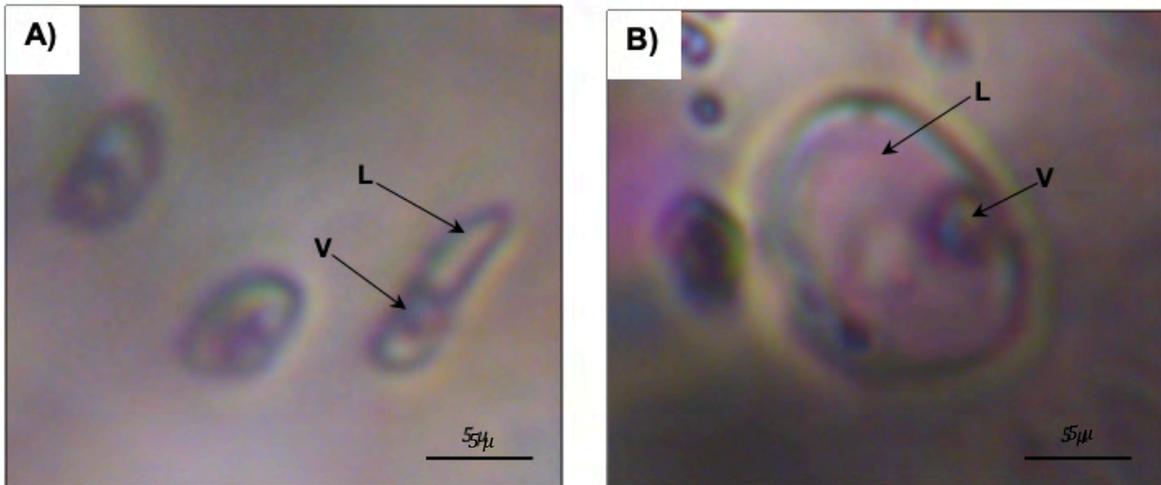
A) Inclusiones fluidas bifásicas en calcita líquido dominante: vapor (V) + líquido (L). B) Inclusiones fluidas trifásicas líquido dominante: vapor (V) - líquido (L) - cubo de sal (S), siendo las bifásicas dominantes. Resultados promedio obtenidos: Th°C 213.37; Tf°C - 5.85; Salinidad (% peso Eq. NaCl) 9.01.

### Muestra SC-06



A) y B) Inclusiones fluidas bifásicas en calcita líquido dominante: vapor (V) + líquido (L). Resultados promedio obtenidos: Th°C 249.05; Tf°C -6.83; Salinidad (% peso Eq. NaCl) 10.26.

## Muestra SC-07



A) y B) Inclusiones fluidas bifásicas en calcita líquido dominante: vapor (V) + líquido (L). Resultados promedio obtenidos: Th°C 306.53; Tf°C -6.14; Salinidad (% peso Eq. NaCl) 9.39.