



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

**Microanálisis de elementos mayores y traza en granate por LA-ICP-MS y
su uso como trazador de procedencia en rocas sedimentarias detríticas**

TESIS

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

PRESENTA:

JUAN CARLOS MESINO HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS ORTEGA OBREGÓN

CENTRO DE GEOCIENCIAS

QUERÉTARO, MEXICO

ENERO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

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

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'JCH', written over a horizontal line.

JUAN CARLOS MESINO HERNANDEZ

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN.....	II
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Características geológicas de los complejos estudiados	5
Complejo Oaxaqueño.....	5
Complejo Acatlán	6
Complejo Xolapa	8
Complejo Chuacús.....	10
Complejo Macizo de Chiapas	11
Skarn de los distritos mineros Tatatila-Las Minas	13
Skarns del distrito minero Peña Colorada	13
1.4. Secuencias clásticas.....	14
Cuenca Otlaltepec	14
Área de Cerro Pelón.....	14
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	15
2.1. Selección y preparación de muestras.....	16
Secciones delgadas pulidas	19
Separación mineral.....	19
2.2. Microanálisis LA-ICP-MS	20
2.3. Reducción de datos.....	23
CAPÍTULO 3. RESULTADOS	24
3.1. Elementos mayores.....	24
3.2. Elementos traza	27
Elementos tierras raras	36
3.3. Zoneamiento	42
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN	47
4.1. Comparación de técnicas microanalíticas para la caracterización geoquímica de granate	47
4.2. Diferencias composicionales	48
Elementos mayores	48
Elementos traza.....	52
Elementos de tierras raras	55

Zoneamiento vs homogeneización.....	58
4.3. El granate como trazador de procedencia.....	59
4.4. Alcances del trabajo de investigación	62
CONCLUSIONES	65
REFERENCIAS.....	67
ANEXO I	1A
ANEXO II.....	14A
ANEXO III.....	20A
ANEXO IV	25A
ANEXO V.....	30A
ANEXO VI.....	32A

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO 2. METODOLOGÍA

Figura 2. 1 Mapa geológico de los complejos metamórficos del sur del México y Guatemala.....	15
Figura 2. 2 Procesamiento de las muestras para su posterior análisis por LA-ICP-MS....	16
Figura 2. 3 Fotografías del equipo del LEI utilizado para realizar los microanálisis de elementos mayores y traza de granate	20
Figura 2. 4 Imagen de la señal obtenida durante un análisis de LA-ICP-MS, donde se indica la porción que corresponde a la señal obtenida del material ablacionado y al blanco analítico.	23

CAPITULO 3. RESULTADOS

Figura 3. 1 Diagramas ternarios de componentes ideales de granate.....	26
Figura 3. 2 Diagramas bivariantes de Y vs SiO ₂	30
Figura 3.3 Diagramas bivariantes de V y Cr vs SiO	31
Figura 3.4 Diagramas bivariantes de Sc y Ga vs SiO ₂	32
Figura 3.5 Diagramas bivariantes de Ti y Zr vs SiO ₂	33
Figura 3.6 Diagramas bivariantes de Zn y Ga vs SiO ₂	34
Figura 3.7 Diagramas bivariantes de Li y Co vs SiO ₂	35
Figura 3.8 Diagramas multielementales de REE normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995), de las muestras del Complejo Acatlán.....	38
Figura 3.9 Diagramas multielementales de REE de las muestras del Complejo Acatlán (a-d) y las muestras del Complejo Xolapa (e-i) normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995).	39
Figura 3.10 Diagramas multielementales de REE de los granates del Complejo Chuacús (a-d) y los granates de skarn (e-i) normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995).	40
Figura 3.11 Diagramas multielementales de REE de los granates de los complejos Oaxaqueño (a-f) y Macizo de Chiapas (g), y de skarn (h) normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995).	41

Figura 3. 12 Ejemplos de perfiles de granate que muestran el zoneamiento de elementos mayores y traza.....	43
Figura 3. 13 Diagramas multielementales de REE de algunas muestras de los complejos Acatlán, Oaxaqueño y Macizo de Chiapas normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995).	44
Figura 3. 14 Diagramas multielementales de REE de algunas muestras de los complejos Xolapa y Chuacús normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995).....	45
Figura 3. 15 Diagramas multielementales de REE de algunas muestras de skarn normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995).	46

CAPITULO 4. DISCUSIONES

Figura 4. 1 Diagrama ternario de proporciones molares de componentes ideales de granate de los resultados obtenidos mediante el uso de las técnicas de LA-ICP-MS y EPMA.....	48
Figura 4. 2 Diagrama ternario basado en la proporción Al-Ca-Fe para diferenciar granate de tipo And de granates ricos en Alm-Grs-Sps-Py.....	50
Figura 4. 3 Diagramas ternarios de componentes ideales de granate con los campos composicionales formados en cada complejo y datos de granate publicados previamente	51
Figura 4. 4 Señal obtenida de la ablación de dos cristales granates de una muestra de eclogita (OR-02) del Complejo Acatlán.....	53
Figura 4. 5 Diagramas bivariantes de elementos traza basados en las comparacion que otros autores han propuesto para diferenciar granates de diferente fuente.....	54
Figura 4. 6 Diagramas bivariantes de razones de elementos de tierras raras.	57
Figura 4. 7 Diagrama ternario de granates detríticos.	61
Figura 4. 8 Diagramas multielementales de REE de granates del Complejo Ayú (a) y de la Formación Piedra Hueca (b).....	62

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente al Dr. Carlos Ortega Obregón por el tiempo, paciencia, enseñanza y confianza que me brindó durante el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Luigi Solari por haberme brindado la oportunidad de formar parte del proyecto PAPIIT-DGAPA IN103417 titulado "Sedimentary provenance reloaded: técnicas micro-analíticas aplicadas a la procedencia de sedimentos siliciclásticos mesozoicos en el Sur de México", a partir del cual se obtuvieron los recursos para el desarrollo de esta tesis.

A los doctores Roberto Maldonado Villanueva, Berlaine Ortega Flores, Mario Alfredo Ramos Arias y Luigi Solari por sus comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar sustancialmente este trabajo.

A los doctores Mario A. Ramos, Juliana Estrada Carmona y Michelangelo Martini por haber proporcionado muestras del Complejo Acatlán, las cuales fueron indispensables para el desarrollo de este trabajo. A los doctores Eduardo González Partida y Gilles Levresse por haber proporcionado las muestras de skarn de los distintos distritos mineros.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM por haberme dado la oportunidad de cursar mis estudios de Maestría. Del Centro de Geociencias agradezco al Dr. Mariano Cerca Martínez, Marta Pereda Miranda, Blanca Rendón y Armando Ramírez por su apoyo durante los trámites de cada semestre y las actividades administrativas para mi titulación.

A todo el personal del Centro de Geociencias. A los técnicos Juan Tomás Vásquez y Óscar Aguilar por su apoyo en la preparación de secciones delgadas pulidas. Al técnico Manuel Albarrán por su apoyo en el taller de molienda y separación mineral.

Un especial agradecimiento a mis padres Fidelina y Luis, y a mi familia, por su apoyo incondicional durante esta etapa de mi preparación profesional.

A mis amigos, en especial los del cubo, gracias por sus consejos y compañía durante todo este tiempo que hicieron más amena mi estancia en el CGEO.

RESUMEN

Los estudios de procedencia de rocas sedimentarias detríticas generalmente están basados en análisis detallados de sedimentología, estratigrafía, petrografía y geocronología U-Pb de zircones detríticos. Recientemente los microanálisis de minerales pesados (p. ej., apatito, cromita, espinela, granate) se han empleado como una herramienta complementaria para estudios de procedencia. En este trabajo se demuestra la utilidad del granate como posible trazador de procedencia. El estudio está basado en la caracterización química de granate a partir de microanálisis multielemental por la técnica LA-ICP-MS. Se caracterizaron granates procedentes de las principales fuentes metamórficas del sur de México y los límites con Guatemala (los complejos Acatlán, Oaxaqueño, Xolapa, Chuacús y Macizo de Chiapas), y de skarns de los distritos mineros Tatatila-Las Minas (Veracruz) y Peñas Coloradas (Colima). Dichos complejos metamórficos poseen una gran variedad en términos de su litología, facies metamórficas, clase química e historia térmica. Los resultados permitieron identificar cuatro tipos de granate a partir de la proporción de sus componentes ideales: los Tipo 1 corresponden a los complejos Acatlán, Xolapa y Chuacús [Alm (41-82.2), Grs (4.2-40.1), Sps (0.2-26.5), Py (0.4-13.4)]; los Tipo 2 corresponden al Complejo Oaxaqueño [Alm (70.2-76.9), Grs (1.7-9.1), Sps (0.7-2.4), Py (14.4-27.1)]; los Tipo 3 pertenecen al Complejo del Macizo de Chiapas [Alm (45-50.4), Grs (0.9-1.3), Sps (45.7-50.6), Py (2.2-2.6)]; y los Tipo 4 son andraditas de skarn. Los diagramas ternarios Alm + Sps – Py – Grs y Alm – Py – Sps resultaron ser útiles para establecer campos composicionales con poca dispersión para cada complejo. También se propone un diagrama ternario de Al-Ca-Fe para diferenciar granate andradítico. Los elementos traza, incluidos los de Tierras Raras, no fueron determinantes para la diferenciación de los granates ya que presentan una gran variedad composicional. Sin embargo, la anomalía de Eu permitió diferenciar los granates del Complejo Xolapa de los granates Tipo 1. La concentración de Ge fue útil para diferenciar los granates del Complejo del Macizo de Chiapas. Por otro lado, se realizaron perfiles composicionales en los granates que evidencian zoneamientos complejos que no permiten diferenciar la posible fuente. La composición de granates metamórficos fue comparada con la de granates detríticos de la cuenca Otlaltepec y del área de Cerro Pelon, y permitió diferenciar las fuentes con mayor solidez. Este trabajo aporta una amplia base de datos de geoquímica de granate que podría ser útil para resolver problemas de procedencia subsecuentes asociados a las fuentes metamórficas del sur de México.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

Los estudios de procedencia de rocas sedimentarias detríticas comúnmente hacen uso de herramientas como la petrografía, geocronología de zircones detríticos, catodoluminiscencia y geoquímica de distintas fases minerales (p. ej., piroxenos, espinela, cloritoide, cromita). La datación de zircones detríticos es una de las técnicas más utilizados. Sin embargo, a partir de las características geoquímicas y distinción de poblaciones de otras fases minerales de la fracción pesada con densidad mayor a 3.0 g/cm^3 (p. ej., cloritoide, espinela, granate, monazita, turmalina; Morton, 1985, 1991.), es posible obtener información sobre la fuente sedimentaria a pesar de su limitada persistencia a los procesos diagenéticos.

El granate es un grupo de nesosilicatos con sistema cristalino cúbico que tiene como fórmula general $X_3Y_2(Z\phi_4)_3$. Este grupo mineral se comporta como una solución sólida y cada especie surge por la abundancia de cationes específicos en los sitios atómicos. La nomenclatura propuesta por Grew *et al.* (2013) sugiere que el Fe^{+2} , Ca^{+2} , Mn^{+2} y Mg^{+2} son los que comúnmente ocupan el sitio X, el Al^{+3} y Fe^{+3} el sitio Y, el Si el sitio Z y O el sitio ϕ . Algunos elementos traza como V, Cr, Sc, Ga, Ti, Zr, Sn, Sb pueden ocupar el sitio Y. Asimismo, elementos como el Y, elementos tierras raras (REE), Na y Th pueden ocupar el sitio X. Elementos como el Ti, Ge, As, V, P, Zn y Li llegan a ocupar el sitio Z. De acuerdo con Grew *et al.* (2013), la abundancia de los componentes del granate es jerarquizada de acuerdo con el sitio atómico que pueden ocupar (Tabla 1.1). Una característica importante del granate es que crece y es estable en un intervalo muy amplio de presión y temperatura, desde presiones atmosféricas hasta los 25 GPa y de 300 a 2000 °C (Baxter *et al.*, 2013). La cristalización del granate, de acuerdo con Ague y Carlson (2013), requiere de cuatro procesos principales: 1) disolución de minerales reactivos para dar lugar a un fluido intergranular; 2) nucleación de dicho fluido; 3) difusión (transporte) de nutrientes de las fases reactivas a los productos mediante el fluido; y 4) precipitación de nutrientes sobre el cristal en crecimiento. Dentro de los principales constituyentes del granate, el Al es el componente que determina la velocidad de nucleación y crecimiento. El resto de los

componentes también se difunden a través del fluido, pero la velocidad a la que lo hacen puede dar lugar a gradientes que se registrarán en el zoneamiento del granate. Algunos elementos no alcanzan la velocidad de difusión del Al y dan lugar a un equilibrio químico parcial, donde solo algunos elementos se encuentran en equilibrio en toda la roca.

El granate ha sido catalogado dentro de las fases minerales más persistentes por su ocurrencia en rocas sedimentarias detríticas de distinta edad (Pettijohn, 1941). Sin embargo, la caracterización de granates detríticos tiene ciertas limitantes respecto a los procesos diagenéticos que ocurren después de su depósito. La principal es su persistencia a procesos de “disolución intraestrato” que, de acuerdo con Morton (1984), ocurre en arenas sepultadas a profundidad bajo la influencia de fluido de poro de alta temperatura o la interacción con agua subterránea ácida. Algunos autores han documentado la persistencia de granate a profundidades inferiores a los 4,500 m, a partir de su ocurrencia en secuencias estudiadas a través de pozos petroleros (Morton y Hallsworth, 2007; Milliken y Mack, 1990). Otro factor es la ruptura de los minerales durante el transporte, lo cual tiene implicaciones en granates zoneados ya que pueden ser analizadas distintas zonas de crecimiento de diferente composición y ser interpretadas como cristales diferentes, y por lo tanto distintas fuentes (Morton, 1995). Estos procesos pueden interferir en el estudio de procedencia de granates detríticos conduciendo al error en la interpretación de la información obtenida.

Se han realizado trabajos previos de procedencia basados en la composición de elementos mayores identificando los grupos de granates mediante la proporción de sus componentes principales, Fe-Mg-Ca-Mn (Morton, 1985; Haughton y Farrow, 1989; Sabeen *et al.*, 2002; Čopjaková *et al.*, 2005; Aubrecht *et al.*, 2009). Sin embargo, la caracterización de algunos elementos traza del granate también es útil, ya que algunos de estos elementos son sensibles a los procesos de metamorfismo. La caracterización de granate generalmente está basada en análisis de microsonda electrónica (EPMA, Electron Probe Microanalyzer), la cual permite determinar la composición de elementos mayores y traza. En trabajos anteriores se han estudiado los elementos de Tierras Raras en granate a partir de análisis LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) y se ha reconocido el comportamiento producido por las condiciones de metamorfismo (Bea *et al.*, 1997; Čopjaková *et al.*, 2003; Čopjaková *et al.*, 2005; Estrada-Carmona *et al.*, 2016a,b). Existen muy pocos

trabajos de procedencia basados en la composición de los elementos traza de granate. Čopjaková *et al.* 2005 distinguen las poblaciones de granate por el zoneamiento de Itrio y los elementos de tierras raras pesadas (HREE) en los sedimentos de la cuenca Culm, que forma parte de la cuenca de antepaís Varisca europea en República Checa y Austria. Estos mismos autores estudiaron las rocas que pudieron aportar granates a la cuenca, determinando como posibles fuentes granulitas y gneises félsicos granatíferos, con base en las similitudes que comparten los granates de la cuenca Culm y el Macizo Bohemio.

En la presente tesis se caracterizaron granates de complejos metamórficos del sur de México y de Guatemala, a partir de microanálisis por LA-ICP-MS, para su potencial uso como posible trazador de procedencia. Los granates estudiados provienen de distintas rocas cristalinas del Complejo Acatlán, Complejo Oaxaqueño, Complejo Xolapa, Complejo Chuacús, Macizo de Chiapas y skarns de los distritos mineros Tatatila-Las Minas (Veracruz) y Peña Colorada (Colima). Estas rocas fueron seleccionadas porque se presentan como las principales fuentes que podrían aportar granate durante los procesos de sedimentación. Varios de estos complejos metamórficos están relativamente caracterizados en términos de su termobarometría, petrografía y geocronología. En términos generales, varios de estos complejos se han formado a partir de distintos protolitos y han alcanzado condiciones de metamorfismo distintas. De esta manera, se espera que los granates estudiados presenten una composición química distintiva, asociada a la petrogénesis de las rocas; tales como la proporción molar de sus componentes ideales, zonificación de elementos mayores y traza, y patrones de los elementos de Tierras Raras (REE) entre otras. Además, se presenta la comparación de los granates metamórficos caracterizados con granates detríticos de la cuenca Otlaltepec y el área de Cerro Pelón, los cuales fueron estudiados previamente por otros autores. Se considera que las características geoquímicas identificadas en los granates estudiados servirán como una base de datos para resolver futuros problemas de procedencia de sucesiones sedimentarias que se han formado a partir de los detritos de las rocas estudiadas, sirviendo como una herramienta adicional que apoye los estudios convencionales de procedencia ya realizados

Tabla 1.1 Abundancia relativa de cationes y aniones en el super grupo mineral del granate (tomado de Grew *et al.* 2013)

Sitio	Abundancia relativa de los iones	Cationes y aniones en cada sitio ordenados de acuerdo con su abundancia relativa
X	$R^{2+} >> R^{3+} >> R^{1+} >> R^{4+}$	R ²⁺ : Fe-Mn-Ca > Mg >> Pb R ³⁺ : Y > HREE > LREE R ¹⁺ : Na R ⁴⁺ : Th
Y	$R^{3+} > R^{4+} > R^{2+} > R^{5+} > R^{6+}$	R ³⁺ : Al - Fe > V, Cr, Mn > Sc >> Ga R ⁴⁺ : Ti > Zr > Si, Sn R ²⁺ : Mg > Fe, Mn R ⁵⁺ : Sb, Nb R ⁶⁺ : Te, U
Z	$R^{4+} > R^{3+} > R^{5+} > R^{2+} > R^{1+}$	R ⁴⁺ : Si >> Ti > Ge R ³⁺ : Fe - Al R ⁵⁺ : As > V > P R ²⁺ : Zn, Fe R ¹⁺ : Li
φ	$\phi^{2-} >> \phi^{1-}$	φ ²⁻ : O φ ¹⁻ : OH > F

Nota: Los cationes y aniones mostrados en negritas representan los iones más comunes en estos sitios

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es realizar una caracterización química de granates de distintas rocas metamórficas, las cuales son identificadas como principales fuentes de granate, con base en los elementos mayores y traza mediante la técnica de LA-ICP-MS, para evaluar la utilidad de esta fase mineral como potencial trazador de procedencia de rocas sedimentarias detríticas.

Establecer los componentes principales de los granates estudiados que sean de mayor utilidad para diferenciar los complejos metamórficos.

Aplicar la caracterización de los granates estudiados en la presente tesis para distinguir la fuente de granates detríticos (estudiados en otros trabajos) de la cuenca Otlaltepec y el área de Cerro Pelón.

Se espera aportar información para resolver problemas de procedencia de rocas sedimentarias detríticas que contengan granate y que carezcan de otras fases minerales útiles (p. ej., zircones, apatitos) para el reconocimiento de posibles fuentes.

1.3. Características geológicas de los complejos estudiados

Complejo Oaxaqueño

El Complejo Oaxaqueño representa una gran parte del basamento expuesto del terreno Oaxaca (Campa y Coney, 1991). Consiste en rocas en facies de granulita de edad grenvilliana de secuencias supracorticales, que incluyen metasedimentos de composición cuarcítica, carbonatada y pelítica a semi-pelítica, y suites ígneas de anortosita-mangerita-charnoquita-granodiorita (AMCG) (Weber *et al.*, 2010; Solari *et al.*, 2014). Estas suites AMCG, de edad entre 1,004 – 1,020 Ma, intrusionan a los metasedimentos mencionados (Keppie *et al.*, 2001). Solari *et al.* (2014) obtuvieron edades que van de 1,150–1,180 Ma en zircones detríticos de los metasedimentos, comparables con las obtenidas por Keppie *et al.* (2003) y Cameron *et al.* (2004), atribuidas a un arco magmático. Las porciones norte y sur del Complejo Oaxaqueño presentan características geoquímicas y de evolución tectónica diferentes. Keppie y Dostal (2007) propusieron un comportamiento bimodal, debido a que en la parte norte los gneises máficos están asociados a protolitos de rocas basálticas relacionadas a rifting, mientras que en la porción sur los gneises están asociados a rocas volcánicas félsicas con afinidad de arco (Keppie *et al.*, 2001). Keppie y Ortega-Gutiérrez (2010) dedujeron que los datos geoquímicos sugieren que estas rocas representan un arco juvenil que posteriormente sufrió procesos de rompimiento en un ambiente de tras-arco, ubicado en un margen activo de Amazonia. Solari *et al.* (2003) documentaron la orogenia Olmeca en la porción norte del Complejo Oaxaqueño, como un evento de migmatización que ocurrió hace $1,106 \pm 6$ Ma. Sin embargo, Weber *et al.* (2010) no observan registros de este evento en las rocas de la porción sur. La edad de cristalización del magmatismo AMCG del Complejo Oaxaqueño es de $1,012 \pm 12$ Ma en la porción norte (Keppie *et al.*, 2003), mientras que en la porción sur es ligeramente menor (1006 ± 17 – 14 Ma y $1,007 \pm 37$ Ma) y se interpretan como la última fase del magmatismo (Weber *et al.*, 2010).

Solari *et al.* (2004) calcularon las condiciones de temperatura y presión en $735 \pm 5^\circ$ C y 7.7 ± 0.1 kbar en charnoquitas, que corresponden al metamorfismo en facies de granulita, a partir de la composición de la asociación mineral de granate–plagioclasa–ilmenita–clinopiroxeno–ortopiroxeno–cuarzo. Sin embargo, señalan que algunas texturas como mesopertitas y otras asociaciones minerales presentes en metapelitas (p. ej., espinela con zafiro y granate-cordierita-

sillimanita-feldespató alcalino-rutilo) sugieren un pico metamórfico superior a los 800 °C. Además, mediante fechamientos U-Pb de zircones le asignan una edad a este evento metamórfico entre ~979 y 998 Ma (Solari *et al.*, 2004). Keppie *et al.* (2001) obtuvieron edades U-Pb en zircon entre 983 ± 4 y 993 ± 1 Ma en la porción sur, a partir de fechamientos mediante espectrometría de masas por ionización térmica (TIMS), para el metamorfismo granulítico. Solari *et al.* (2003) determinaron el fin del evento metamórfico en facies de granulita en 978 Ma, a partir de la datación de pegmatitas que cortan la foliación metamórfica. A partir de estudios petrográficos realizados tanto en la porción norte y sur, se ha sugerido que el granate está asociado al metamorfismo en facies de granulita (Keppie *et al.*, 2001; Keppie *et al.*, 2003; Keppie y Dostal *et al.*, 2007). Generalmente las paragénesis que incluyen granate en equilibrio textural son: granate-cuarzo, granate-clinopiroxeno-cuarzo, granate-ortopiroxeno-hornblenda y plagioclasa-granate-clinopiroxeno-cuarzo-ortopiroxeno (Keppie *et al.*, 2001; Keppie *et al.*, 2003).

Complejo Acatlán

El Complejo Acatlán consiste en rocas cristalinas que forman parte del basamento del terreno Mixteca (Ortega Gutiérrez, 1978; Campa y Coney, 1983). El Complejo Acatlán está dividido en dos suites metamórficas, la Suite Petlalcingo del Pérmico-Triásico compuesta por rocas de bajo grado metamórfico y la Suite Piaxtla del Neoproterozoico-Ordovícico compuesta por rocas de alto grado metamórfico (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005; Murphy *et al.*, 2006; Vega-Granillo *et al.*, 2007; Keppie *et al.*, 2008; Ortega-Obregón *et al.*, 2009; Ramos-Arias *et al.*, 2011).

La Suite Petlalcingo incluye los litodemas Magdalena y Chazumba. El Litodema Chazumba está compuesto por metapsamitas y metapelitas que contienen abundantes lentes maficos-ultramaficos interestratificados con cuarcita, esquistos pelíticos y metagabros (Ortega-Gutiérrez, 1978; Keppie *et al.*, 2006; Nace *et al.*, 2007). Helbig *et al.* (2012) han asociado el Litodema Chazumba con el Complejo Ayú con base en geocronología U-Pb en zircones. El Litodema Magdalena está compuesto por metapsamitas y metapelitas que fueron migmatizadas durante el Jurásico (Keppie *et al.*, 2004b).

La Suite Piaxtla (Litodema Asís en Murphy *et al.*, 2006) está compuesta por anfibolitas, relictos de eclogitas dentro de anfibolitas de granate, esquistos cloríticos, psamíticos y pelíticos, y esquistos azules (Ortega-Gutiérrez, 1978, Ramires-Espinoza, 2001; Middleton *et al.*, 2007; Vega-Granillo *et al.*, 2009; Ramos-Arias *et al.*, 2012; Estrada-Carmona *et al.*, 2016a).

A partir de los estudios geocronológicos se han documentado los eventos metamórficos del Complejo Acatlán entre el Ordovícico y el Carbonífero que se enlistan a continuación. Talavera-Mendoza *et al.* (2005) reportaron que el metamorfismo de alta presión ocurrió en el Ordovícico temprano, a partir de edades U-Pb (461 ± 9 y 478 ± 5 Ma) en zircones de leucogranitos que intrusionan las rocas de la Suite Piaxtla. Yañez *et al.* (1991) reconocieron un evento tectonotérmico del Devónico temprano a medio (400-370), a partir de edades Sm-Nd de roca total y granate de eclogitas y esquistos, así como de edades U-Pb en zircones de granitoides. Vega-Granillo *et al.* (2007) sugirieron tres eventos metamórficos de alta presión a partir de edades U-Pb y Ar-Ar; el primer evento en facies de eclogita corresponde a una edad U-Pb en zircones de 490–477 Ma (Ordovícico temprano); el segundo evento en facies de esquistos azules es propuesto para el Ordovícico tardío y, el tercer evento en facies de eclogita corresponde con una edad Ar-Ar de 374 ± 2 Ma. Middleton *et al.* (2007) definieron la historia en cuatro estadios importantes: 1) metamorfismo en facies de eclogita fechado, mediante la técnica TIMS, en 346 ± 3 Ma en zircones de eclogitas; 2) deformación en condiciones metamórficas de facies de anfibolita, acompañada con migmatización durante el periodo de tiempo 347-330 Ma, calculado con edades U-Pb en zircones de migmatitas utilizando microsonda iónica de alta resolución (SHRIMP); 3) deformación y metamorfismo en condiciones de facies de esquistos verdes y; 4) desarrollo de varias fases de plegamiento y crenulación. Ortega-Obregón *et al.* (2009) documentaron un estadio posterior al pico metamórfico del evento de alto grado, a partir de edades Ar-Ar en muscovita y horblenda en un periodo de tiempo entre 361 ± 3 y 335 ± 4 Ma. Ramos-Arias *et al.* (2012) definen un periodo de exhumación de aproximadamente 20 Ma, mediante edades Ar-Ar en horblenda y glaucófano entre 340 Ma y 318 Ma. Finalmente, Estrada-Carmona *et al.* (2016a) establecieron que el evento metamórfico en facies de eclogita tuvo lugar en el Misisípico inferior hace, 352.5 ± 1.6 Ma con la edad de la isócrona de Lu-Hf en granate y roca total.

Los estudios petrográficos de las rocas de la Suite Piaxtla han mostrado que el crecimiento del granate está asociado al metamorfismo en facies de eclogita y anfibolita, cuyos afloramientos han sido reportados en las áreas de Ixcamilpa, Asís, Piaxtla, Mimilulco, Santa Cruz Organal y Las minas en Puebla, y Olinalá en Guerrero (Ortega-Gutiérrez, 1978; Ramírez-Espinoza, 2001; Keppie *et al.*, 2004b; Talavera-Mendoza *et al.*, 2005; Vega-Granillo *et al.*, 2007; Ortega-Obregón, 2011; Ramos-Arias *et al.*, 2012; Estrada -Carmona *et al.*, 2016). Las paragénesis que incluyen granate en equilibrio textural son: 1) onfacita – granate – clinozoisita – fengita – barroisita ± cuarzo ± rutilo; 2) albita – barroisita – granate – clinozoisita – fengita ± cuarzo ± rutilo; 3) fengita – cuarzo – granate – albita ± cloritoide ± rutilo ± ilmenita ± turmalina; 4) albita – fengita – granate – cuarzo ± biotita ± feldespato potásico ± clinozoisita ± rutilo; 5) onfacita – granate – anfíbol – fengita – albita – rutilo; 6) anfíbol – granate – albita – fengita – rutilo; 7) onfacita – granate – cuarzo – rutilo ± epidota (Vega-Granillo *et al.*, 2007; Ortega-Obregón, 2011; Ramos-Arias *et al.*, 2012; Estrada -Carmona *et al.*, 2016a).

Las condiciones máximas de temperatura y presión del metamorfismo de alto grado en facies de eclogita calculadas en eclogitas y anfibolitas son de 560 ± 60 °C y 11-15 kbar, respectivamente (Meza-Figueroa *et al.*, 2003). Vega-Granillo *et al.* (2007) estimaron condiciones de temperatura y presión para el metamorfismo en facies de eclogita en 491-609 °C y 12-13 kbar, y 768-830 °C y 15-17 kbar. Galaz-Escanilla *et al.* (2013) calcularon temperaturas promedio de 758 ± 28 °C y presión de 16 kbar en el micaesquisto Tehuiztzingo, mientras que para los granitoides de alta presión estimaron temperaturas promedio de 741 ± 50 °C.

Complejo Xolapa

El Complejo Xolapa representa el basamento del terreno Xolapa (Campa y Coney, 1983) y está compuesto por rocas metamórficas de protolito ígneo, tales como orto-gneises máficos y cuarzo-feldespáticos y anfibolitas (Solari *et al.*, 2007; Pérez-Gutiérrez *et al.*, 2009; Maldonado-Villanueva, 2011), y de origen sedimentario, que incluyen para-gneises psamíticos-pelíticos, mármoles y meta-grauvacas (De Cserna, 1965; Ortega-Gutiérrez, 1981; Alaniz-Álvarez, 1988). Varias de estas unidades presentan diferentes grados de migmatización, y de acuerdo con las relaciones de campo y características microestructurales, han experimentado al menos 4 fases de deformación (Solari *et al.*, 2007, Pérez-Gutiérrez *et al.*, 2009; Maldonado-Villanueva, 2011).

La cristalización del granate está asociada al metamorfismo en facies de anfibolita, presentes en gneises, metapelitas y migmatitas, y en granitos como fase mineral accesoria, que afloran en el transecto Acapulco, Gro. – Puerto Angel, Oax (Perez-Gutiérrez, 2005; Corona-Chavez *et al.*, 2006; Maldonado-Villanueva, 2011; Estrada-Carmona *et al.*, 2016b). Las paragénesis que incluyen granate en equilibrio textural son: 1) cuarzo – plagioclasa – biotita – feldespato potásico – titanita – apatito – zircón ± granate ± rutilo ± grafito ± calcita; 2) cuarzo – plagioclasa – biotita – sillimanita – granate -zircón – apatito – óxidos de Fe; 3) plagioclasa – biotita – anfíbol – granate – cuarzo – ilmenita – zircón – apatito ± ortopiroxeno; 4) plagioclasa – cuarzo – biotita – anfíbol – apatito – zircón – titanita ± granate; 5) plagioclasa – biotita – sillimanita – cuarzo – feldespato potásico – granate – ilmenita – zircón; 6) plagioclasa – biotita – cuarzo – feldespato potásico – ilmenita – zircón – apatito ± granate ± muscovita ± grafito, plagioclasa – cuarzo – feldespato potásico ± biotita ± granate (Maldonado-Villanueva, 2011).

Los trabajos de geocronología sugieren que el magmatismo que dio lugar al protolito de los orto-gneises ocurrió en el Jurásico medio-inferior, con base en una edad U-Pb en zircones de 178 ± 1.1 Ma según (Pérez-Gutiérrez *et al.* 2009). No obstante, algunos autores han documentado edades mezoproterozoicas y paleozoicas (Herrmann *et al.*, 1994; Ducea *et al.*, 2004). La edad del evento de migmatización se ha calculado para el Paleoceno-Eoceno en 66-46 Ma (Herman *et al.*, 1994) y 64-59 Ma (Talavera-Mendoza *et al.*, 2013). Sin embargo, Estrada Carmona *et al.* (2016b) obtuvieron edades U-Pb en zircones de 122.7 ± 1.8 Ma y 54.16 ± 0.29 Ma. Estos mismos autores asocian la primera edad a la colisión del bloque Chortís al oeste de México; la segunda edad a un evento de migmatización relacionado a la exhumación del Complejo Xolapa, producto de la transpresión y migración del bloque Chortís hacia el sureste de México.

Las condiciones de temperatura y presión del metamorfismo del Complejo Xolapa han sido calculadas en 800-900 °C y ≥ 6.3 -9.3 Kbar, respectivamente, por Corona-Chávez *et al.* (2006), a partir de estudios geotermobarométricos en leucosomas diatexiticos y metatexiticos. Maldonado-Villanueva (2011) documenta una fase del metamorfismo migmatítico en condiciones de presión y temperatura de 7-8 kbar y 750-850 °C, respectivamente.

Complejo Chuacús

El Complejo Chuacús forma parte del basamento de la porción sur del Bloque Maya, ubicado en la Sierra de Chuacús (Martens *et al.*, 2012). Consiste en gneises máficos y félsicos con metamorfismo de alto grado, anfibolitas, eclogitas, meta-sedimentos pelíticos y cuarzofeldespáticos, y mármoles (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 2004; Solari *et al.*, 2011; Martens *et al.*, 2012). De acuerdo con Solari *et al.* (2011), los diques máficos y lentes metamorfoseados en facies de anfibolita y eclogita tienen firma toleítica, similar a la de basaltos de dorsales meso-oceánicas. En contraste, los intrusivos metamorfoseados (gabros, diorita y granito) son calcio-alcalinos, y tienen la firma geoquímica de magmas relacionados a subducción.

El crecimiento del granate está asociado al metamorfismo en facies de eclogita y está presente en rocas metamórficas como eclogitas, anfibolitas, gneises migmatíticos, cuarcitas, meta-sedimentos pelíticos y cuarzofeldespáticos, que afloran en el área de la Sierra de Chuacús entre Polibatz, Granados y Salamá en el centro de Guatemala (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 2004; Solari *et al.*, 2011; Maldonado *et al.*, 2018a). Las paragénesis que incluyen granate en equilibrio textural son: 1) cianita – granate – rutilo – fengita – cuarzo; 2) cuarzo – granate – albita – fengita – biotita – zoisita – rutilo – anfíbol; 3) cuarzo – granate – muscovita – cianita – estaurolita – cloritoide – biotita – turmalina – rutilo – zircón ± apatito ± monacita; 4) cuarzo ± granate ± anfíbol ± fengita ± turmalina; 5) onfacita – rutilo – granate – zoisita; 6) onfacita – granate – rutilo – cuarzo; 7) onfacita – granate – rutilo ± fengita ± cuarzo ± epidota (Solari *et al.*, 2011; Martens *et al.*, 2012).

Los estudios de termobarometría en las rocas de alto grado metamórfico revelan condiciones de presión cercanas a las de ultra alta presión (UHP, por sus siglas en inglés). Las condiciones de presión y temperatura calculadas varían en un rango de 18 a 23 kbar y 700-770 °C, respectivamente (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 2004). Ratshbacher *et al.* (2009) estimaron temperaturas de 675 °C y presiones de 24 kbar en eclogitas y condiciones de retrogresión a 510 °C y 7 kbar. Asimismo, Martens *et al.* (2016) calcularon las condiciones pico de metamorfismo de las eclogitas en 720-830 °C y 21 -27 kbar. Recientemente, Maldonado *et al.* (2018b) reportaron condiciones pico en condiciones de presión y temperaturas similares a las propuestas por Martens *et al.* (2016), de 23– 25 kbar y 620-690 °C.

Solari *et al.* (2011) definieron dos eventos magmáticos, uno Ordovícico (466 Ma) y otro Triásico (240-220 Ma), e interpretan una edad de $74 \pm 3/-1$ Ma, obtenida en una pegmatita, como resultado de la recristalización tras el evento metamórfico de alta presión. Además, Maldonado *et al.* (2018a, b) documentaron la existencia otros eventos magmáticos que ocurrieron en el Mesoproterozoico, Silúrico-Devónico y Jurásico medio. Asimismo, Maldonado *et al.* (2018) obtuvieron evidencias de que el metamorfismo asociado al evento tectonotérmico que dió lugar al magmatismo del Silúrico-Devónico. Martens *et al.* (2012) obtuvieron una edad de 75.5 Ma en zircones metamórficos, y una edad de 77 ± 13 Ma de isócrona Sm-Nd en eclogitas, que interpretaron como edades del metamorfismo asociado a subducción. Sin embargo, Maldonado *et al.* (2018a) obtuvieron una edad Lu-Hf en granate/roca total de 101.8 ± 3.1 Ma que indica las últimas etapas de crecimiento del granate en facies de eclogita. Martens *et al.* (2012) interpretaron una edad U-Pb en zircones de 74.5 ± 3.5 Ma, como la edad de retrogresión, sugiriendo una exhumación rápida de este complejo metamórfico.

Complejo Macizo de Chiapas

El Complejo Macizo de Chiapas representa la porción más grande de rocas cristalinas que forman parte del basamento en el sur del Bloque Maya (Estrada-Carmona *et al.*, 2009; Weber *et al.*, 2018), denominado así por Dengo (1985) o como Terreno Maya por Campa y Coney (1983). El CMC está compuesto principalmente por rocas plutónicas de composición granítica a gabrónica (Schaaf *et al.*, 2002; Weber *et al.*, 2007; Pompa-Mera, 2009) que presentan deformación ligera a intensa. Estos granitoides intrusionan a rocas metamórficas, dentro de las que se han reconocido ortogneises, anatectitas, anfibolitas y rocas metasedimentarias (Estrada-Carmona *et al.*, 2009; Estrada-Carmona *et al.*, 2012; Weber *et al.*, 2018;). Las rocas metamórficas han sido agrupadas en cuatro unidades denominadas Sepultura, Custepec, Candelaria y Jocote (Weber *et al.*, 2007; Estrada-Carmona *et al.*, 2009). González-Guzmán *et al.* (2016) definieron al Complejo el Triunfo (CT), ubicado en el sureste del CMC, conformado por la Unidad Jocote (metasedimentaria), la Unidad Candelaria (metaígneas), y anortositas, estas fueron reportadas por Cisnero de León *et al.* (2017).

Las rocas que contienen granate corresponden a las unidades Jocote, Sepultura y Custepec, e incluyen metapelitas, rocas calcosilicatadas, cuarcitas y anfibolitas, y han sido localizadas en las áreas Motozintla, San José Ixtepec, Tonalá, Arriaga y Custepec (Weber *et al.*, 2008; Estrada-

Carmona, 2013). Asimismo, el granate se presenta como mineral accesorio en granitos tipo S (Pompa-Mera, 2009). El granate creció en facies metamórficas de anfibolita-granulita, en las paragénesis en equilibrio textural tales como: granate – plagioclasa – biotita – muscovita – sillimanita, cuarzo – plagioclasa – muscovita – granate, horblenda rica en Ti – plagioclasa – granate – cuarzo \pm biotita (Weber *et al.*, 2008; Estrada-Carmona, 2013; Manjarrez-Juárez, 2013; González-Guzmán, 2016)

Las condiciones de presión y temperatura para la Unidad Sepultura se han calculado entre \sim 5.8 kbar y de 730 a 780 °C, y representan el pico metamórfico de acuerdo con Weber *et al.* (2007). Estrada-Carmona *et al.* (2009) obtuvieron condiciones físicas de 9 kbar y \sim 800 °C para la Unidad Custepec, y las interpretaron como la transición de facies de anfibolita-granulita. González-Guzmán *et al.* (2016) obtuvieron un pico en \sim 650 °C y \sim 6 kbar. Weber *et al.* (2018) interpretaron que las condiciones físicas, obtenidas por González-Guzmán *et al.* (2016), fueron suficientes para producir fusión parcial, suponiendo que las rocas estuvieron saturadas con agua.

Los estudios geocronológicos para las rocas del CMC se han basado en isotopía U-Pb, Ar-Ar, Lu-Hf y Sm-Nd. Weber *et al.* (2007) obtuvieron edades U-Pb en un rango de 254.0 ± 2.3 a 251.8 ± 3.8 Ma en zircones de las unidades Custepec y Sepultura, que asociaron al metamorfismo de medio a alto grado, el cual afectó a todo el macizo de Chiapas produciendo anatexis e intrusión de granitoides sintectónicos. Además, obtuvieron una edad U-Pb en zircones de \sim 272 Ma, que interpretaron como la edad de cristalización del protolito de los ortogneises. Estrada-Carmona *et al.* (2009) obtuvieron una edad Sm-Nd en granate de 268 ± 9 Ma de la Unidad Custepec, indicando que los elementos Sm y Nd se comportaron como un sistema cerrado durante el metamorfismo de alto grado en esta fase mineral, mientras que el zircón debió cristalizar a temperaturas por debajo del pico metamórfico.

En cuanto a las unidades que forman parte del CT, se ha determinado que los eventos metamórficos podrían haber ocurrido antes del Ordovícico tardío, ya que la foliación es afectada por intrusivos no deformados de edad \sim 450 Ma, asumiendo esta edad como el límite superior en el constreñimiento del metamorfismo (Estrada-Carmona *et al.*, 2012). Weber *et al.* (2018) obtuvieron edades ordovícicas (\sim 457 y \sim 444 Ma) en anfibolitas, y sugirieron que el evento metamórfico es contemporáneo con la formación de los intrusivos ordovícicos. La edad de cristalización para protolitos ígneos ha sido calculada en \sim 1.0 Ga (Weber *et al.*, 2018).

Skarn de los distritos mineros Tatatila-Las Minas

Los distritos mineros Tatila-Las Minas corresponden a dos concesiones mineras adquiridas por Chesapeake Gold Corp y Mexican Gold Corp, en el estado de Veracruz, México. La estructura principal es un skarn de óxido-hierro-oro-cobre, cuya edad K-Ar del intrusivo de la Provincia Alcalina Mexicana del Este (EMAP, por sus siglas en inglés) es de aproximadamente 11 Ma (Negendank *et al.*, 1985). De acuerdo con los estudios realizados por Chesapeake Gold Corp (2007), el complejo intrusivo principal tiene un diámetro de más de 10 km y consiste en granodioritas, cuarzo-dioritas y granitos. Tatatila es un distrito minero formado por actividad metasomática e hidrotermal durante el emplazamiento de intrusivos en rocas carbonatadas. La mineralización es principalmente por skarn, remplazamiento polimetálico y localmente vetas mesotermales. Se han identificado tres tipos de depósitos relacionados a diferentes niveles y zonas de sistemas de skarn: 1) contacto controlado por skarn de granate y magnetita, 2) skarn de sílice jasperoidal y magnetita, y 3) exoskarn controlado estructuralmente. Dorantes-Castro (2016) documentó una paragénesis de alta temperatura en el distrito minero Las Minas para la parte proximal (endoskarn) constituida por granate, piroxeno, cuarzo, cobre y oro, cuya mena está compuesta de magnetita, calcopirita, bornita y oro asociado del tipo hierro-óxido-cobre-oro (IOCG, por sus siglas en inglés).

Skarns del distrito minero Peña Colorada

Peña Colorada es un depósito de hierro magmático-hidrotermal, de tipo magnetita-apatito, cuya mineralización es producto de numeros eventos magmáticos e hidrotermales (Camprubí y Canet, 2009). Camprubí *et al.* (2011) estimaron una edad de 63.26 a 48.2 Ma a partir de dataciones Ar-Ar en feldespato potásico para este depósito. De acuerdo con Camprubí y Canet (2009), los eventos pueden ser agrupados de los más antiguos a los más jóvenes en: 1) intrusión de microgranitos; 2) skarn estratoligado estéril (sin mineral de mena) u otras rocas similares al skarn, que no están en contacto con los intrusivos; 3) depósito diseminado; 4) depósitos masivos que contienen fragmentos de granate remplazados por feldespato potásico; 5) brecha polimíctica y vetas asociadas; 6) intrusión de diques con pequeñas asociaciones estériles con forma de skarn con asociaciones de granate y piroxeno. El granate está presente en hornfels de piroxeno y granate en la zona de contacto, y en skarns producto de metasomatismo, formados a partir de calizas y margas del Miembro Medio Telpacaltepec (Zurcher *et al.*, 2001).

1.4. Secuencias clásticas

Cuenca Otlaltepec

La Cuenca Otlaltepec es expuesta en los alrededores de Santo Tomas Otlaltepec y está compuesta por una sucesión de sedimentos clásticos de mas de 2000 m de espesor (Martini *et al.*, 2018). A lo largo del límite sureste la Cuenca de Otlaltepec yace discordantemente sobre el Complejo de Acatlán y el plutón de Totoltepec. La cuenca puede ser dividida en cuatro unidades que son de la base a cima: la Formación Tianguistengo; Formación Piedra Hueca; Formación Otlaltepec y; Formación Magdalena (Morán-Zenteno *et al.*, 1993; Verde-Ramírez 2016).

Martini *et al.* (2018) documentó la presencia de granates detríticos en los sedimentos de la Formación Piedra Hueca y Otlaltepec, las cuales describe como suseciones de areniscas que varían de composición feldespatocuarzosa a cuarzofeldespática y feldespatocuarzosa a cuarzoarenita, respectivamente. Los estudios de química mineral relacionan los granates detríticos de estas dos formaciones con los granates de los Complejos Acatlán y Oaxaqueño (Martini *et al.*, 2018).

Área de Cerro Pelón

En el área de Cerro Pelón, al sur del Golfo de México, afloran suseciones de edad paleogena (Benavides, 1950; Acevedo, 1962; López-Ortiz, 1962; Meneses-Rocha, 2001; Padilla y Sánchez, 2007; Mandujano and Keppie, 2009; Ortega-Flores *et al.*, 2018). Las rocas del Oligoceno son divididas en las formaciones La Laja y Depósito (Acevedo, 1962). La Formación La Laja está compuesta de lutitas y margas intercaladas con areniscas de grano fino del Oligoceno inferior (Acevedo, 1962). La Formación Depósito está compuesta de reniscas de grano grueso a medio y calizas del Oligoceno superior (Acevedo, 1962). Ortega-Flores *et al.* (2018) realizaron estudios de procedencia e identificaron que la Sutura de Guatemala fue la fuente principal de los sedimentos de la Formación Depósito, con una contribucion menor del Complejo Macizo de Chiapas.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en este trabajo se divide en tres etapas: 1) selección y preparación de las muestras; 2) microanálisis por LA-ICP-MS, y 3) reducción de datos. De acuerdo con el objetivo de esta tesis se seleccionaron muestras que contenían granate correspondientes a rocas del basamento del sur de México y Guatemala, así como de yacimientos de skarn, sumando un total de 32 muestras (Figura 2.1). Los granates con diámetro menor a 1 cm fueron separados de la roca y montados en resina epóxica y algunos se analizaron en secciones delgadas pulidas. Por el contrario, los granates con diámetro mayor a 2 cm, fueron pulidos para ser colocados directamente en las celdas de ablación. Se sugiere seguir la metodología empleada en rocas y granates metamórficos para el tratado de rocas y granates detríticos.

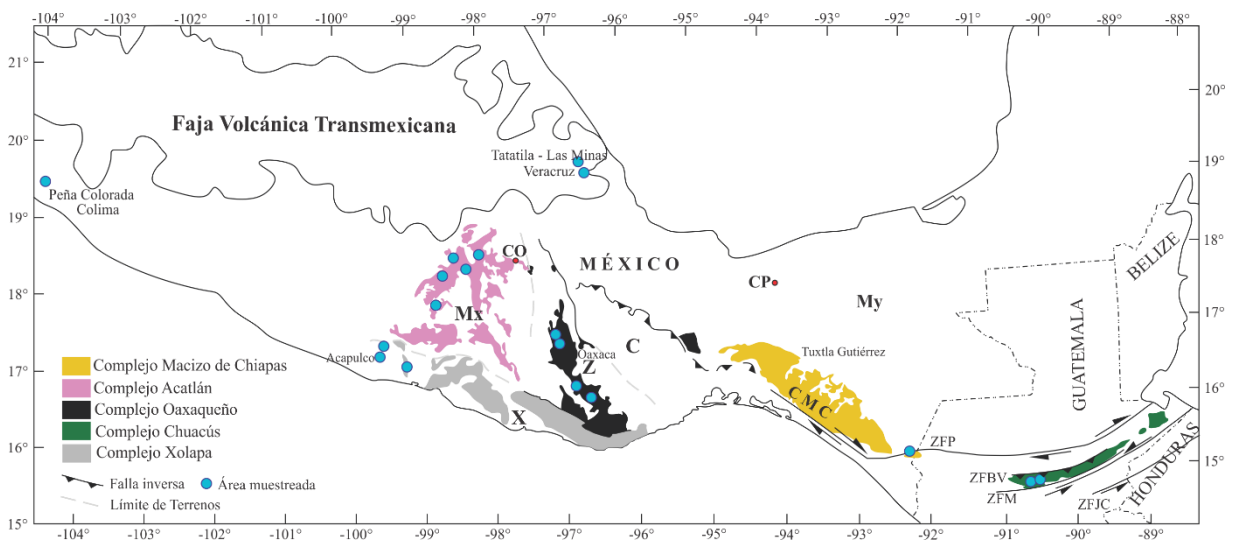


Figura 2. 1 Mapa geológico de los complejos metamórficos del sur del México y Guatemala, adaptado en Ortega-Gutiérrez *et al.* (1999), Keppie (2004), Pérez-Gutiérrez *et al.* (2009), Keppie *et al.* (2012), Estrada-Carmona *et al.* (2016b) y Weber *et al.* (2017). Los círculos azules señalan las zonas muestreadas de los complejos. C= Terreno Cuicateco, My=Terreno Maya, Mx= Terreno Mixteca, X=Terreno Xolapa, ZFBV=Zona de Falla Baja Verapaz, ZFJC=Zona de Falla Jocotán-Chamalecón, ZFM=Zona de Falla Motagua, ZFP=Zona de Falla Polochic, Z=Terreno Zapoteco. Los círculos pequeños de color rojo indican la ubicación de la Cuenca Otlaltepec (CO) y el área de Cerro Pelón (CP), donde se ha reportado química de granate (Martini *et al.*, 2016; Ortega-Flores *et al.*, 2018).

2.1. Selección y preparación de muestras

Es importante destacar que la mayoría de las muestras analizadas en este trabajo ya han sido estudiadas previamente por otros autores (Tabla 2.1). En tales trabajos se reporta información petrográfica, geocronológica e historia térmica, la cual fue utilizada para la interpretación de los resultados. El criterio principal para la selección de las muestras fue que las rocas presentaran granate y que cubrieran, en lo posible, la gran variedad litológica que existe en los complejos metamórficos.

Se prepararon un total de 10 secciones delgadas pulidas por el método convencional. Un total de 20 muestras se trituraron, posteriormente se separaron los granates y se montaron en probetas con resina epóxica. Las probetas de resina fueron pulidas y posteriormente lavadas en baño ultrasónico. Las probetas fueron desvastadas hasta descubrir los granates a la mitad. Sin embargo, debido a la variedad de tamaños de cristales, no todos quedaron expuestos exactamente a la mitad. Las muestras con cristales de tamaño mayor a 2 cm (Figura 2.2) solo fueron pulidas y lavadas en baño ultrasónico. Para el total de muestras, se realizaron 768 microanálisis en 341 cristales de granate.

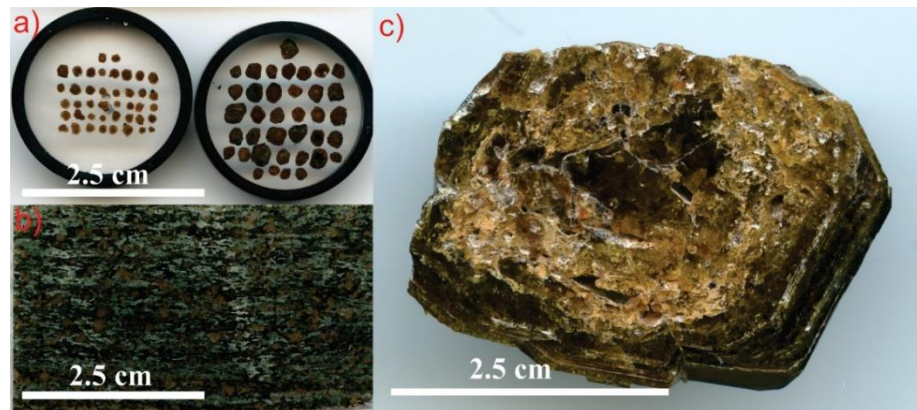


Figura 2. 2 Procesamiento de las muestras para su posterior análisis por LA-ICP-MS: a) cristales separados y montados en resina epoxica, b) secciones delgadas, c) cristales de tamaño mayor a 2 cm pulidos con lijas abrasivas.

Tabla 2.1 Lista de muestras analizadas

Muestra	Complejo	Localidad	Tipo de roca	Diámetro de cristales / Preparación	Autor
PZ2	Acatlán	Ixcamilpa (Puebla)	Eclogita	0.2 - 1.4 mm / lámina	Ramos-Arias (no publicado)
PX-02	Acatlán	Chazumba (Puebla)	Micaesquisto	1 - 2 mm / lamina	Este trabajo
PX-13b	Acatlán	Ixcamilpa (Puebla)	Eclogita	0.2 - 1.6 mm / lámina	Ramos-Arias (no publicado)
PX-15	Acatlán	Ixcamilpa (Puebla)	Eclogita	~ 0.5 mm/ lámina	Ramos-Arias (no publicado)
OR-02	Acatlán	Santa Cruz Organal (Puebla)	Eclogita	0.1 - 0.5 mm / lámina	Este trabajo
3II9D	Acatlán	Piactla (Puebla)	Eclogita	1 - 4 mm / probeta de resina	Estrada-Carmona <i>et al.</i> , (2016)
229D	Acatlán	Asís (Puebla)	Eclogita	1 - 2 mm / probeta de resina	Estrada-Carmona <i>et al.</i> , (2016)
OL-102	Acatlán	Olinalá (Guerrero)	Gneises	3 - 6 mm / lámina	Ortega-Obregón (2011)
OL-96	Acatlán	Olinalá (Guerrero)	Para-gneises	0.2 - 0.3 mm / lámina	Ortega-Obregón (2011)
OL-218	Acatlán	Olinalá (Guerrero)	Anfibolita	0.2 - 0.3 mm / lámina	Ortega-Obregón (2011)
OL-216	Acatlán	Olinalá (Guerrero)	Anfibolita	~ 0.3 mm / lámina	Ortega-Obregón (2011)
OL-104b	Acatlán	Olinalá (Guerrero)	Gneises	0.3 - 0.8 mm / lámina	Ortega-Obregón (2011)
PX	Acatlán	Los Amates (Puebla)	Micaesquisto	4 - 5 mm / lámina	Martini (no publicado)
OC-1008	Oaxaqueño	Carretera Nochistlán - Oaxaca (Oaxaca)	Granulita	0.3 - 1.3 mm / probeta de resina	Solari <i>et al.</i> , (2012)
OC-1017	Oaxaqueño	Carretera Ejutla - Miahuatlan (Oaxaca)	Granulita metapelita	0.5 - 1.2 mm / probeta de resina	Solari <i>et al.</i> , (2012)
OC-1014	Oaxaqueño	Ejutla (Oaxaca)	Granulita	0.3 - 1 mm / probeta de resina	Solari <i>et al.</i> , (2012)
OC-1006	Oaxaqueño	Carretera Nochistlán (Oaxaca)	Gneis granulítico	0.3 - 1.2 mm / probeta de resina	Solari <i>et al.</i> , (2012)
VS-4	Oaxaqueño	Ejutla (Oaxaca)	Pegmatita	0.3 - 1 mm / probeta de resina	Shchepetilnikova, (2018)
VS-1	Oaxaqueño	Ejutla (Oaxaca)	Pegmatita	0.5 - 1.5 mm / probeta de resina	Shchepetilnikova, (2018)
GT-0318	Chuacús	Pachalum - El Chol (Sierra de Chuacús Guatemala)	Para-gneises	0.3 - 0.5 mm / probeta de resina	Solari <i>et al.</i> , (2011)

Muestra	Complejo	Localidad	Tipo de roca	Diámetro de cristales / Preparación	Autor
GT-0315	Chuacús	Pachalum - El Chol (Sierra de Chuacús Guatemala)	Pegmatita	0.3 - 0.5 mm / probeta de resina	Solari <i>et al.</i> , (2011)
GT-0320	Chuacús	Pachalum - El Chol (Sierra de Chuacús Guatemala)	Ortogneis	0.2 - 0.3 mm / probeta de resina	Solari <i>et al.</i> , (2011)
GT-0309	Chuacús	Pachalum - El Chol (Sierra de Chuacús Guatemala)	Paragneis	0.2 - 0.5 mm / probeta de resina	Solari <i>et al.</i> , (2011)
XO-03	Xolapa	Acapulco (Guerrero)	Ortogneis	0.2 - 0.3 mm / lámina	Este trabajo
XO-0222	Xolapa	Acapulco (Guerrero)	Pegmatita en migmatitas	0.3 - 0.4 mm / probeta de resina	Estrada-Carmona <i>et al.</i> , (2016)
XO-0230	Xolapa	Acapulco (Guerrero)	Ortogneis migmatítico	0.3 - 0.5 mm / probeta de resina	Estrada-Carmona <i>et al.</i> , (2016)
XO-0214	Xolapa	Acapulco (Guerrero)	Ortogneis	0.3 - 0.5 mm / probeta de resina	Perez-Gutiérrez <i>et al.</i> , (2009)
XO-0201	Xolapa	Acapulco (Guerrero)	Granito	0.2 - 0.3 mm / probeta de resina	Hernández-Pineda <i>et al.</i> , (2006)
XO-0505	Xolapa	Acapulco (Guerrero)	Pegmatita en gneis	0.2 - 0.3 mm / probeta de resina	Hernández-Pineda <i>et al.</i> , (2006)
CH-705	Macizo De Chiapas	Motozintla (Chiapas)	Granito	~ 0.1 mm / probeta de resina	Pompa-Mera, (2009)
5-S	Tatatila-Las Minas	Las Minas (Veracruz)	Skarn	5 - 8 mm / probeta de resina	González-Partida (no publicado)
N-M	Tatatila-Las Minas	Tatatila (Veracruz)	Skarn	4 - 7 mm / probeta de resina	González-Partida (no publicado)
DR	Tatatila-Las Minas	Las Minas (Veracruz)	Skarn	6 - 9 mm / probeta de resina	González-Partida (no publicado)
GV	Tatatila-Las Minas	Tatatila (Veracruz)	Skarn	~1.5 cm / directo	González-Partida (no publicado)
SC	Tatatila-Las Minas	Las Minas (Veracruz)	Skarn	~5 mm / probeta de resina	González-Partida (no publicado)
GG-PC	Peña Colorada	Minatitlán (Colima)	Skarn	~3.5 cm / directo	Levresse (no publicado)

Secciones delgadas pulidas

Las secciones delgadas pulidas se prepararon en el Taller de Laminación del Centro de Geociencias. El proceso de preparación inicia con el corte de la muestra tomando de referencia el tamaño y forma del portaobjetos de vidrio (3.5x5 cm). La muestra es pulida con polvos abrasivos del número 400, 600, y 1000. Los restos de abrasivo son removidos de la muestra con agua y, posteriormente la muestra se seca en una plancha de calor. El portaobjetos se pule con el abrasivo número 600, se lava para remover restos de abrasivo y se seca. Posteriormente, la parte pulida de la muestra se pega con resina a la cara abrasionada del portaobjetos. La otra cara de la muestra se desbasta hasta alcanzar un grosor cercano a 50 μm . Finalmente, la lamina es pulida con abrasivos más finos para obtener mejores resultados al momento de realizar la ablación.

Separación mineral

La separación de cristales inicia con la trituración de la muestra utilizando una prensa hidráulica de discos. La roca triturada se tamiza para separar los cristales que pasen por la malla #35 de abertura cercana a 0.5 mm (en el caso de las rocas que contienen cristales pequeños). Para las rocas que contenían cristales de mayor tamaño se utilizó la fracción que no pasó dicha malla. Posteriormente, se concentró la fracción de minerales pesados utilizando una batea. También se empleó un separador magnético Frantz, ya que el granate se encuentra dentro de la fracción de minerales magnéticos desde 0.1 a 0.6 A. Sin embargo, la mayoría de los granates fueron concentrados de la fracción de 0.2-0.4 A. Una vez separados, los cristales son manipulados con pinzas de precisión bajo un microscopio estereoscópico.

Se seleccionaron entre 20 y 30 cristales individuales de granate, seleccionando aquellos que estuvieran más completos y con el menor número de inclusiones, esto con la finalidad de analizar bordes y núcleos y que los análisis no se vieran afectados por impurezas. Se montaron en resina epóxica y posteriormente se pulieron con lijas de carburo de silicio de #800, 1500, 2500 y 3000 hasta dejar una superficie plana, aproximadamente a la mitad de los cristales, suficientemente grande para la ablación.

2.2. Microanálisis LA-ICP-MS

Los microanálisis se realizaron en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) del Centro de Geociencias con un sistema de ablación láser de excímeros (ArF) con longitud de onda de 193 nm modelo Resolution M-50 de la marca Resonetics LLC (Figura 2.3 a). El aerosol, producto de la ablación, se analizó en un espectrómetro de masas de analizador cuadrupolar con plasma acoplado por inducción (Q-ICP-MS) modelo iCAP Qc de Thermo Scientific™ (Figura 2.3 b).

Se utilizaron dos estándares naturales de granate: USMN 87375 y AS1300AB (Jarosewich *et al.*, 1980). Adicionalmente se utilizaron los estándares de vidrio MPI-DING ATHO G y KL2 G (Jochum *et al.*, 2006), y el vidrio sintético NIST 612 (Jochum *et al.*, 2011), que también fue utilizado para la optimización del espectrómetro de masas.

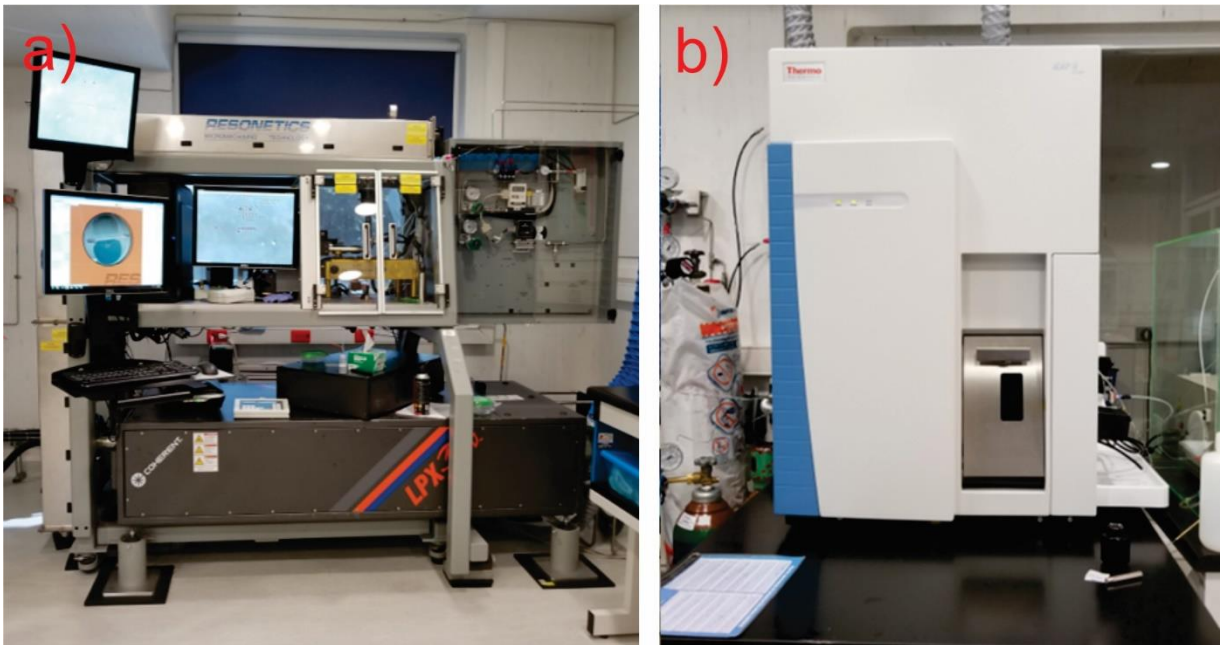


Figura 2. 3 Fotografías del equipo del LEI utilizado para realizar los microanálisis de elementos mayores y traza de granate. a) El sistema de ablación compuesto por un láser de excímeros (ArF), b) espectrómetro de masas (Q-ICP-MS) modelo iCAP Q.

La optimización del espectrómetro de masas (posición de la antorcha, voltaje de lentes electromagnéticas, flujo de gases y otros) se realizó ablacionando a lo largo de una línea en el vidrio NIST 612 con un diámetro de haz de láser de 80 μm , a una tasa de repetición de 10 Hz y una velocidad de desplazamiento de platina de 5 mm/min. El aerosol producto de la ablación es transportado al espectrómetro de masas con un flujo de gases de cerca de ~ 800 mL/min de Ar (gas de nebulización), 350 mL/min de helio. Generalmente, se utiliza además un flujo de 4 mL/min de N_2 , sin embargo, para estos análisis no fue aplicado debido a la posibilidad de generar un mayor número de interferencias isobáricas. La optimización se alcanza cuando se obtiene una señal cercana a 1.0×10^6 cps de ^{238}U , una relación $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ entre 1.05 y 1.1 y óxidos de Th $< 1\%$ ($^{232}\text{Th}^{16}\text{O}/^{232}\text{Th} < 0.01$).

Las condiciones de operación, durante la ablación de los cristales de granate, están detalladas en la Tabla 2.2. La selección de los isótopos analizados se hizo para evitar interferencias con masas atómicas similares y los de menor abundancia para los elementos abundantes en el granate (ver Tabla 2.3).

Tabla 2. 2 Condiciones operatorias del sistema LA-ICP-MS para los análisis isotópicos de los cristales de granate.

Láser		ICP-MS	
Marca:	Resonetics	Marca:	Thermo Scientific™
Modelo:	Resolution M-50	Modelo:	iCAP™ Q ICP-MS
Tipo de Láser:	Excimero ArF	Tipo:	Cuadrapolo
Longitud de onda:	193 nm	Potencia:	1500 W
Tiempo de pulso:	23ns	Flujo de Ar (para enfriamiento):	14 L/ min
Desmagnificación:	15X	Flujo de Ar (para transporte):	0.8 L/ min
Tamaño de spot:	60 μm	Flujo de Ar (auxiliar):	~ 0.8 L/ min
Densidad de energía:	6 J cm^2		
Energía de láser usada:	120-140 mJ		
Tasa de repetición:	5 hz		
Flujo de He:	350 mL/min		

Tabla 2. 3 Isótopos analizados y tiempos de adquisición para los análisis de granate.

Isótopos analizados	Tiempo de adquisición (ms)	Isótopos analizados	Tiempo de adquisición (ms)
⁷ Li	30	⁹⁶ Zr	30
⁹ Be	30	¹³⁹ La	30
²³ Na	15	¹⁴⁰ Ce	30
²⁵ Mg	15	¹⁴¹ Pr	30
²⁷ Al	15	¹⁴⁶ Nd	30
²⁹ Si	5	¹⁴⁷ Sm	30
³¹ P	3	¹⁵³ Eu	30
³⁹ K	10	¹⁵⁷ Gd	30
⁴³ Ca	10	¹⁵⁹ Tb	30
⁴⁴ Ca	10	¹⁶³ Dy	30
⁴⁵ Sc	30	¹⁶⁵ Ho	30
⁴⁹ Ti	30	¹⁶⁶ Er	30
⁵¹ V	30	¹⁷² Yb	30
⁵² Cr	30	¹⁷⁵ Lu	30
⁵⁵ Mn	15	¹⁷⁹ Hf	30
⁵⁷ Fe	20	¹⁸¹ Ta	10
⁵⁹ Co	30	²⁰² Hg	30
⁶⁰ Ni	30	²⁰⁴ Pb	30
⁶⁶ Zn	30	²⁰⁶ Pb	30
⁶⁹ Ga	30	²⁰⁷ Pb	30
⁷² Ge	30	²⁰⁸ Pb	30
⁸⁹ Y	30	²³² Th	30
⁹³ Nb	30	²³⁸ U	30

2.3.Reducción de datos

La reducción de los datos consiste en el procesamiento de datos obtenidos en el Icap Q en cuentas por segundo (cps) para estimar las concentraciones en unidades de concentración conocidas (ppm, % peso, etc.). El procesamiento de los datos se realizó utilizando los esquemas de reducción de datos (DRS, por sus siglas en inglés) Trace_Elements y X_Trace elements_IS que operan dentro del software Iolite v3.3 (Paton *et al.*, 2010; 2011; 2014), una aplicación desarrollada para IGOR PRO v7. El procesamiento inicia con la selección del blanco y la señal analítica. Aunque se evitó analizar áreas que contuvieran inclusiones, durante la selección de la señal se descartaron los valores atípicos que pudieran indicar la presencia de impurezas. El blanco corresponde a la señal de fondo que se obtiene de la atmósfera generada en las celdas de ablación y es restado al total de señal obtenida (Figura 2.4). Debido a que durante una sesión de análisis puede variar la detección del espectrómetro de masas (deriva instrumental), Iolite realiza una corrección mediante “el mejor ajuste”, a partir de la concentración de los elementos en un estándar. Se utilizó el Si como estándar interno, ya que, dentro de la estructura del granate su proporción es casi constante (~33 a 40 % en los granates estudiados). El estándar de granate natural USMN-87376 se utilizó como estándar primario externo para el cálculo de elementos mayores. En la misma secuencia se analizó el estándar de granate natural AS1300AB (Jarosewich *et al.*, 1980) como estándar secundario. Una vez estimada la concentración de los elementos mayores (Si, Al, Ca, Fe, Mg, Mn, Cr y Ti), se calculó la concentración de los elementos traza usando el estándar KL2 G.

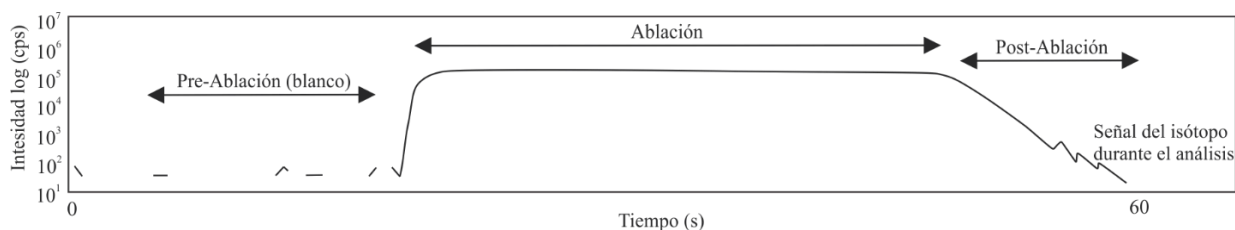


Figura 2. 4 Imagen de la señal obtenida durante un análisis de LA-ICP-MS, donde se indica la porción que corresponde a la señal obtenida del material ablacionado y al blanco analítico.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

3.1. Elementos mayores

La concentración de elementos mayores de los granates se expresa en términos de porcentaje de óxidos. Los resultados de elementos mayores normalizados y la concentración de elementos traza, se muestran en el apartado de Anexos (1, 2, 3, 4, 5 y 6). La información es presentada en diagramas ternarios basados en la proporción molar de los componentes ideales (Fe, Mg, Mn y Ca) que representan la nomenclatura del grupo del granate: almandino (Alm), piropero (Py), espesartina (Sps) y grosularia (Grs) (Figura 3.1)

Los granates estudiados del Complejo Acatlán presentan proporciones molares de los componentes ideales de Alm₍₄₁₋₈₂₎, Grs₍₄₋₄₀₎, Sps_(0.2-22), Py₍₁₋₁₃₎ (Figura 3.1 b). De acuerdo al tipo de roca al que pertenecen los granates de este complejo, las proporciones pueden ser separadas en: eclogita [Alm₍₅₇₋₇₀₎, Grs₍₂₁₋₃₃₎, Sps₍₁₋₅₎, Py₍₂₋₁₂₎], gneis [Alm₍₄₁₋₈₂₎, Grs₍₄₋₄₀₎, Sps₍₁₋₂₂₎, Py₍₁₋₁₃₎], anfibolita [Alm₍₅₇₋₆₇₎, Grs₍₂₁₋₃₃₎, Sps₍₅₋₁₄₎, Py₍₂₋₇₎] y esquisto [Alm₍₅₉₋₇₈₎, Grs₍₁₈₋₂₆₎, Sps₍₁₋₁₈₎, Py₍₂₋₅₎].

Los resultados mostraron que los granates del Complejo Xolapa tienen proporciones molares de componentes ideales de Alm₍₅₄₋₇₄₎, Grs₍₄₋₃₄₎, Sps₍₄₋₂₆₎, Py₍₁₋₁₁₎. Las proporciones de los granates de este complejo agrupadas por tipos de roca son: gneis [Alm₍₆₁₋₇₄₎, Grs₍₁₉₋₂₉₎, Sps₍₄₋₁₈₎, Py₍₃₋₅₎], pegmatita [Alm₍₆₄₋₇₁₎, Grs₍₅₋₆₎, Sps₍₂₁₋₂₆₎, Py₍₁₋₁₁₎], granito [Alm₍₅₄₋₅₇₎, Grs₍₂₀₋₃₄₎, Sps₍₁₀₋₂₄₎, Py₍₁₋₃₎].

Las proporciones molares de componentes ideales de los granates del Complejo Chuacús son Alm₍₅₂₋₇₀₎, Grs₍₁₉₋₃₇₎, Sps₍₁₋₁₅₎, Py₍₁₋₁₀₎. Las litologías a las que pertenecen los granates estudiados permitieron agrupar las proporciones en: gneis [Alm₍₅₂₋₇₀₎, Grs₍₁₉₋₃₇₎, Sps₍₁₋₁₅₎, Py₍₁₋₁₀₎], pegmatita [Alm₍₆₀₋₇₀₎, Grs₍₂₁₋₃₂₎, Sps₍₃₋₆₎, Py₍₃₋₄₎].

Las proporciones molares de componentes ideales de los granates del Complejo Oaxaqueño fueron Alm₍₇₀₋₇₇₎, Grs₍₂₋₉₎, Sps₍₁₋₂₎, Py₍₁₅₋₂₇₎. Las proporciones de los granates por litología a la

que pertenecen son: granulita [Alm₍₇₀₋₇₇₎, Grs₍₂₋₆₎, Sps₍₁₋₂₎, Py₍₁₉₋₂₇₎], pegmatita [Alm₍₇₀₋₇₆₎, Grs₍₄₋₉₎, Sps₍₁₋₂₎, Py₍₁₅₋₂₅₎], gneis [Alm₍₇₂₋₇₅₎, Grs₍₃₋₄₎, Sps_(~1), Py₍₂₀₋₂₃₎].

Los granates de skarn no son presentados en términos de sus componentes ideales ya que presentan bajas concentraciones de Al, Mn y Mg (Figura 3.1 m) y son clasificados como granate andradita en donde el Al⁺³ es sustituido por Fe⁺³ en el sitio Y, y el Ca ocupa el sitio X.

La diferenciación de las proporciones molares de componentes ideales por complejo metamórfico pueden ser diferenciadas en cuatro tipos de granate: Tipo I) granates de Alm (41-82.2%) con moderada a baja proporción de Grs (4.2-40.1%) y Sps (0.2-26.5%), y bajas proporciones de Py (0.4-13.4); Tipo II) granates de Alm (70.2-76.9%) con moderadas a bajas proporciones de Py (14.4-27.1%), y proporciones bajas de Grs y Sps que varían de 1.7 a 9.1% y 0.7 a 2.4% respectivamente; Tipo III) granates de Alm (45-50.4%) y Sps (45.7-50.6%) con proporciones muy bajas de Py (2.2-2.6%) y Grs (0.9-1.3%); Tipo IV) granates de andradita (And) (Figura 3.1 a y g). Los granates analizados de los complejos Acatlán, Xolapa y Chuacús corresponde al Tipo I, los del Complejo Oaxaqueño son del Tipo II, los del Complejo Macizo de Chiapas conforman el Tipo III, y los granates de skarn el Tipo IV.

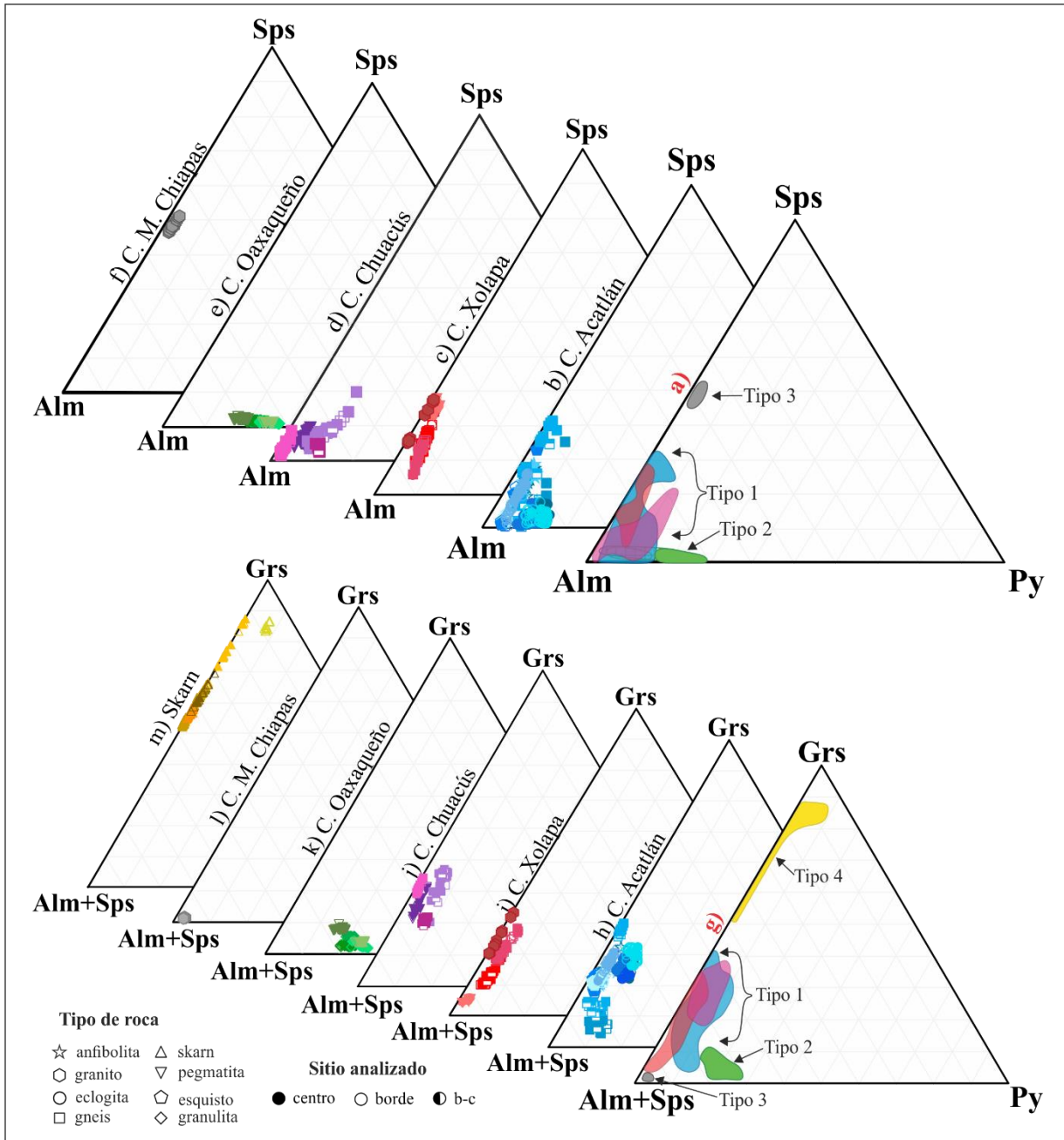


Figura 3. 1 Diagramas ternarios de componentes ideales de granate. Los diferentes colores dentro de cada complejo indican las distintas muestras analizadas. **a– f)** diagramas basados en la proporción de Alm (almandino) – Sps (espesartina) – Py (piropo). **g - m)** diagramas basados en la proporción de Alm – Sps (almandino + espesartina) – Grs (grosularia) – Py (piropo). Los granates de los complejos Acatlán, Chuacús y Xolapa en ambas configuraciones forman campos que se traslapan entre sí (granates Tipo I). Las muestras del C. Oaxaqueño contienen mayor proporción de Py que el resto de los granates de los otros complejos (granates Tipo II). Los granates del CMC muestran proporciones de Alm y Sps similares (granates Tipo III). Los granates de skarn son de tipo andradita, en cuya estructura el Fe ocupa el sitio del Al, pero son graficados en este diagrama como comparación y conforman el Tipo IV.

3.2. Elementos traza

Los elementos traza fueron graficados en diagramas bivariantes contra SiO₂ (% en peso), con la finalidad de caracterizar su comportamiento e identificar las posibles diferencias entre los granates de los distintos complejos metamórficos. Se eligió graficar contra SiO₂ debido a que su composición es poco variable (33-40 % en peso), permitiendo una mejor diferenciación de la composición de elementos traza de cada complejo. A continuación, los elementos traza son descritos con base al sitio que pueden ocupar en la estructura cristalina del granate de acuerdo con la nomenclatura propuesta por Grew *et al.* (2013): X (Y); Y (V, Cr, Sc, Ga, Ti, Zr); Z (Ge, Zn, Li). El Co no es asignado a ningún sitio en la nomenclatura pero es presentado porque se observaron concentraciones significativas como las de otros elementos traza mencionados. Otros elementos traza (p. ej., Na, P, K, Nb, Th, U, Pb) analizados no fueron considerados ya que sus concentraciones son bajas, incluso por debajo del límite de detección del equipo.

Sitio X (Y)

La concentración de Y de los granates de los complejos Acatlán, Oaxaqueño y Chuacús varían de 9 a 1,300 ppm y definen grupos similares (Figura 3.2 a, b y d). Los granates del Complejo Xolapa tienen un rango muy amplio en cuanto a la concentración de Y (350–3,500 ppm), siendo las muestras XO-0505 (pegmatita) y XO-201 (granito) aquellas con mayor concentración (Figura 3.2 c). Asimismo, los granates del Complejo Macizo de Chiapas tienen una tendencia similar al Complejo Xolapa pero con un rango de 1,400 a 4,000 ppm. (Figura 3.2 f). Los granates de skarn tienen concentraciones bajas de Y que varían de 1 a 120 ppm (Figura 3.2 e).

Sitio Y (V, Cr, Sc, Ga, Ti, Zr)

Los granates de los complejos Acatlán (2–200 ppm), Oaxaqueño (60–310 ppm) y Xolapa (3–160 ppm) presentan concentraciones similares de V (Figura 3.3 a, b y c). Los granates del Complejo Acatlán muestran mayor dispersión, mientras que los de los complejos Oaxaqueño y Xolapa definen una mejor agrupación. Por otro lado, los granates de los complejos Chuacús (10–70 ppm) y Macizo de Chiapas (4–10 ppm) presentan bajas concentraciones y sus rangos presentan menor variación respecto a los anteriores (Figura 3.3 d y f). Los granates de skarn

tienen concentraciones de V que varían en un intervalo mas amplio entre 1–500 ppm (Figura 3.3 e).

Los granates de los complejos Acatlán (2–850 ppm) y Oaxaqueño (20–800 ppm) presentan concentraciones altas de Cr, y forman agrupaciones con una amplia dispersión (Figura 3.3 g y h). Los granates del Complejo Xolapa (2–80 ppm) y la mayoría del Complejo Chuacús (2–140 ppm) tienen concentraciones menores a 100 ppm (Figura 3.3 i). Los granates del Complejo Macizo de Chiapas y de skarn presentan concentraciones relativamente bajas (Figura 3.3 k y l), 1–5 y 1–20 ppm, respectivamente, y forman agrupaciones con menor dispersión; aquellos del Complejo Macizo de Chiapas definen una mejor agrupación.

La concentración de Sc en los granates de los complejos Acatlán (4–160 ppm), Oaxaqueño (40–200 ppm) y Xolapa (10–250 ppm) varía en un rango amplio (Figura 3.4 a, b y c). Los granates del Complejo Chuacús (10–70 ppm) y del Complejo Macizo de Chiapas (70–120 ppm) presentan concentraciones de Sc menores a 120 ppm, y forman grupos menos dispersos a los anteriores (Figura 3.4 d y f). Los granates de skarn presentan bajas concentraciones de Sc (6–20 ppm) y varían en un intervalo relativamente menor (Figura 3.4 e).

En general, la concentración de Ga en los granates estudiados es inferior a 50 ppm (Figura 3.4 g-l). Los granates de los complejos Acatlán, Oaxaqueño y Chuacús forman agrupaciones similares y varían en un rango de 3 a 18 ppm (Figura 3.4 g, h y j). Los granates del Complejo Xolapa tienen concentraciones que varían de 5 a 35 ppm, aunque la mayoría tiene concentraciones de 5 a 15 ppm (Figura 3.4 i). Los granates de skarn presentan concentraciones de Ga (5–50 ppm) que definen un grupo con mayor variación que los complejos anteriores (Figura 3.4 k). Los granates del Complejo Macizo de Chiapas tienen concentraciones que varían en un rango de 25 a 35 ppm (Figura 3.4 l).

El Ti en los granates de skarn y la mayoría del Complejo Acatlán se encuentra en concentraciones menores a 8,000 ppm (Figura 3.5 b); algunos granates de eclogitas, anfibolitas y gneises del Complejo Acatlán llegan a tener hasta 20,000 ppm (Figura 3.5 a). Los granates de los complejos Oaxaqueño y Xolapa forman agrupaciones similares, independientemente del tipo de roca, con concentraciones menores a 400 ppm (Figura 3.5 c y e). Del mismo modo, los granates del Complejo Macizo de Chiapas se agrupan con valores entre 400 y 800 ppm (Figura

3.3 f). El Complejo Chuacús presenta una amplia variación de Ti, sin embargo, se observan agrupaciones que corresponden a las distintas muestras analizadas (Figura 3.6 d).

La concentración de Zr en los granates de los complejos Oaxaqueño (3–40 ppm), Xolapa (1–7 ppm), Chuacús (0.5–8 ppm) y Macizo de Chiapas (10–25 ppm) es inferior a 50 ppm (Figura 3.5 h, i, j y l). Por el contrario, la mayoría de los granates del Complejo Acatlán tienen una concentración menor a 200 ppm, y gran parte de estos inferior a 20 ppm (Figura 3.5 g). Algunos granates de este complejo tienen concentraciones mayores a 200 hasta 700 ppm, sin restringirse a un tipo de roca específico. El Zr en los granates de skarn se encuentra en un intervalo de 4 a 120 ppm (Figura 3.5 k).

Sitio Z (Ge, Zn, Li)

El Ge en los granates de skarn y los complejos Acatlán, Oaxaqueño y Chuacús está presente con valores menores a 20 ppm (Figura 3.6 a, b, d y e). El Complejo Xolapa muestra dos grupos de granates, uno con comportamiento similar a los anteriores (<20 ppm) y otro con un rango de 24 a 34 ppm correspondiente a los granates de una muestra de granito (XO-201; Figura 3.6 c). El Complejo Macizo de Chiapas está definido por un grupo de granates con un rango de 25 a 49 ppm de Ge (Figura 3.6 f).

La concentración de Zn en los granates del Complejo Acatlán varía de 10 a 170 ppm (Figura 3.6 g). Para el Complejo Oaxaqueño se observan dos grupos de granates, uno con una concentración que varía en un rango de 40 a 170 y otro de 220 a 430 ppm (Figura 3.6 h). Los granates de los complejos Xolapa y Chuacús tienen concentración similar en un rango de 20 a 60 ppm, aunque dentro del Complejo Xolapa hay una muestra de pegmatita (XO-0505) con valores de ~100 ppm (Figura 3.6 i y j). La mayoría de los granates de skarn presenta una concentración de Zn inferior a 6 ppm, solo una muestra (GV) presenta valores de 40 a 133 ppm (Figura 3.6k). Los granates del Complejo Macizo de Chiapas definen un grupo cuya concentración de Zn varía de 100 a 140 ppm (Figura 3.6 l).

El Li en los granates del Complejo Acatlán está presente con valores que van de 1 a 35 ppm (Figura 3.7 a). Los granates de los complejos Oaxaqueño y Chuacús, y de skarn forman grupos menos dispersos y su concentración es de 1 a 12 ppm (Figura 3.7 b, d y e). Para el Complejo Xolapa se observan dos grupos, uno con valores de 3 a 27 ppm y otro en un rango de 39 a 95

ppm (Figura 3.7 c). Los granates del Complejo Macizo de Chiapas presentan una concentración de Li que varía de 90 a 150 ppm (Figura 3.7 f).

Finalmente, la concentración de Co en los granates del Complejo Acatlán varía en un rango amplio de 6 a 68 ppm (Figura 3.7 g). Los granates del Complejo Oaxaqueño presentan valores que varían de 10 a 46 ppm (Figura 3.7 h). Los granates de skarn y de los complejos Xolapa y Macizo de Chiapas presentan concentraciones de Co inferiores a 10 ppm (Figura 3.7 i, k y l). La mayoría de los granates del Complejo Chuacús tienen una concentración de Co que varía de 6 a 29 ppm (Figura 3.7 j).

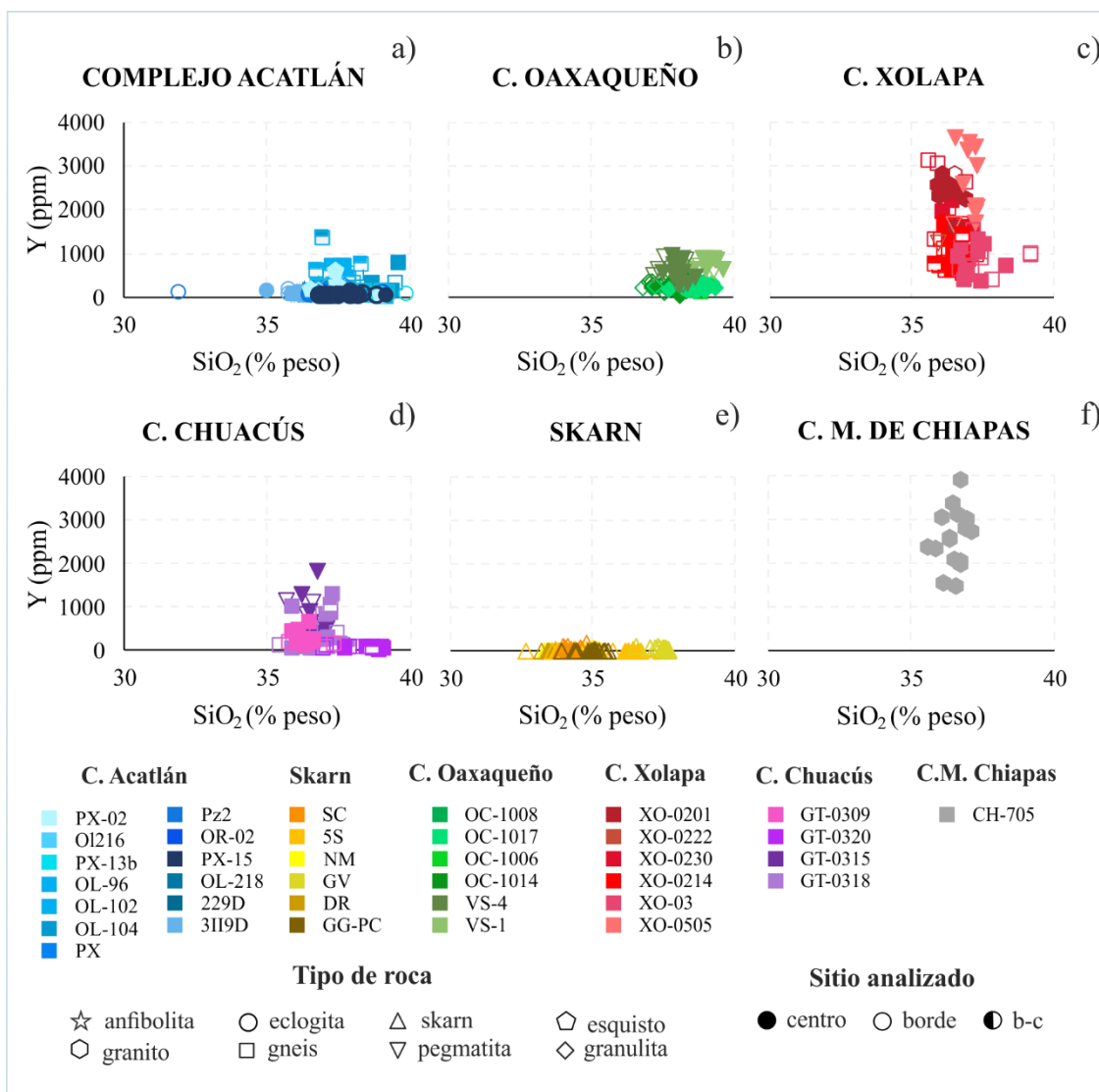


Figura 3. 2 Diagramas bivariados de Y vs SiO₂. Muestra que algunos granates del Complejo Xolapa y los del Complejo Macizo de Chiapas tienen mayor concentración de Y. b-c: sitio analizado entre el borde y centro del cristal.

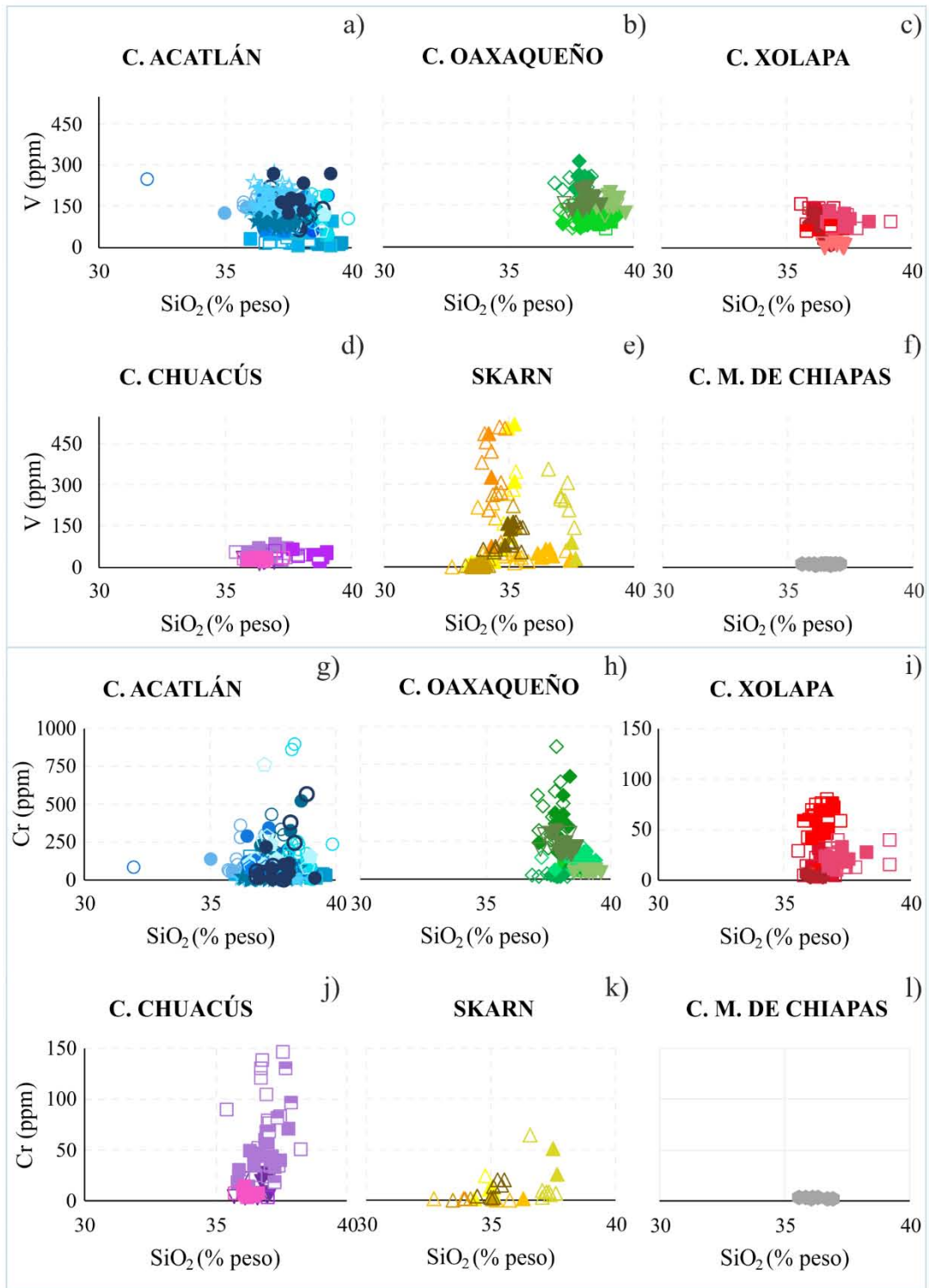


Figura 3.3 Diagramas bivariados de V y Cr vs SiO (simbología como en la Figura 3.2). Los diagramas de Cr de los incisos i, j, k y l se presentan a menor escala que la de los diagramas g y h. Los granates de skarn (e) presentan las concentraciones más altas de V. La composición de V y Cr (f y l) en los granates del Complejo Macizo de Chiapas es baja y homogénea. Los granates del Complejo Oaxaqueño (h), alcanzan las concentraciones más altas de Cr.

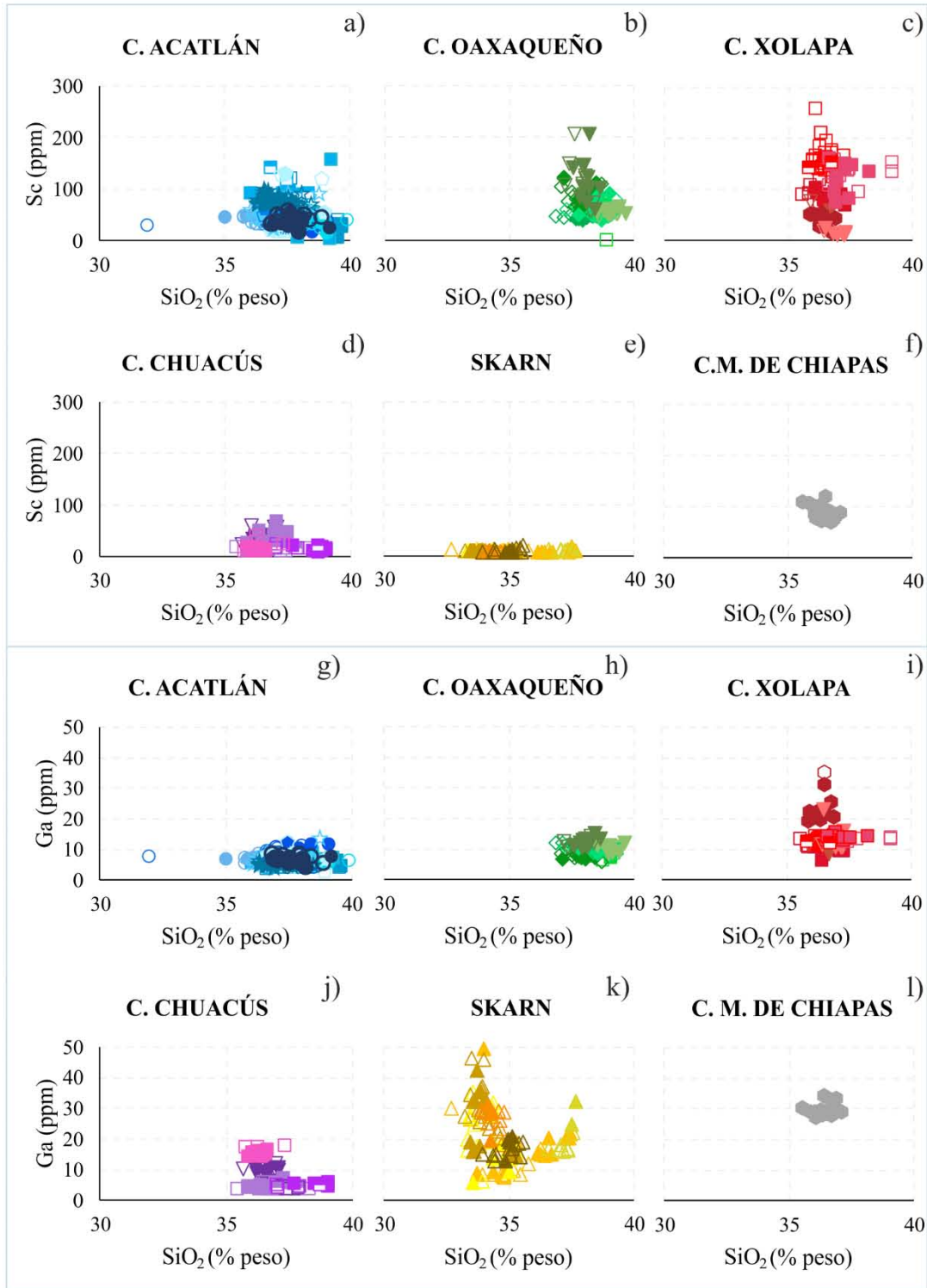


Figura 3.4 Diagramas bivariantes de Sc y Ga vs SiO₂. Los granates del Complejo Xolapa (c) presentan las concentraciones más altas de Sc (simbología como en la Figura 3.2). Las concentraciones de Ga en general son menores que 50 ppm.

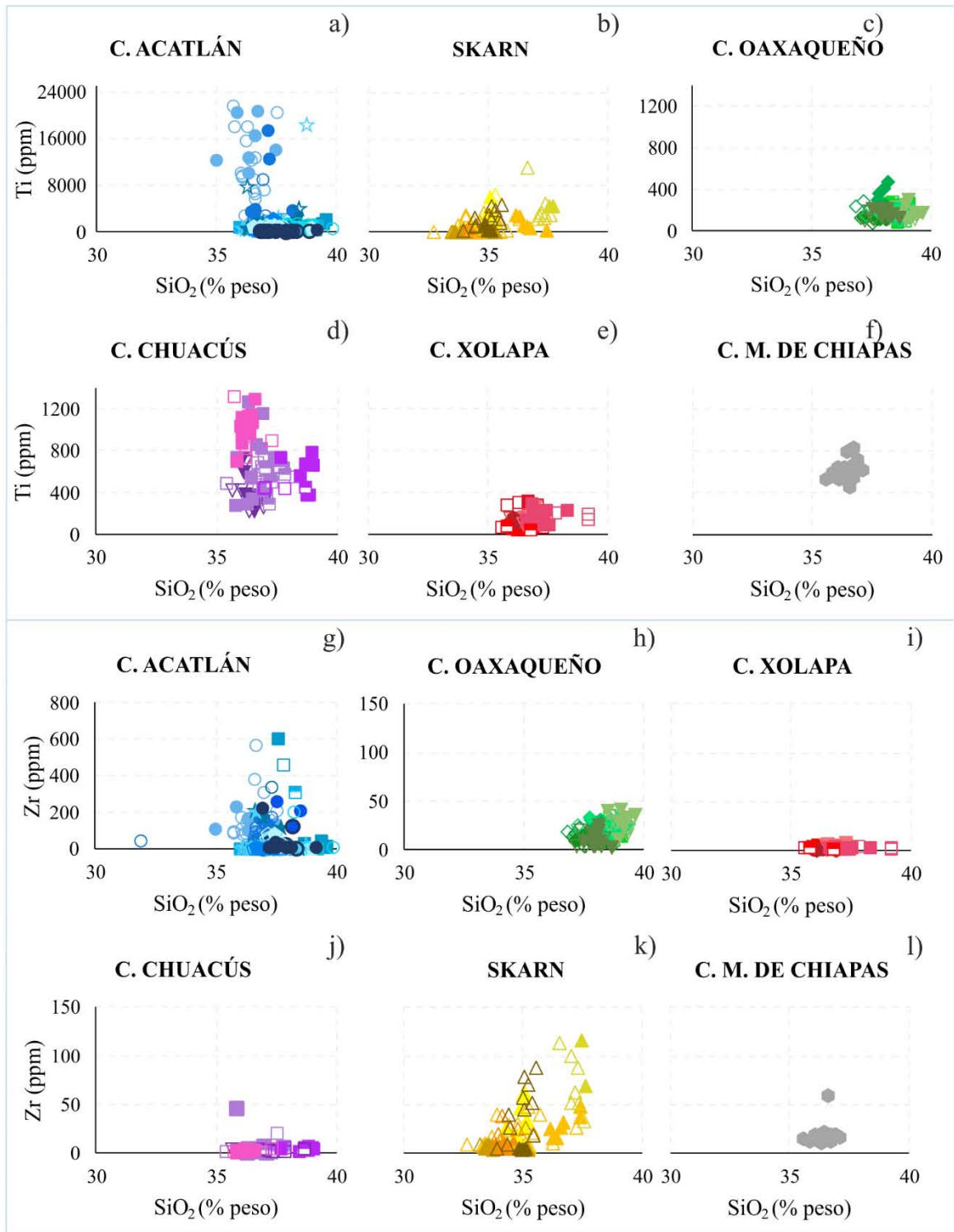


Figura 3.5 Diagramas bivariados de Ti y Zr vs SiO₂ (simbología como en la Figura 3.2). Los diagramas de Ti de los incisos c, d, e y f se presentan a menor escala que la de los diagramas a y b. Un grupo de granates del Complejo Acatlán (a) presenta las concentraciones más altas de Ti. El inciso “a” se presenta con una escala mayor al resto de los diagramas, y representa los granates del C. Acatlán que alcanzan las concentraciones más altas de Zr.

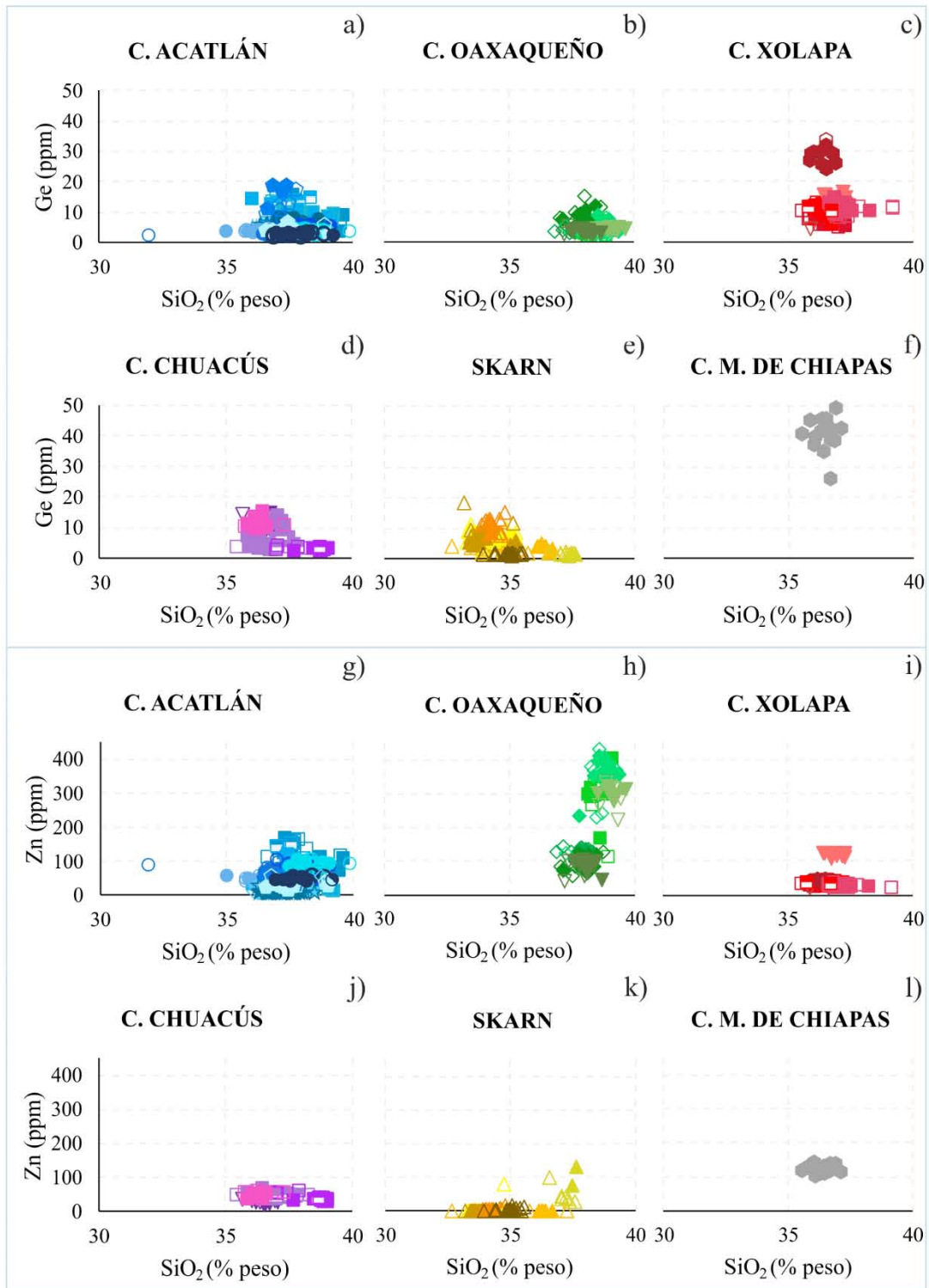


Figura 3.6 Diagramas bivariados de Zn y Ga vs SiO₂ (simbología como en la Figura 3.2). Los granates del Complejo Oaxaqueño (b) forman campos con mayor concentración de Zn. Los granates de los complejos Xolapa y Macizo de Chiapas (f y c) presentan las concentraciones más altas de Ge.

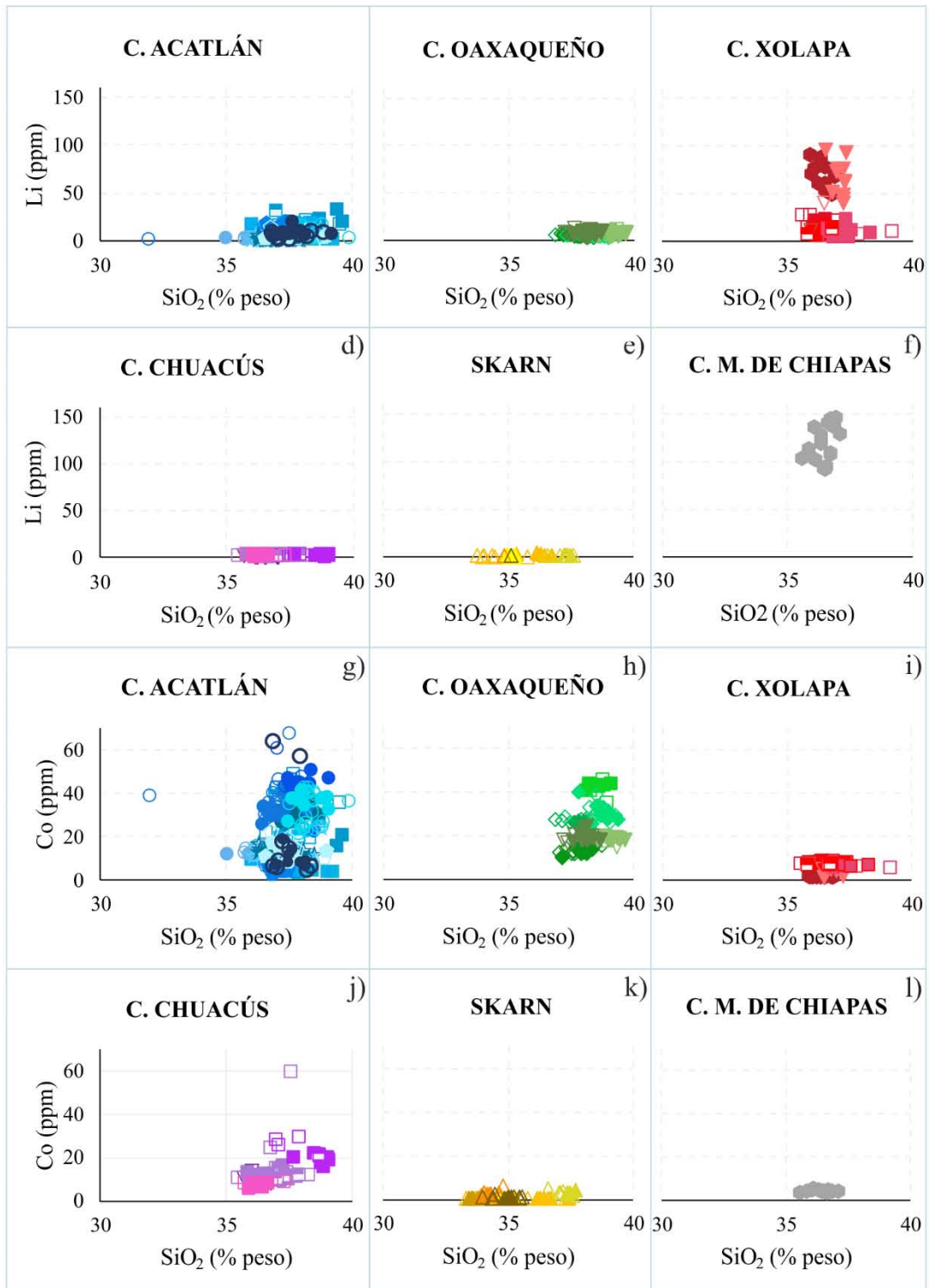


Figura 3.7 Diagramas bivariados de Li y Co vs SiO₂ (simbología como en la Figura 3.2). Los granates de C. Xolapa y M. Chiapas presentan las concentraciones más altas de Li, inciso c y f. Los campos composicionales de Li del C. Oaxaqueño, Chuacús y de los granates de skarn forman tendencias lineales horizontales, reflejando poca variación de la concentración de Li entre sus granates. Los complejos Acatlán y Oaxaqueño tienen las concentraciones más altas de Co, incisos g y h.

Elementos de Tierras Raras

Los elementos de Tierras Raras (REE, por sus siglas en inglés) son presentados en diagramas multielementales normalizadas con la condrita de Sun y McDonough (1995). En general, los granates analizados muestran patrones con concentraciones relativamente altas de tierras raras pesadas (Eu–Lu) respecto a las ligeras (La – Sm).

Los granates del Complejo Acatlán se caracterizan por presentar mayor concentración de tierras raras pesadas que ligeras. La mayoría de estas muestras presentan patrones que forman pendientes crecientes hacia las tierras raras pesadas (Figuras 3.8 y 3.9). Sin embargo, algunos granates de las muestras OL-218, 3II9D y PZ-2 forman patrones casi planos (Figura 3.8 d, f y h). Un grupo pequeño de granates de la muestra PX-02 presenta mayor contenido de tierras raras ligeras respecto a las pesadas (Figura 3.9 c).

El Complejo Xolapa está compuesto por granates que presentan concentración relativamente mayor de tierras pesadas respecto a las ligeras y muestran anomalía negativa pronunciada de Eu (Figura 3.9 e-i). Los patrones de los granates del Complejo Xolapa son crecientes hacia las tierras raras pesadas y se aplanan de Tb a Lu (Figura 3.9 e, f, h e i). Un grupo pequeño de granates que corresponde a la muestra XO-201, forma patrones crecientes hasta Lu (Figura 3.9 g).

Los cristales del Complejo Chuacús tienen mayor concentración de tierras raras pesadas que ligeras. Muestran un comportamiento similar a algunos granates del Complejo Acatlán, formando patrones crecientes de las tierras raras ligeras a pesadas (Figura 3.10 a-d). Un grupo de granates de la muestra GT-320 forma patrones que se aplanan en las tierras raras ligeras y presentan mayor concentración de estos elementos que otras muestras de este complejo (Figura 3.10 c). Algunos granates, que corresponden a la muestra GT-309, forman patrones decrecientes en Yb y Lu (Figura 3.10 d).

Los granates estudiados que provienen de skarn tienen comportamientos diferentes a los de metamorfismo regional y en general presentan una menor abundancia de tierras raras pesadas. Algunos granates están enriquecidos en tierras raras ligeras formando patrones decrecientes hacia las tierras raras pesadas (Figura 3.10 e-i; Figura 3.11 h). Asimismo, se observan granates, como los de las muestras N-M y D-R, con patrones que forman pendientes que se vuelven

crecientes o decrecientes hacia las tierras pesadas (Figura 3.10 f y g). Los granates de las muestras GG-PC y GV, y algunos de la muestra 5S, forman patrones con pendientes decrecientes hacia las tierras raras pesadas (Figura 3.10 e, h, i y 3.11 h). Algunos granates muestran anomalía positiva de Eu (Figura 3.10 h). Los los patrones de las muestras GG-PC y SC presentan anomalía negativa de Sm (Figura 3.10 h y 3.11 h).

Las muestras del Complejo Oaxaqueño presentan un comportamiento similar al del Complejo Xolapa, sus granates presentan una concentración relativamente mayor de tierras raras pesadas respecto a las ligeras, y todos muestran anomalía negativa de Eu pronunciada (Figura 3.11 a-f). Presentan patrones crecientes en las tierras raras ligeras y hacia las pesadas se vuelve plano, aunque algunos forman pendientes crecientes y decrecientes en las tierras raras pesadas (p. ej., VS-4, OC-1006, OC-1008, OC-1014, OC-1017). Sin embargo, la concentración de las tierras raras pesadas en los granates del Complejo Oaxaqueño es ligeramente inferior a la de los granates del Complejos Xolapa.

Los granates del Complejo Macizo de Chiapas muestran un comportamiento de REE similar a los granates de los complejos Oaxaqueño y Xolapa. Tienen una concentración relativamente menor de tierras raras ligeras respecto a las pesadas y muestran anomalía negativa de Eu (Figura 3.11 g). Los patrones son crecientes en las tierras raras ligeras, crecen, decrecen o se aplanan en las pesadas. La concentración de tierras raras pesadas de estos granates es similar a la de los granates del Complejo Xolapa.

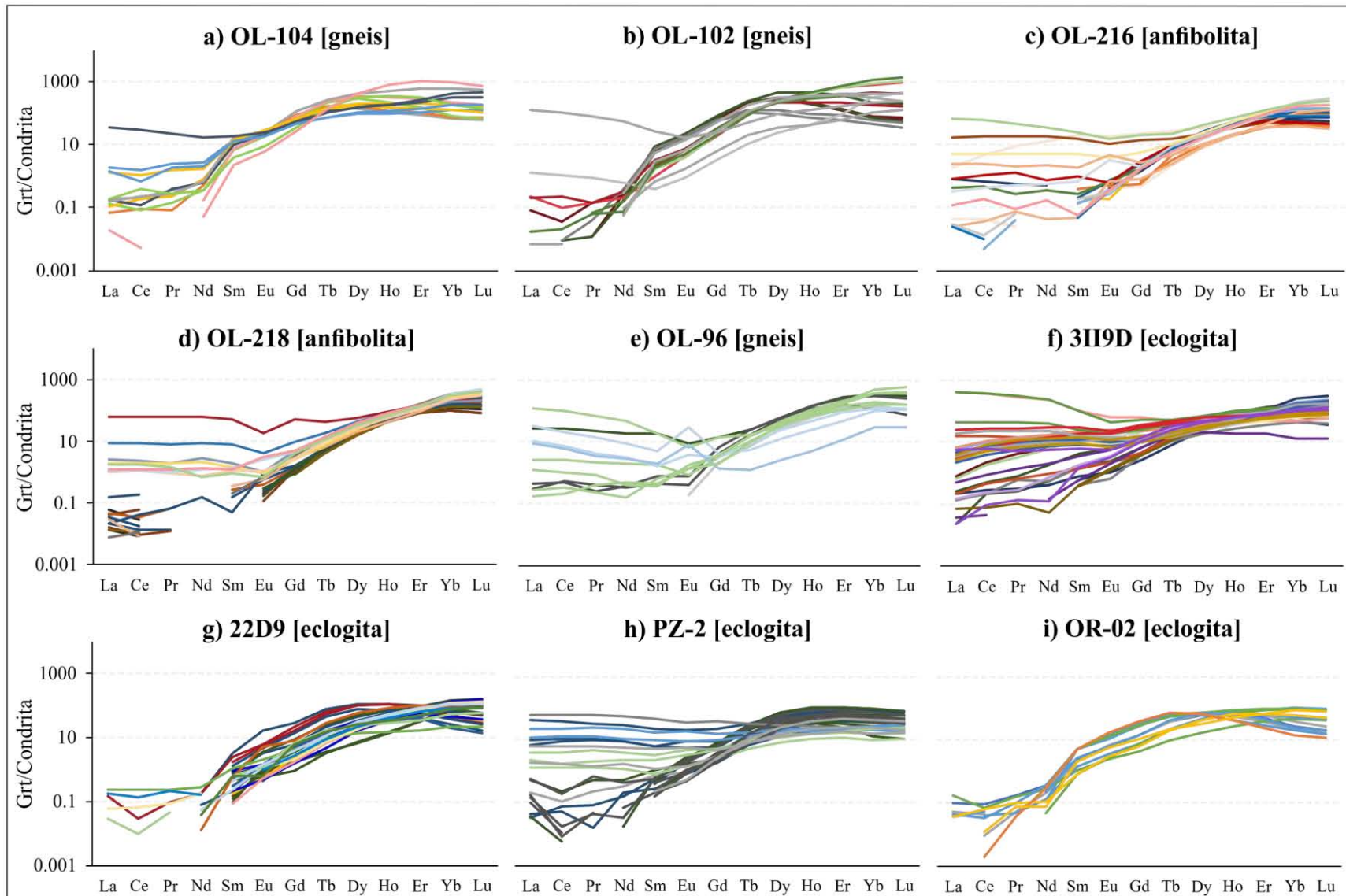


Figura 3.8 Diagramas multielementos de REE de las muestras del Complejo Acatlán normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995).

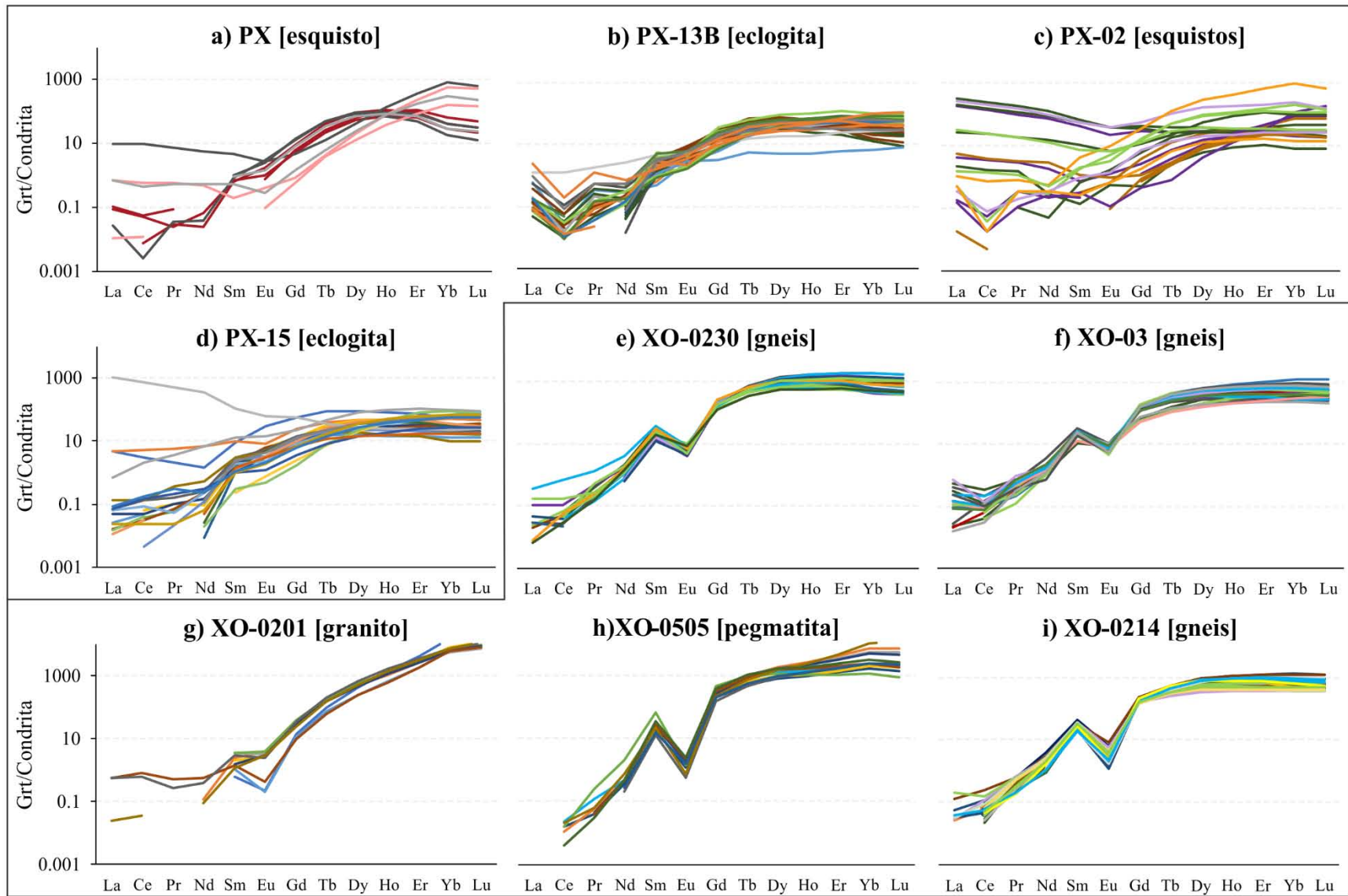


Figura 3.9 Diagramas multielementales de REE de las muestras del Complejo Acatlán (a-d) y las muestras del Complejo Xolapa (e-i) normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995).

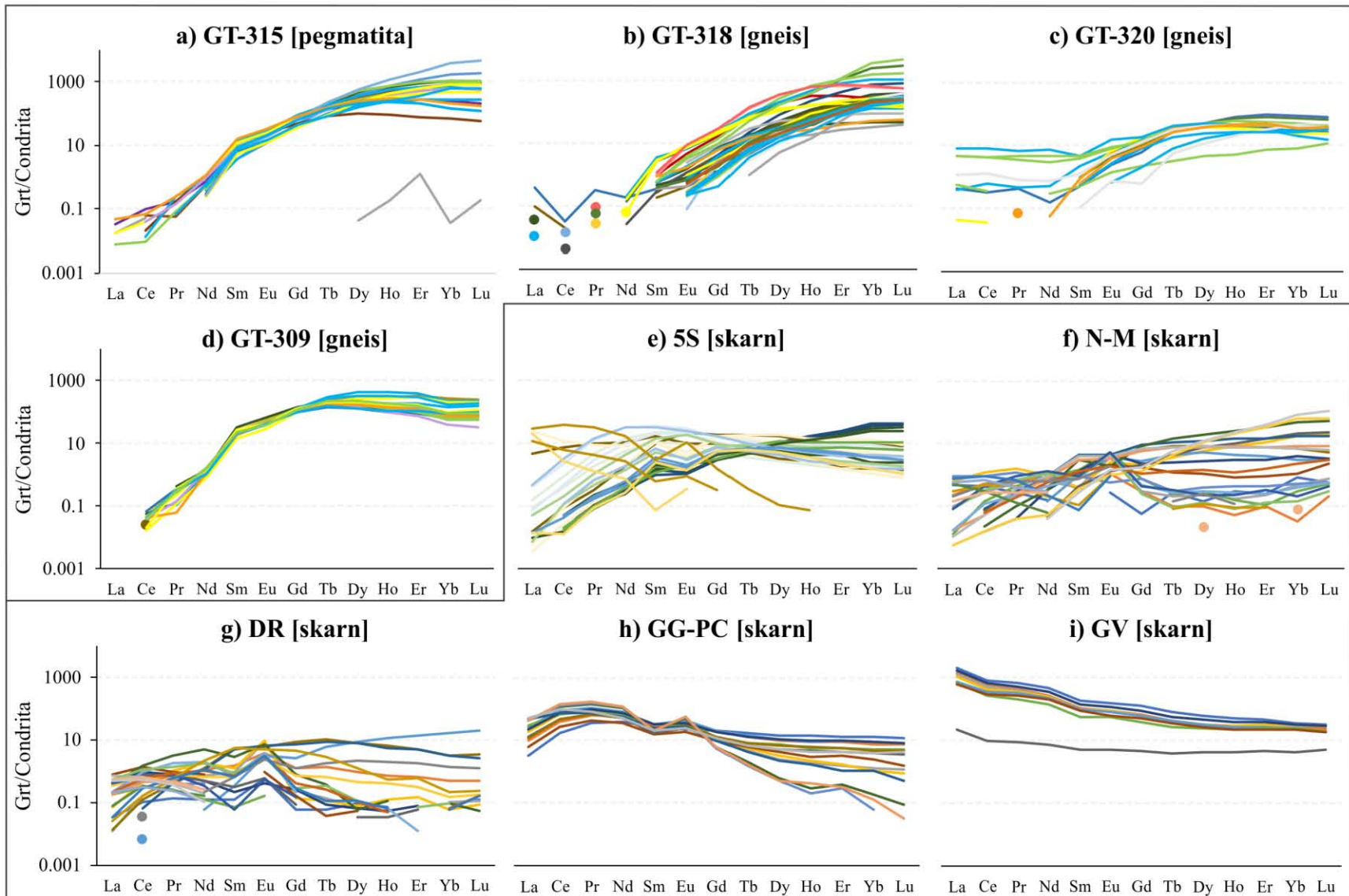


Figura 3.10 Diagramas multielementales de REE de los granates del Complejo Chuacús (a-d) y los granates de skarn (e-i) normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995).

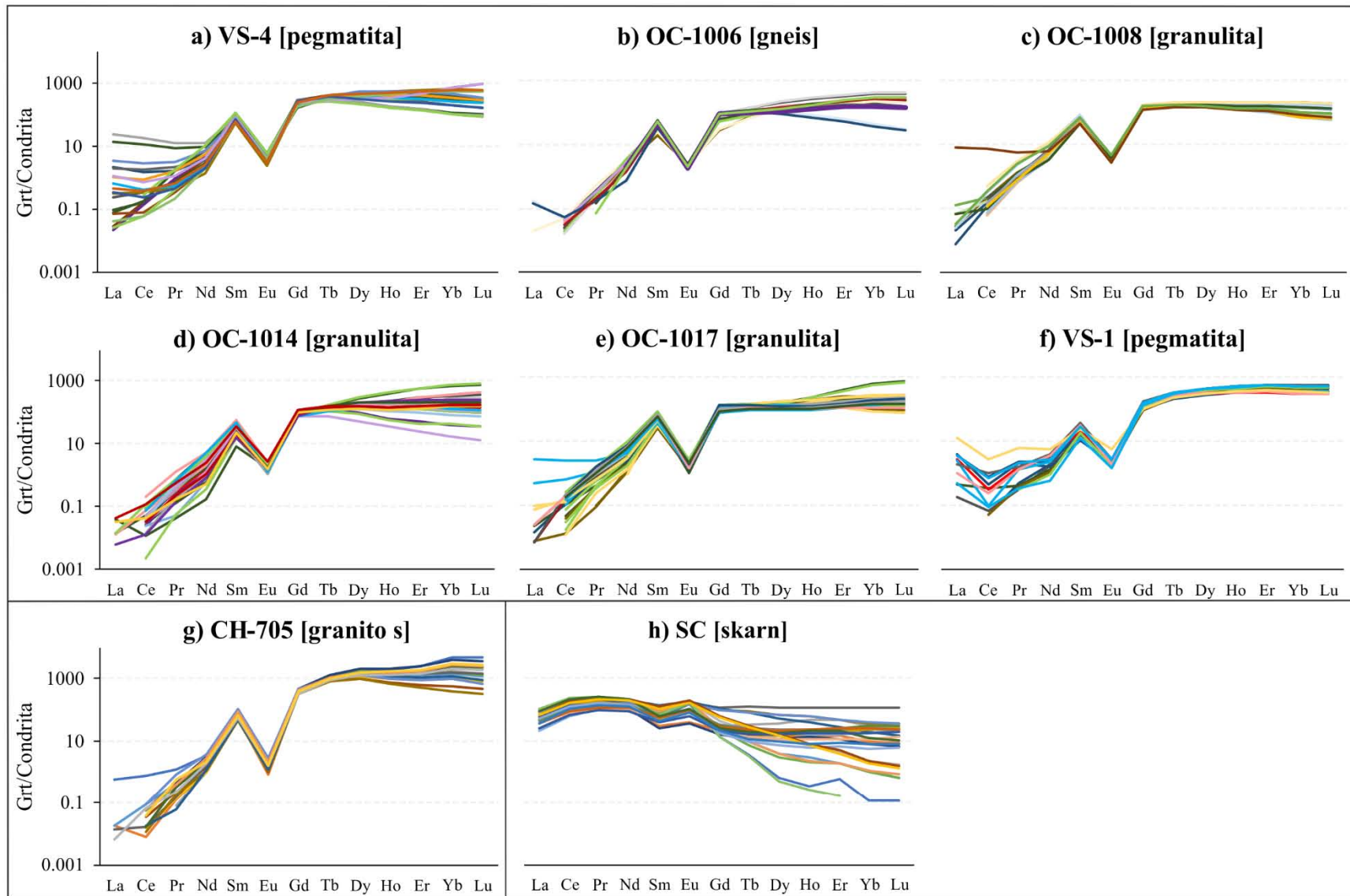


Figura 3.11 Diagramas multielementales de REE de los granates de los complejos Oaxaqueño (a-f) y Macizo de Chiapas (g), y de skarn (h) normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995).

3.3. Zoneamiento

La mayoría de los granates estudiados mostraron cambios composicionales que pudieron asociarse al sitio ablacionado (centro, borde) durante el análisis. Dichas heterogeneidades se observaron incluso dentro de un mismo complejo metamórfico. Los cambios más importantes se observan en los elementos mayores. Sin embargo, es posible observar zoneamiento de los elementos traza. Los zoneamientos son en este trabajo fueron clasificados en: z1) donde la concentración del componente incrementa del borde al centro, y z2) donde la concentración incrementa del centro al borde.

La mayoría de los granates del Complejo Acatlán presentan zoneamiento tipo z2 en Fe, Mg, Cr, Y, Zn y Sc (Figura 3.12 c y e). Por el contrario, gran parte de los análisis muestran un zoneamiento tipo z1 en Mn y Ti (Figura 3.12 a, f). Sin embargo, siempre están presentes ambos tipos de zoneamiento en un mismo elemento. Asimismo, algunos granates muestran mayor concentración de tierras raras pesadas en el centro (p. ej., OL-102, OL-216, PX y P13) y mayor concentración de tierras raras ligeras en el borde (Figura 3.12 g, h y 3.13 a, b, d). Contrariamente, las muestras OL-96, PZ2 y 3II9D tienen mayor concentración de tierras raras pesadas en el borde (Figura 3.13 c).

Los granates del Complejo Chuacús muestran zoneamiento tipo z1 de Fe, Mn, Ca, Mg, y la mayoría de los elementos traza (pero la variación del centro al borde es poca). La mayoría de los granates presenta mayor abundancia de tierras raras pesadas en el centro que en el borde (Figura 3.14 f). Por el contrario, en la muestra Gt-0320 hay granates con bordes más enriquecidos que los centros en tierras raras pesadas (Figura 3.14 g).

En el Complejo Xolapa la mayoría de los granates muestra menor concentración de Y y Mn en el centro. También tienen zoneamiento tipo z1 y z2 en Mg, Fe, Ca y elementos traza, pero con diferencias relativamente pequeñas. La variación de las tierras raras es sutil por lo que en los diagramas multielementos es casi imperceptible, a excepción de los granates de la muestra XO-505 que tienen núcleos más enriquecidos en tierras raras pesadas (Figura 3.14 a, b, c y d).

Los granates del Complejo Oaxaqueño presentan variaciones sutiles de los elementos mayores entre bordes y centros. Sin embargo, es posible observar ligeros zoneamientos tipo z1 y z2 de en la mayoría de los componentes. Algunos granates muestran mayor concentración relativamente altas de tierras raras ligeras en el centro respecto a las ligeras (Figura 3.13 e y f).

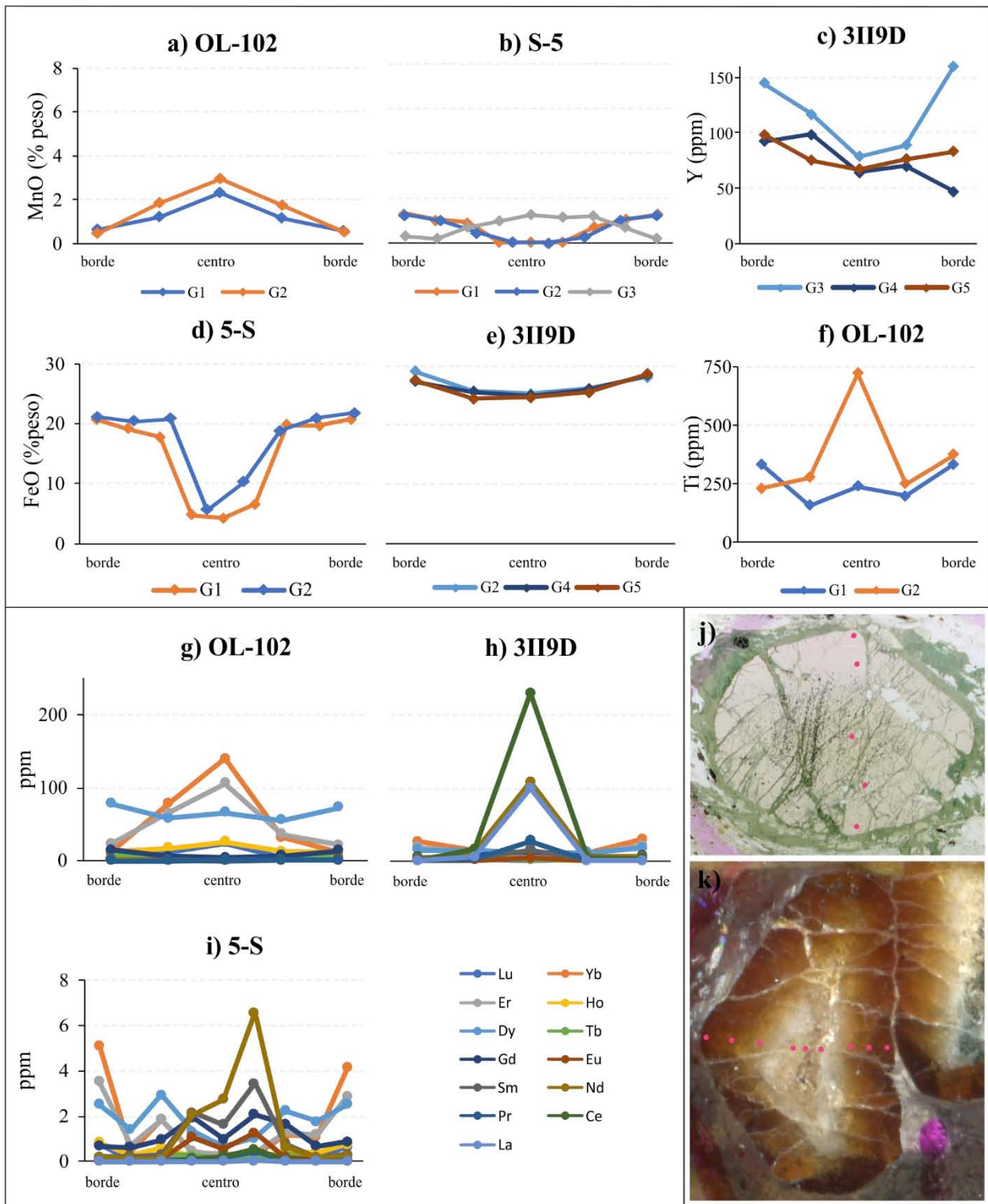


Figura 3.12 Ejemplos de perfiles composicionales de granate que muestran el zoneamiento de elementos mayores y traza. Los diamantes y círculos indican los puntos ablacionados, la cantidad de éstos depende del tamaño del cristal. En los diagramas a-f se muestran perfiles de borde a borde de algunos elementos mayores y traza de granates de skarn y del Complejo Acatlán, donde cada línea representa un granate. g-i) perfiles de borde a borde de elementos tierras raras (cada diagrama representa un cristal individual de granate). j) y k) fotografías del granate 1 de la muestra OL-102 y del granate 1 de la muestra 5-S con los puntos ablacionados, respectivamente.

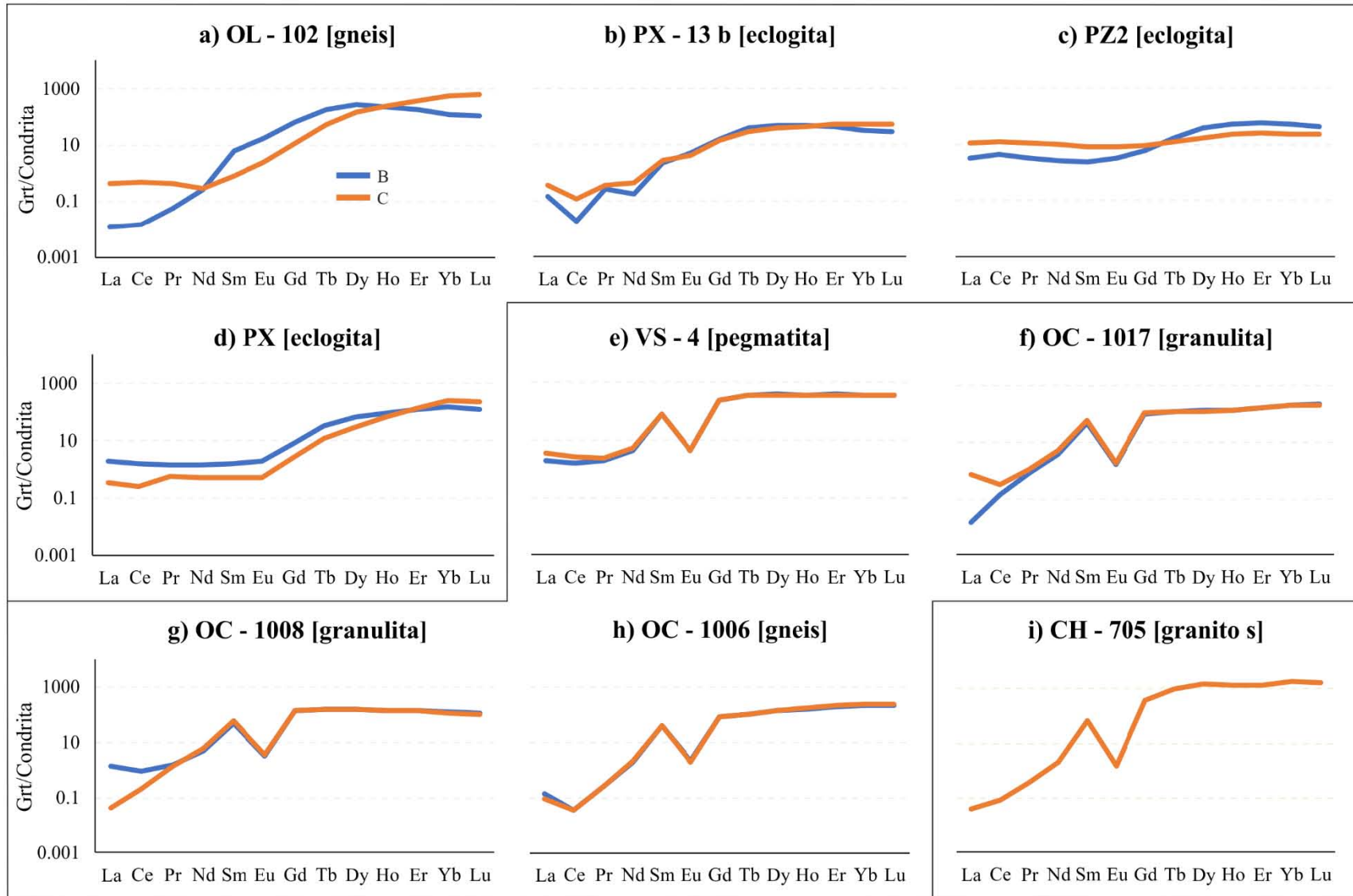


Figura 3. 13 Diagramas multielementales de REE de algunas muestras de los complejos Acatlán, Oaxaqueño y Macizo de Chiapas normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995). Los diagramas muestran el promedio de los bordes (línea azul) y centros (línea naranja). Las líneas color negro separan los diagramas por complejo: a-d) Complejo Acatlán, e-h) Complejo Oaxaqueño y i) Complejo Macizo de Chiapas.

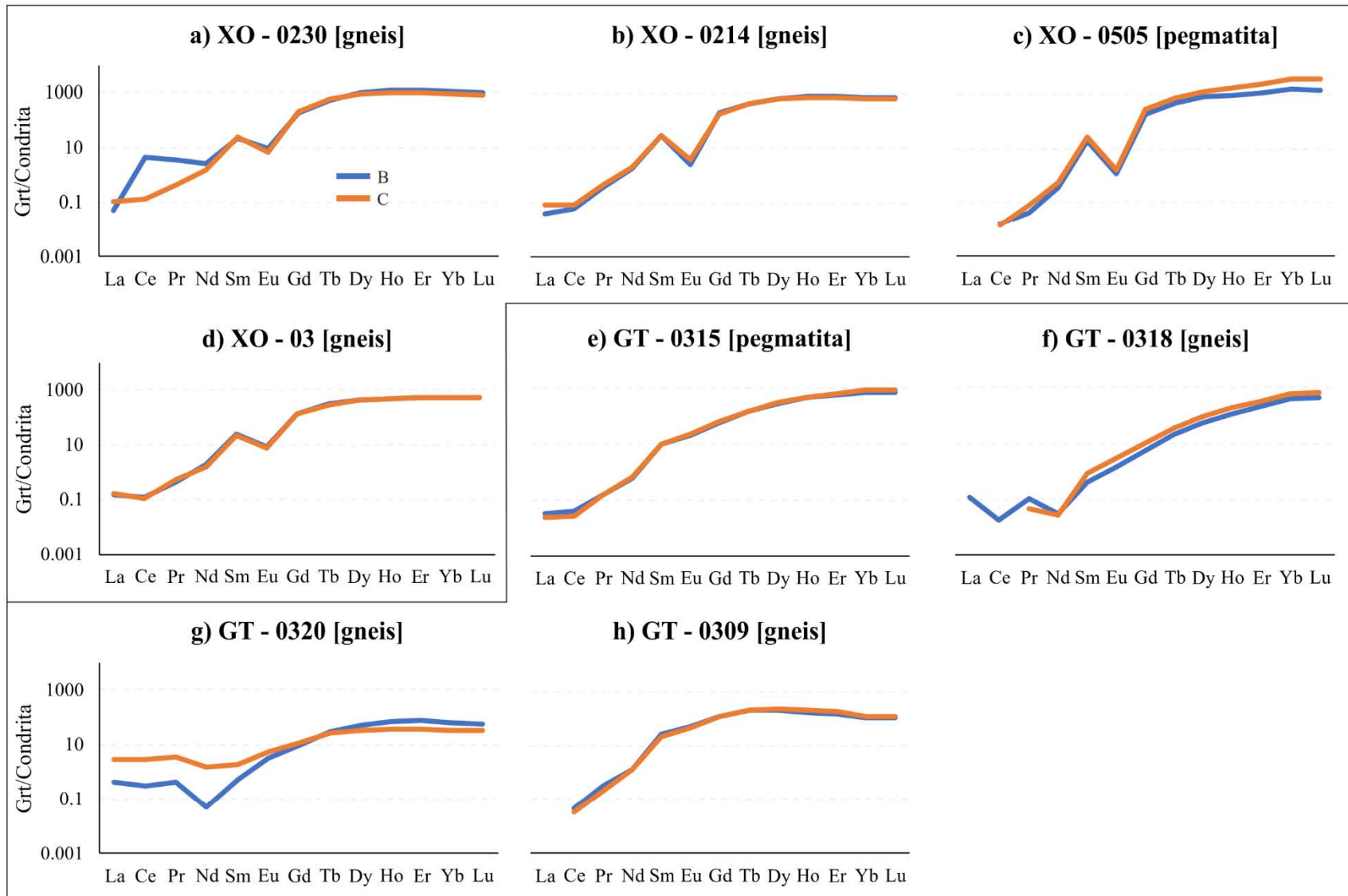


Figura 3. 14 Diagramas multielementales de REE de algunas muestras de los complejos Xolapa y Chuacús normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995). Los diagramas muestran el promedio de los bordes (línea azul) y centros (línea naranja). Las líneas color negro separan los diagramas por complejo: a-d) Complejo Xolapa y e-h) Complejo Chuacús...

Los granates de skarn presentan zoneamiento tipo z1 y z2 tanto en los elementos mayores como traza, tal como el zoneamiento de Mn de los granates de la muestra 5-S (Figura 3.13 b). En general, la mayoría de las muestras exhiben zoneamientos muy complejos, donde es posible observar altas y bajas concentraciones relativamente entre el borde y el centro (Figura 3.13 i). Los diagramas multielementos forman patrones de tierras raras que indican que la mayoría de los granates presenta mayor concentración de tierras raras pesadas en el borde respecto al centro (Figura 3.15 a, c y d). Aunque, en los cristales enriquecidos en tierras raras pesadas el comportamiento del zoneamiento es inverso (Figura 3.15 b).

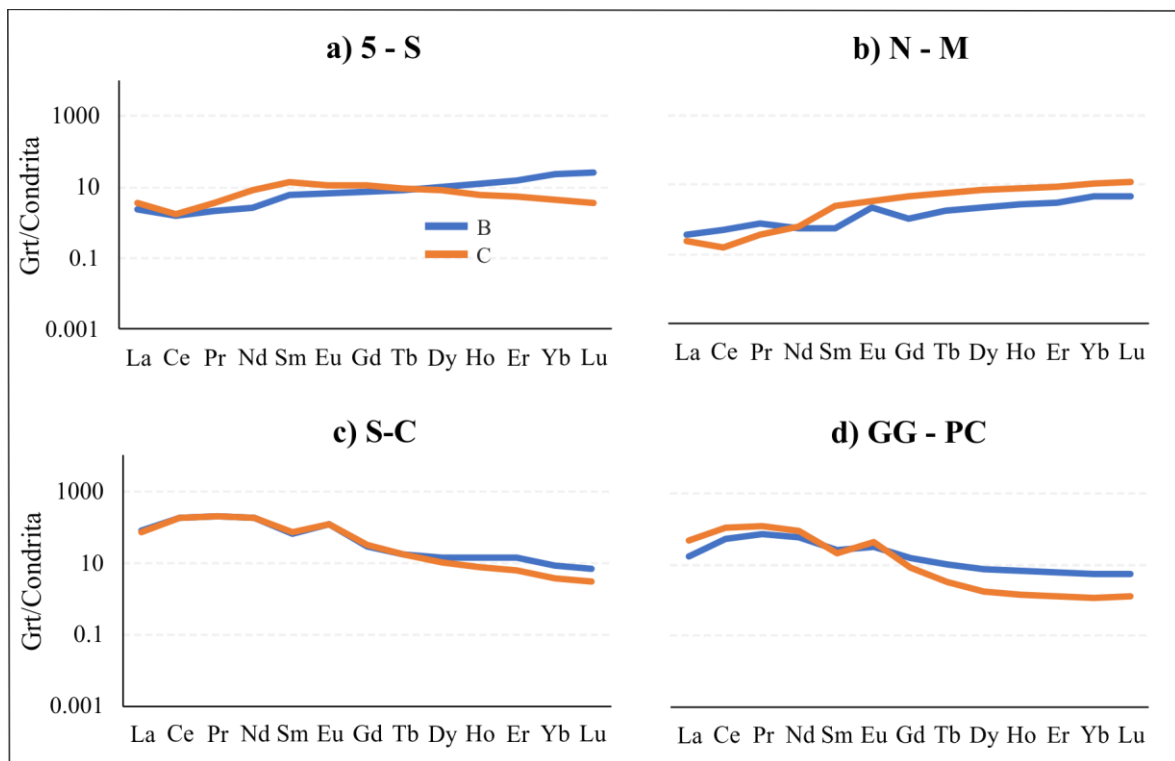


Figura 3. 15 Diagramas multielementales de REE de algunas muestras de skarn normalizados con la condrita de Sun y McDonough (1995). Los diagramas muestran el promedio de los bordes (línea azul) y centros (línea naranja).

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN

4.1. Comparación de técnicas microanalíticas para la caracterización geoquímica de granate

La caracterización geoquímica de elementos mayores en granate por Microsonda Electrónica (EPMA, por sus siglas en inglés) para estudios de procedencia ha sido ampliamente documentada por diversos autores (e. g. Morton, 1985; Haughton y Farrow, 1989; Sabeen *et al.*, 2002; Aubrecht *et al.*, 2009). Recientemente se ha utilizado la combinación de técnicas analíticas (EPMA y LA-ICP-MS) para obtener una caracterización completa que incluye el análisis de elementos mayores y traza (e. g. Čopjaková *et al.*, 2005). Los resultados presentados en este trabajo permiten considerar a la técnica LA-ICP-MS como una alternativa confiable para la caracterización de elementos mayores y traza en granate. Una de las diferencias más notables entre ambas técnicas, es el tamaño de la superficie analizada, ya que el haz de láser utilizado por LA-ICP-MS es relativamente mayor (60 μm). Esto podría influenciar al análisis de inclusiones minerales que pudieran generar interferencias durante la ablación/análisis.

Con el objetivo de evaluar ambas técnicas los resultados de elementos mayores de granates de dos muestras (PX 15 y PX 14) obtenidos mediante LA-ICP-MS fueron comparados con resultados obtenidos por EPMA (Ramos-Arias, datos no publicados). Dicha comparación permite argumentar que ambas técnicas son comparables, ya que se obtuvieron distribuciones similares en diagramas ternarios de componentes ideales (Figura 4.1). Algunos sitios analizados por EPMA no pudieron ser analizados exactamente en el mismo sitio por LA-ICP-MS debido a la presencia de inclusiones, por lo cual algunos análisis de dichas muestras no coinciden completamente. Otro factor, puede estar asociado a la diferencia de la superficie analizada, ya que el diámetro del haz del láser usado para la ablación es de 60 μm , mientras que la superficie analizada en la microsonda es menor.

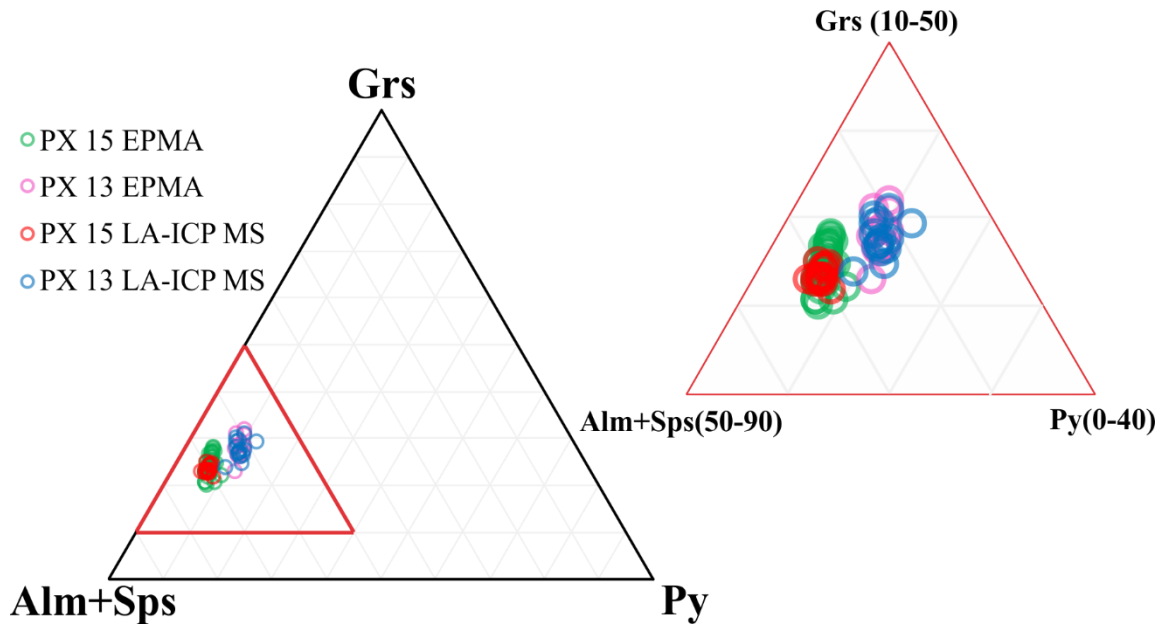


Figura 4. 1 Diagrama ternario de proporciones molares de componentes ideales de granate de los resultados obtenidos mediante el uso de las técnicas de LA-ICP-MS y EPMA. El diagrama de la derecha muestra un acercamiento.

4.2. Diferencias composicionales

Elementos mayores

Los elementos mayores definen la especie de granate con base en la proporción de sus componentes ideales (Grew *et al.*, 2013). En este estudio, la composición química de elementos mayores define a la mayoría de los granates principalmente de tipo almandinos. Esta especie es característica de rocas formadas durante metamorfismo regional, tales como esquistos de granate y rocas metamórficas en facies de granulita y eclogita (Deer *et al.*, 1962; 1966; 1997). De esta forma, la especie resultante (Alm 41-82%) es afín con las rocas a las que pertenecen (complejos Acatlán, Chuacús, Oaxaqueño y Xolapa). Los granates del Complejo Acatlán provienen de rocas clasificadas como eclogitas, anfíbolitas (con y sin relictos de la facie metamórfica de eclogita), gneises cuarzofeldespaticos, paragneises y esquistos. Los granates del Complejo Chuacús provienen de ortogneises, pegmatitas y paragneises de clase química pelítica que alcanzaron alto grado metamórfico (facies de eclogita). Las muestras del Complejo Oaxaqueño corresponden a granulitas de clase química pelítica y cuarzofeldespática. Finalmente, los granates del Complejo Xolapa fueron separados de ortogneises, granitos deformados y pegmatitas.

Los granates del Complejo Macizo de Chiapas provienen de un granito tipo S y son clasificados como granates de tipo almandino-espesartina. De acuerdo con Deer *et al.* (1962; 1966; 1997) el granate de tipo almandino-espesartina es comúnmente encontrado en rocas como granitos y pegmatitas graníticas.

Los diagramas ternarios de Alm+Sps-Py-Grs construidos en este trabajo permitieron crear campos con menor dispersión (Figura 3.1 b). Así también, las proporciones Alm-Sps-Py ayudaron a distinguir granates de tipo Alm de aquellos que presentan proporciones altas de Sps (Figura 3.1 a). Los granates estudiados se diferenciaron en cuatro tipos. Los Tipo 1 incluyen a los granates de los complejos Acatlán, Xolapa y Chuacús, y están compuestos por granates de Alm con proporciones moderadas de Grs y bajas proporciones de Py y Sps. Estos granates no pueden ser completamente diferenciados mediante su composición de elementos mayores, porque muestran rangos amplios en sus proporciones molares de sus componentes ideales. Los campos composicionales de todos los complejos en diagramas ternarios Alm+Sps-Py-Grs siempre se traslapan en algún punto (Figura 3.1).

Los granate Tipo 2 incluyen las muestras del Complejo Oaxaqueño y se diferencian por contener una mayor proporción de Py (15-27 %), y formar un campo composicional que no se traslapa con los granates de los otros complejos metamórficos (Figura 3.1 f y m). Los granates del Complejo Macizo de Chiapas se diferencian de los granates de los otros complejos metamórficos por presentar proporciones altas de Alm y Sps, dando lugar a los granates Tipo 3 (Figura 3.1 f y m). La composición de los granates Tipo 3 es representativa de granates que provienen de granitos y pegmatitas; estos tipos de rocas son comunes en todo el sur de México.

Los granates de skarn tienen una composición muy distinta por lo que son agrupados como granates Tipo 4. La composición de estos granates es representativa de zonas de metasomatismo de contacto. Estos granates son de tipo andradita, y presentan muy bajas proporciones de Alm, Grs, Sps y Py (Figura 3.1 g y m). El granate tipo andradita es una especie caracterizada por contener Ca^{+2} en el sitio atómico X y la sustitución de Fe^{+3} por Al^{+3} en el sitio Y (Grew *et al.*, 2013). En los resultados obtenidos mediante LA-ICP-MS no es posible estimar la cantidad de Fe representada por cationes trivalentes o divalentes del mismo. Sin embargo, los bajos porcentajes de Al y los altos porcentajes de Fe y Ca sugieren que la naturaleza de estos granates es de tipo andradita. La nomenclatura propuesta por Grew *et al.* (2013) no incluye un diagrama

que permita diferenciar los granates tipo andradita de las especies almandino, espesartina, grosularita y piropo a partir de la composición total de Fe. Por lo tanto, se propone un diagrama ternario con base en las proporciones de Al, Fe y Ca como el mostrado en la Figura 4.2.

Existen datos publicados de componentes mayores (análisis por EPMA) en granates de los complejos Acatlán, Oaxaqueño, Xolapa, Chuacús y Macizo de Chiapas. Estos datos fueron graficados en los diagramas propuestos en este trabajo, sin embargo, resultan en una mayor dispersión que amplía los campos composicionales propuestos y complica la diferenciación de los complejos (Figura 4.3 g y o). Adicionalmente, se incluyeron los datos de granate de otros complejos metamórficos, tales como Ayú (Martini *et al.*, datos no publicados) y Güichicovi (Weber y Hecht, 2003) (Figura 4.3 h) con fines comparativos.

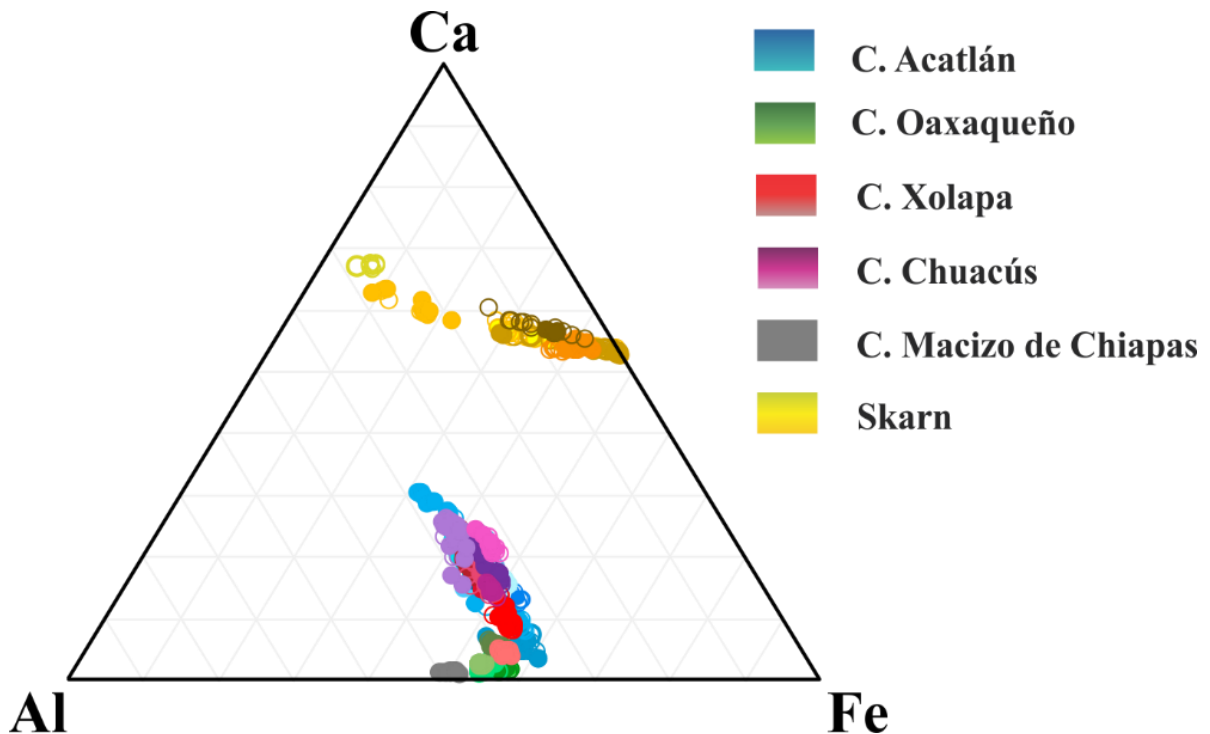


Figura 4. 2 Diagrama ternario basado en la proporción Al-Ca-Fe para diferenciar granate de tipo And de granates ricos en Alm-Grs-Sps-Py.

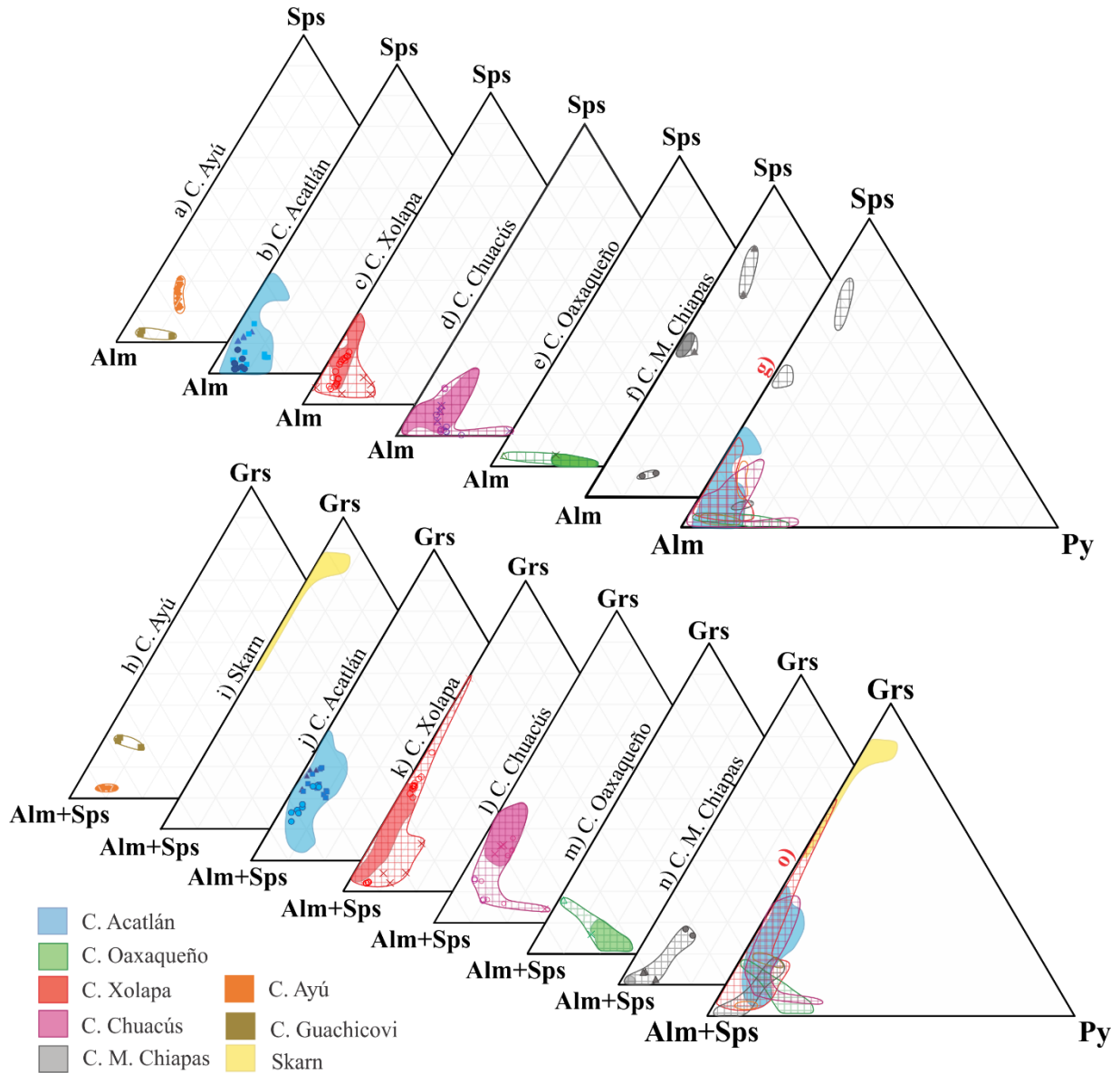


Figura 4. 3 Diagramas ternarios de componentes ideales de granate con los campos composicionales formados en cada complejo utilizando los datos obtenidos en este trabajo y los datos publicados previamente por otros autores: Mora y Valley (1985), Corona-Chávez *et al.* (2006), Solari *et al.* (2004), Estrada-Carmona *et al.* (2009), Ortega-Gutiérrez *et al.* (2004), Vega-Granillo *et al.* (2007), Weber y Hetch, (2003), Maldonado-Villanueva (2011), Ramos-Arias *et al.* (2012), Galaz-Escanilla *et al.* (2013), Estrada-Carmona *et al.* (2016b), Maldonado *et al.* (2016), González-Guzmán *et al.* (2016), Maldonado *et al.* (2018a), Maldonado *et al.* (2018b). a – g) diagramas basados en la proporción de Alm (almandino) – Sps (espesartina) – Py (piropo). h – o) diagramas basados en la proporción de Alm – Sps (almandino + espesartina) – Grs (grosularia) – Py (piropo). Los círculos, cuadrados, triángulos y cruces representan los datos de granate publicados. Los polígonos rellenos de color sólido representan los campos formados por los datos obtenidos en este trabajo. Los polígonos con achurado (cuadrículado) representan los campos formados por los granates analizados en este trabajo y los reportados previamente por otros autores.

Elementos traza

Los granates estudiados en general presentan bajas concentraciones de Li, Co y Ga (<100 ppm), y relativamente altas concentraciones de Y, Ti y Zr (>100 ppm). La composición de algunos elementos traza en los granates analizados permitió establecer diferencias entre los complejos. Sin embargo, la mayoría de los campos composicionales se traslapan debido a que la concentración de los elementos traza dentro de un mismo complejo es muy heterogénea. Por ejemplo, varios de los granates del Complejo Acatlán muestran las concentraciones más altas de Co, Zr, Ti y Cr, pero su heterogeneidad no permite definir campos totalmente independientes ya que también incluyen granates con composición similar a los granates de otros complejos (Figura 3.2, 3.3 y 3.5). La alta concentración de Zr y Ti podría estar asociada a pequeñas inclusiones de zircón o esfena que no pudieron ser evitadas a profundidad durante la ablación. Sin embargo, al observar minuciosamente la señal obtenida del análisis, dichas "concentraciones anómalas" no modifican la concentración de elementos mayores y traza de los granates (Figura 4.4). Por lo tanto, no son descartados para la caracterización de los granates del C. Acatlán.

Por otro lado, algunos granates del Complejo Xolapa tienen concentraciones relativamente altas de Sc, aunque otros más tienen concentraciones similares a los granates de otros complejos. Para el caso del Complejo Macizo de Chiapas, los granates forman campos independientes de Ge y Li que se separan del resto de los complejos metamórficos.

En la literatura se han documentado algunos diagramas bivariantes (p. ej., Zr vs Ti, Y vs Ga, Y vs Zr, y Ti vs Sc) de utilidad para establecer el origen de los granates (Shimizu y Richardson, 1987; Griffin *et al.*, 1992, 1992; Federowich *et al.*, 1995). Aunque dichos diagramas permiten identificar distintos patrones en cada complejo metamórfico, no resultaron útiles para discriminar las rocas estudiadas en este trabajo (Figura 4.5).

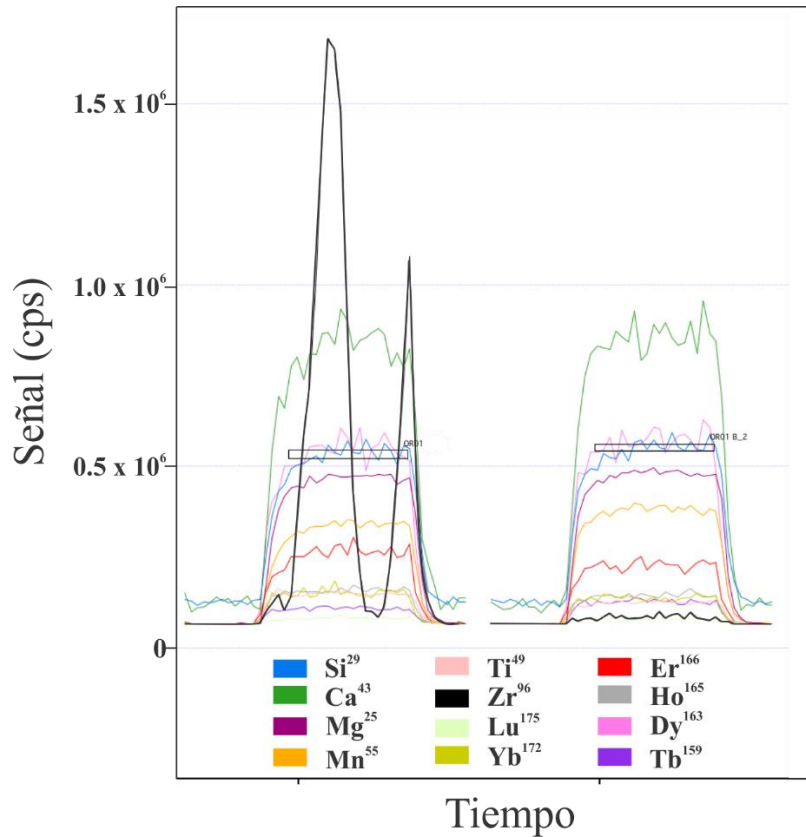


Figura 4. 4 Señal obtenida de la ablación de dos cristales de granates de una muestra de eclogita (OR-02) del Complejo Acatlán. En el análisis de la izquierda se observa que la señal de Zr no es constante durante el análisis, mientras que en el análisis de la derecha muestra una señal de Zr muy baja y constante. La presencia de estas concentraciones anómalas no afecta la señal obtenida de elementos mayores y traza ya que se puede observar una señal constante de estos. CPS: cuentas por segundo.

Algunos de los diagramas construidos permitieron identificar relaciones entre la composición de elementos traza con la clase química y el grado metamórfico de las distintas rocas que conforman cada complejo metamórfico. Por ejemplo, en el Complejo Acatlán el contenido de V permite diferenciar los granates de gneises cuarzofeldespáticos (muestras OL-102 y OL-104) de aquellos de eclogitas, anfibolitas, esquistos y paragneises (Figura 3.3). Para el Complejo Xolapa los granates de una muestra de pegmatita y de un granito deformado se diferencian de los granates de ortogneises por presentar mayor contenido de Li y menor contenido de Sc (Figura 3.3 a).

Los granates de las muestras OC-1006, OC-1017 y VS-1, del Complejo Oaxaqueño, se diferencian del resto por presentar mayor contenido de SiO y Zn (Figura 3.6 b); mientras que las muestras VS-1 y VS-4 (pegmatitas) por presentar mayor contenido de Y (Figura 3.7 h). En el Complejo Chuacús los granates de la muestra de un paragneis (Gt-0309) se diferencian por

presentar mayor contenido de Ti, mientras que los granates de la muestra Gt-0318 presentan mayor contenido de Cr.

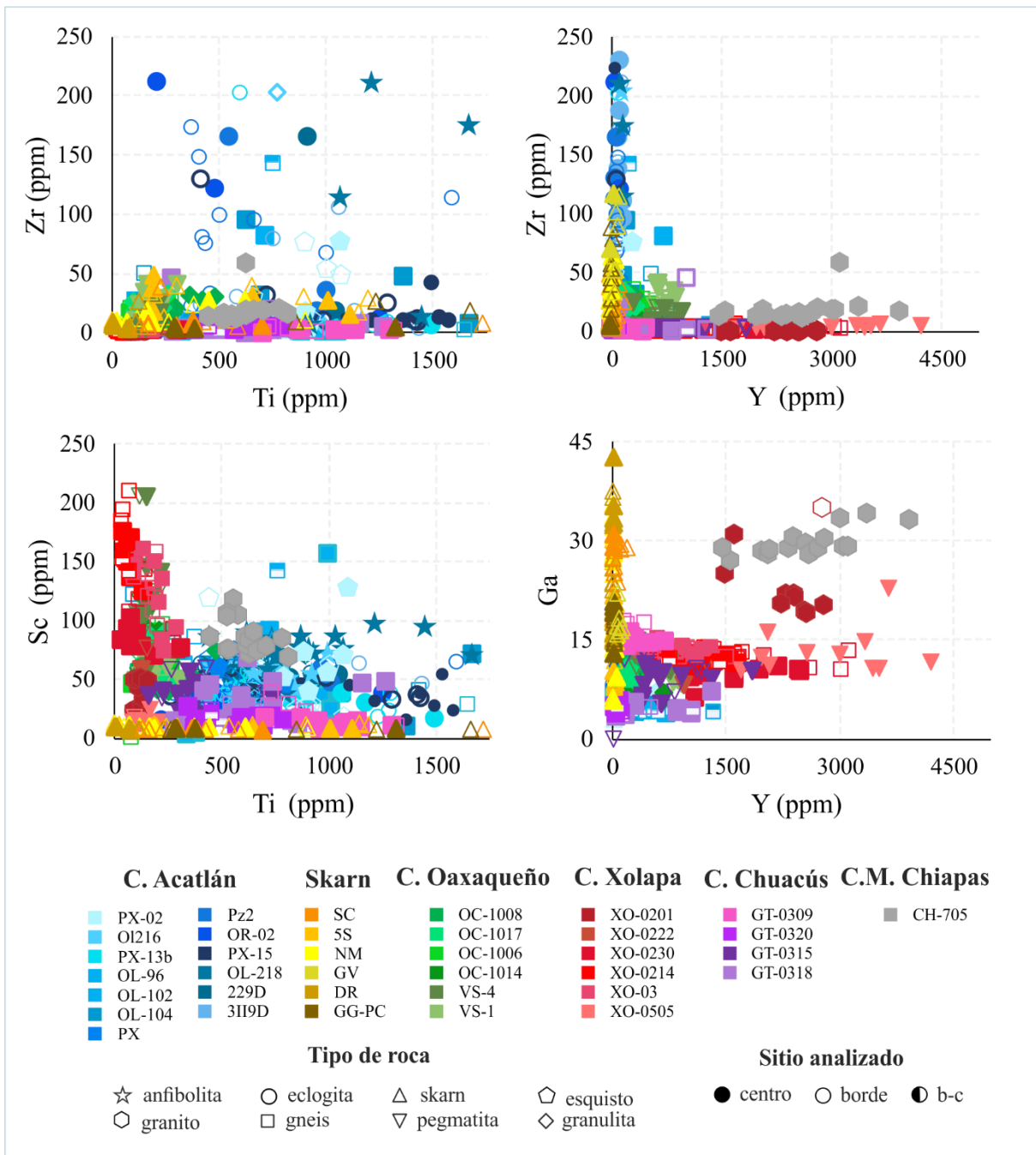


Figura 4. 5 Diagramas bivariados de elementos traza basados en las comparaciones que otros autores han propuesto para diferenciar granates de diferente fuente (Shimizu y Richardson, 1987; Griffin *et al.*, 1992, 1992; Federowich *et al.*, 1995).

Elementos de Tierras Raras

La composición de elementos de tierras raras muestra mayor utilidad que otros elementos traza para diferenciar los granates en los diferentes complejos metamórficos. Los patrones de elementos de tierras raras normalizados respecto a las condritas permiten dividirlos en 3 grupos. El primer grupo está compuesto por los granates de los complejos Oaxaqueño, Xolapa y Macizo de Chiapas, y se distinguen porque muestran un patrón creciente en las tierras raras ligeras, se aplanan en las tierras raras pesadas y presentan anomalía negativa en Eu muy pronunciada (Figura 3.9 e-i; 3.11). La anomalía en Eu sugiere que los granates cristalizaron en equilibrio con plagioclasas tal como se ha documentado en granates de granulitas y anfibolitas (Bea *et al.*, 1997). Se ha documentado este comportamiento en granates de rocas que alcanzaron condiciones de facies de anfibolita-granulita con presiones de 5-8 kbar (Bea *et al.*, 1997). Esta clase química y condiciones de metamorfismo son similares a las de las rocas de los complejos Xolapa y Oaxaqueño. Los granates del Complejo Xolapa corresponden a ortogneises formados en facies de anfibolita-granulita, mientras que los del Complejo Oaxaqueño corresponden a metasedimentos y ortogneises que se formaron en condiciones de granulitas (Maldonado, 2011; Corona-Chavez *et al.*, 2006; Solari *et al.*, 2014). El segundo grupo está conformado por los granates de los complejos Acatlán y Chuacús, y se caracterizan por formar patrones con pendientes crecientes de las tierras raras ligeras hacia las tierras raras pesadas. Los patrones de granates separados de gneises de los complejos Acatlán y Chuacús no presentan la anomalía negativa en Eu, observada en los gneises de los complejos Oaxaqueño y Xolapa en este y otros trabajos (Estrada-Carmona *et al.*, 2016). Posiblemente esto se debe a que el granate no cristalizó en equilibrio con la plagioclasa (Bea *et al.*, 1997). Sin embargo, en patrones de REE de granates de eclogitas del Complejo Chuacús se ha reportado la presencia de la anomalía negativa en Eu (Maldonado *et al.*, 2018b). Dentro del Complejo Acatlán, también aparecen granates (p. ej., muestras PZ-2 y PX) con patrones casi planos de REE, sugiriendo mayor abundancia de tierras raras ligeras, siendo esta una diferencia respecto a los otros complejos metamórficos. Esto permite distinguir dos familias de granates, una familia de granates muestra mayor abundancia de tierras raras ligeras, mientras que otra familia es principalmente empobrecida en estos elementos (Figura 3.9).

Los granates de skarn forman el tercer grupo, y se caracterizan por estar enriquecidos en tierras raras ligeras respecto de las tierras raras pesadas en su mayoría, aunque en algunos casos

sí presentan patrones crecientes hacia las tierras raras pesadas (Figura 3.10). Este comportamiento ya ha sido documentado en granates de skarn por otros autores (p. ej., Kato, 1999; Smith *et al.*, 2004; Gaspar *et al.*, 2008; Ismail *et al.*, 2014). El principal factor que conduce a este comportamiento en los patrones de REE es el tipo de protolito. Para el caso de los skarn analizados dichos patrones están influenciados por la composición del agua oceánica a partir de la cual precipitó el carbonato (Rollinson, 1993); aunque también puede haber influencia de los fluidos hidrotermales.

El comportamiento de los REE no depende del espécimen de granate, sino más bien de las fases minerales asociadas al metamorfismo. Por ejemplo, los granates que se forman en ausencia de fases minerales compatibles con elementos LREE y/o intermedias y en presencia de fases más compatibles con HREE, presentarán patrones con pendientes decrecientes hacia las tierras raras pesadas (p. ej., GG-PC, GV, SC). Por el contrario, si se da el crecimiento de granate en equilibrio con fases minerales compatibles con LREE (clinopiroxeno, anfíbol), los patrones mostrarán pendientes crecientes hacia las HREE (p. ej., muestra N-M).

Algunos estudios de REE en granate han documentado que existe una relación de estos elementos con las condiciones de presión y temperatura a las que cristaliza (p. ej., Bea *et al.*, 1997; Rubatto y Herman, 2007; Harley y Kelly, 2007; Manzotti y Balleve, 2013). Bea *et al.* (1997) propusieron una regresión lineal ($P = 3.6 + 5.6 * Gd/Dy_{\text{granate}}$) para calcular la presión basada en la relación Gd/Dy, señalando que esta razón incrementa con la presión. Sin embargo, en los granates estudiados en el presente trabajo no ocurre esto, ya que se observan razones bajas de Gd/Dy en granates de rocas de muy alta presión (p. ej., Complejo Chuacús). Cabe señalar que no se hicieron estudios cristalográficos y no es posible determinar si los granates son apropiados para calcular las presiones con esta regresión, ya que esta se aplica en granates con dimensión de celda (a) bajo 11.46 Å (Bea *et al.*, 1997).

Adicionalmente, se graficaron algunas razones de REE tales como Sm/Yb, Ce/Yb, Sm/Nd, Gd/Dy, contra SiO₂, y Sm/Yb contra Gd/Dy para tratar de identificar y diferenciar entre los complejos metamórficos. Sin embargo, aunque muestran algunas tendencias, no fue posible diferenciarlos completamente (Figura 4.6).

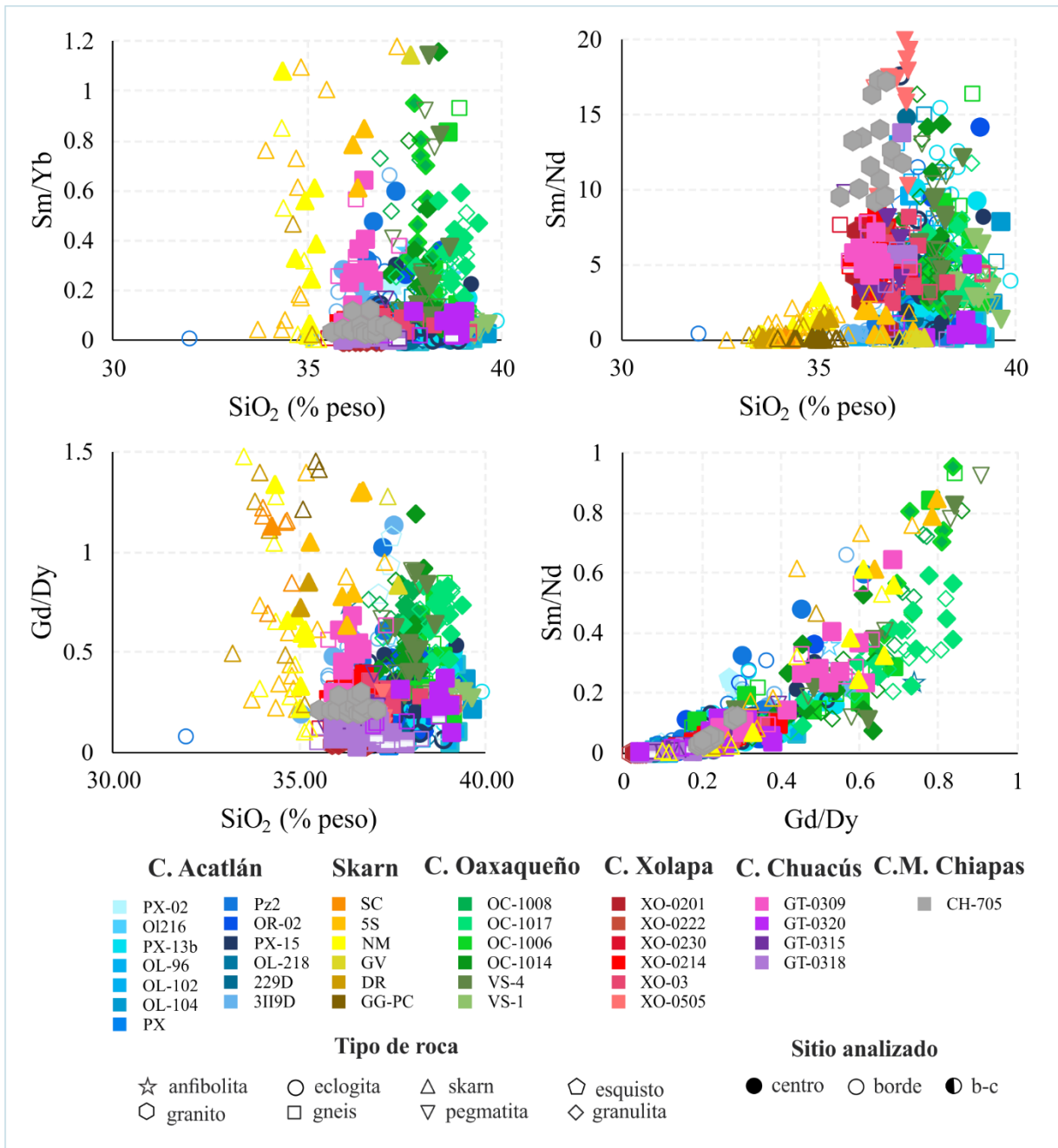


Figura 4. 6 Diagramas bivariados de razones de elementos de tierras raras.

Zoneamiento vs homogeneización

Los resultados obtenidos demostraron que la mejor forma de analizar el zoneamiento del granate es en lámina delgada, ya que algunos de los cristales montados en resina no estaban completos y fue difícil identificar con certeza bordes y los núcleos. En ambos casos es importante conocer el tamaño de los cristales, ya que de este modo se podría tener mejor control al momento de determinar si se están analizando exactamente a la mitad o lograr el mejor acercamiento a esto. Varios de los granates estudiados mostraron zoneamiento composicional de todos los elementos analizados, siendo más evidente la variación de los elementos mayores como el Fe y Mn (Figura 3.13 a, b, d y e). Sin embargo, no se identificó un patrón de zoneamiento particular que definiera a cada complejo metamórfico.

Los granates del Complejo Acatlán tienen zoneamientos muy variados, mientras algunos granates cristales presentan mayor concentración de un elemento en el centro, para otros es mayor en el borde (p. ej., Ti, V, Zn, etc.). Sin embargo, en la mayoría de las muestras los granates tienen mayor concentración de Mg hacia los bordes y de Mn en el centro (Figura 3.13 a; Anexo 2). Este zoneamiento se produce por crecimiento del granate con el aumento de la temperatura y/o la presión, generando un progresivo empobrecimiento de Mn en el reservorio (Caddick y Kohn, 2013). Además, el sitio ocupado por cationes divalentes en el granate favorece más al Fe, Ca y Mn que al Mg (Grew *et al.*, 2013). De acuerdo con Caddick y Kohn (2013), si la roca se sigue calentando durante un gran periodo de tiempo se producirá una difusión de los elementos que puede destruir el zoneamiento. Esto puede indicar que tal vez los granates del Complejo Acatlán no sufrieron cambios importantes en el pico metamórfico después de su crecimiento, que en general, de acuerdo con Baxter y Scherer (2013), ocurre entre los 400 y 700 °C. Este zoneamiento de Mn y Mg también está presente en los granates del Complejo Chuacús (Anexo 4).

Por el contrario, la mayoría de los granates del Complejo Xolapa muestra mayor contenido de Mn hacia el borde (Anexo 3). El zoneamiento inverso de Mn se puede formar durante el metamorfismo retrógrado debido a un intercambio de cationes (Mg/Fe) con fases ferromagnesianas (Ague y Carlson, 2013; Caddick y Kohn, 2013). La pérdida de masa da lugar a la partición de algunos elementos, comúnmente el Mn y/o REE, dentro del granate, para mantener su estequiometría (Ague y Carlson, 2013).

En algunos granates, como los del Complejo Oaxaqueño, la variación de elementos mayores y traza es sutil. Esto puede estar asociado a los procesos de difusión que pudieron haber ocurrido posteriormente a su crecimiento, borrando parcialmente el zoneamiento y dando lugar a cristales composicionalmente homogéneos.

Los granates de skarn presentan zoneamientos complejos, generalmente en los elementos traza, los cuales muestran empobrecimiento y enriquecimiento de los elementos entre el borde y el núcleo (Figura 3.13). Sin embargo, es posible observar zoneamientos crecientes o decrecientes de elemento mayores (Figura 3.13 b y d). El zoneamiento irregular de granates provenientes de skarn ya ha sido documentado en granates de skarn de Australia (p. ej., Ismail *et al.*, 2014), y puede estar asociado a un “equilibrio químico parcial”. Mientras los elementos mayores del granate se difunden en toda la roca a una velocidad mayor o similar al Al, algunos elementos traza (p. ej., Y, Zr, Lu, etc.) muestran una difusión menor que da lugar a zoneamientos heterogéneos (Ague y Carlson, 2013). El zoneamiento irregular de los granates de skarn puede estar asociado al tipo de metamorfismo, ya que el crecimiento de un granate en condiciones de metamorfismo térmico es más rápido que el crecimiento procedente del metamorfismo regional.

4.3. El granate como trazador de procedencia

En el sur de México se han realizado numerosos estudios de procedencia a partir de geocronología U-Pb de zircones (p. ej., Sánchez-Zavala *et al.*, 2004; Weber *et al.*, 2006; Gillis *et al.*, 2005; Witt *et al.*, 2012). Sin embargo, los trabajos de procedencia que utilizan la caracterización geoquímica de fases minerales pesadas, incluido el granate, son escasos. Dichos trabajos fueron realizados en rocas en rocas clásticas jurásicas de la cuenca Otlaltepec, en Puebla (Martini *et al.*, 2016), y en rocas clásticas oligocénicas al sur del Golfo de México, en el área de Cerro Pelón (Ortega-Flores *et al.*, 2018). Para evaluar la utilidad del granate como trazador de procedencia, se realizó la comparación de los datos obtenidos a partir de granates metamórficos con los datos reportados de granates detríticos de la Cuenca Otlaltepec y del área de Cerro Pelón, misma que se describe a continuación.

Ortega-Flores *et al.* (2018) establecieron la presencia de dos grupos de granates detríticos en las areniscas del Oligoceno del sureste de México a partir de criterios petrográficos, principalmente la presencia de inclusiones de rutilo y zircones. En el grupo 1 (G1) clasificaron a los granates que presentaban escasas inclusiones de zircón, proporciones altas de Alm (66-

75%), moderadas de Sps (17-21%), y bajas de Py (5-9%) y Grs (0.6-6%); en el grupo 2 (G2) incluyeron a aquellos que presentaban inclusiones de rutilo, proporciones altas de Alm (47-74%), moderadas de Grs (13-24%), moderadas a bajas de Sps (3-39%) y bajas de Py (1-10%). Los granates del grupo 2 los clasificaron como afines al Complejo Chuacús, mientras que los del grupo 1 al Macizo de Chiapas, de acuerdo con los datos de granates metamórficos reportados por algunos autores en estas localidades (p. ej., Mora y Valley, 1985; Weber y Hecht, 2003; Ortega-Gutiérrez *et al.*, 2004; Solari *et al.*, 2004; Estrada-Carmona *et al.*, 2009; González-Guzmán *et al.*, 2016; Martens *et al.*, 2017; Maldonado *et al.*, 2018a; Maldonado *et al.*, 2018b). Sin embargo, dichos granates presentan amplia dispersión respecto a los campos composicionales que se proponen y las fuentes no pueden ser distinguidas claramente. Por tal motivo, los granates analizados por Ortega-Flores *et al.* (2018) fueron graficados en los diagramas propuestos en este trabajo, utilizando solo aquellos que corresponden a las posibles fuentes (CMC, Complejo Chuacús y Complejo Guichicovi). Los resultados sugieren que los granates del grupo 1 derivaron del CMC, mientras que los granates del grupo 2 se sobreponen con los campos del Complejo Chuacús y del CMC (Figura 4.7 a y b), por lo tanto, la procedencia de los granates del grupo 2 no puede ser determinada con certeza.

Para el caso de los granates detríticos de la cuenca de Otlaltepec de igual manera, se intentó determinar la procedencia de los granates de las formaciones Piedra Hueca y Otlaltepec con los datos de granates de los complejos analizados en esta tesis. Los granates fueron clasificados por Martini *et al.* (2016) en dos grupos: el grupo 1 (G1), presente en ambas formaciones, se caracterizan por contener proporciones altas de Alm (66-75%), moderadas de Py (14-22%), y bajas de Sps (2-7%) y Grs (1-10%); el grupo 2 (G2), presente solo en la Fm. Piedra Hueca, se caracteriza por granates con altas proporciones de Alm (64-75%), moderado Grs (12-18%), bajo a moderado de Py (6-15%) y bajo Sps (2-6%). Martini *et al.* (2016) utilizaron los datos geoquímicos de granates reportados para generar campos composicionales, a partir de los cuales se estableció que los granates del grupo 1 pertenecen al Complejo Oaxaqueño, mientras que los del grupo 2 pertenecen al Complejo Acatlán. Los granates detríticos analizados por Martini *et al.* (2016) graficados en los diagramas de discriminación propuestos en este trabajo (Figura 4.7 c y d), sugieren que dichas muestras podrían pertenecer a más de un complejo debido al traslape que existe entre los diferentes complejos metamórficos. Sin embargo, las características petrográficas y la datación de zircones detríticos, documentadas por Martini *et al.* (2016),

sugieren que las posibles fuentes fueron los complejos Acatlán, Oaxaqueño o Ayú. Utilizando los campos composicionales de estos tres complejos, se observa que los granates del grupo 1 se ajustan mejor al campo del Complejo Oaxaqueño, mientras que los granates del grupo 2 se sobreponen con los campos de los complejos Oaxaqueño y Acatlán. Esta información es consistente con las fuentes que sugieren Martini *et al.* (2016), pero los campos composicionales propuestos en este trabajo presentan menor dispersión. Los patrones normalizados de los elementos REE de los granates del grupo 1 y 2 de la Formación Piedra Hueca, muestran anomalía muy marcada en Eu (Figura 4.7 b). Si bien los granates del grupo 2 son graficados en un área de traslape entre los campos de los complejos Acatlán y Oaxaqueño, la anomalía en Eu solo está presente en los granates de los complejos Oaxaqueño y Ayú (Figura 4.8 a). Los granates detríticos no son agrupados en el campo composicional de componentes ideales del C. Ayú (Figura 4.7 c y d)., por lo tanto, es mas probable que el Complejo Oaxaqueño sea la principal fuente de granates de las formaciones Otlaltepec y Piedra Hueca.

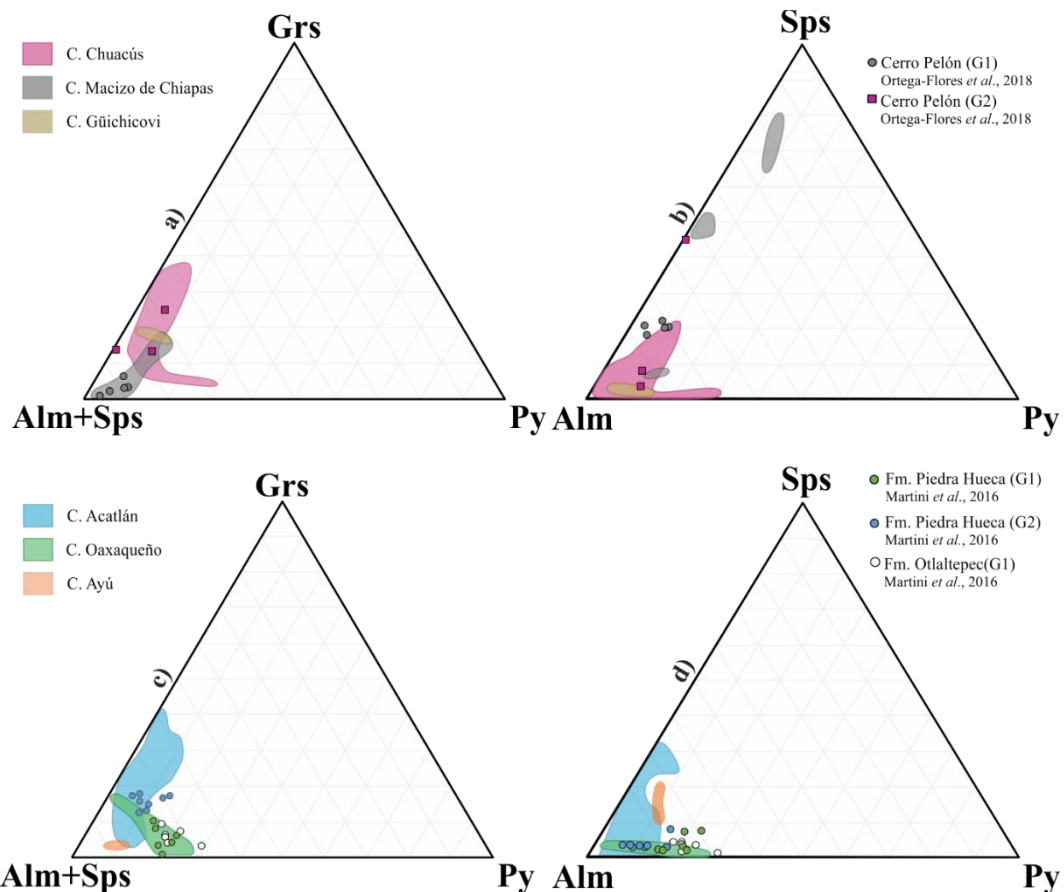


Figura 4. 7 Diagramas ternarios de granates detríticos con los campos composicionales propuestos en este trabajo: a-b) comparación de granates detríticos del área de Cerro Pelón con los campos de los complejos Chuacús, Güichicovi y Macizo Chiapas; c-d) comparación de granates detríticos de la cuenca de Otlaltepec con los campos formados por los complejos Acatlán, Oaxaqueño y Ayú.

La información obtenida en este trabajo ayuda a una discriminación más robusta y confiable para la solución de problemas de procedencia. Los trabajos previos (Martini *et al.*, 2016; Ortega-Flores *et al.*, 2018) están basados en una caracterización geoquímica de granates metamórficos que pudiera considerarse "limitada", lo que puede conducir a errores durante la interpretación. Esto sugiere que el estudio de granates detríticos requeriría de un análisis composicional completo que incluya elementos mayores y traza, incluidas las tierras raras.

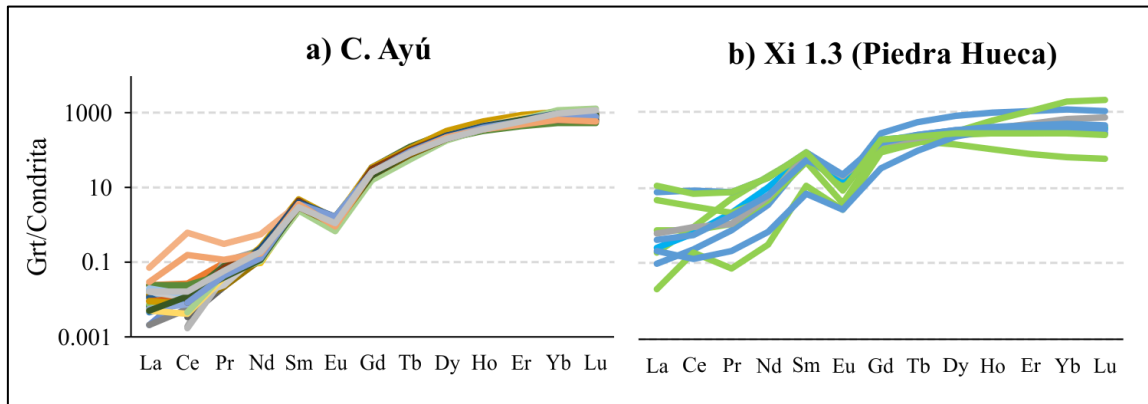


Figura 4. 8 Diagramas multielementales de REE de granates del Complejo Ayú (a) y de la Formación Piedra Hueca (b). Los diagramas fueron creados a partir de los datos obtenidos por Martini *et al.* (2016).

4.4. Alcances del trabajo de investigación

El intento por diferenciar composicionalmente los granates de distintos complejos metamórficos del sur de México para su uso como indicador de procedencia, condujo a la elaboración de una serie de diagramas de discriminación para lograr dicho objetivo, lo cual incluyó relaciones, sumas y productos entre la mayoría de los elementos analizados. Este trabajo cuenta con una amplia base de datos geoquímica (Tabla 4.1) que pueden ser de gran utilidad para futuros estudios de procedencia utilizando el granate. Hasta la fecha, solo se contaba con una base de datos de cerca de 58 cristales analizados (de origen metamórfico), de los cuales ninguno presenta una caracterización geoquímica completa (REE, traza, mayores). Esto resulta en un sesgo en los diagramas ternarios propuestos hasta ahora para resolver problemas de procedencia. Los resultados del presente trabajo permiten contar con un mayor número de datos que aumenta la confiabilidad en la definición de los campos composicionales.

La diferenciación de los granates se dificulta cuando proceden de diferentes complejos que compartan similitudes en los tipos de rocas y condiciones metamórficas alcanzadas durante su formación. Tal es el caso de los granates de los complejos Acatlán y Chuacús, que no pudieron ser diferenciados, cuyos granates se formaron en condiciones de alta presión. Sin embargo, para evitar en lo posible este escenario, es importante conocer la evolución geológica de la cuenca sedimentaria y los complejos metamórficos para realizar la comparación con el menor número de posibles fuentes.

En este trabajo se proponen varios diagramas de discriminación. Sin embargo, en un esfuerzo de sintetizarlos se realizó un diagrama utilizando únicamente la composición de los granates que tienen información geoquímica completa (elementos mayores y traza; Figura 4.9) que podría guiar de manera sencilla la identificación de la posible fuente metamórfica de granates detríticos derivados de los complejos metamórficos estudiados.

El diagrama parte de las proporciones molares de los componentes ideales y se distinguen 4 grupos. El primer paso para usar este diagrama es calcular las proporciones molares de los componentes ideales y ubicar el granate detrítico dentro de uno de los grupos. El primer grupo está compuesto por los complejos Acatlán, Xolapa y Chuacús, entre los cuales no es posible diferenciar los granates según la proporción molar de los componentes ideales. La única característica distintiva es la anomalía negativa de Eu en los granates del Complejo Xolapa de dicho grupo.

En los grupos restantes se ha señalado, en color rojo, el rango de proporciones finales que permiten diferenciar los granates de cada grupo. El segundo grupo corresponde al Complejo Oaxaqueño y es diferenciado del primero por las proporciones de Py. El tercer grupo está formado por los granates del Complejo Ayú y es diferenciado por las proporciones bajas de Grs. El cuarto grupo lo constituyen los granates del Complejo Macizo de Chiapas y se diferencia principalmente por el alto contenido de Sps.

Tabla 4.1 Comparación de la cantidad de información publicada y la obtenida en este trabajo sobre geoquímica de granate

Complejos Metamórficos	Trabajos Previos*					Este Trabajo				
	No. Muestras	No. Cristales	REE	Traza	Mayores	No. Muestras	No. Cristales	REE	Traza	Mayores
Acatlán	11	11			X	13	138	X	X	X
Oaxaqueño	5	5			X	6	62	X	X	X
Xolapa	6	23	X		X	6	54	X	X	X
Chuacús	16	16	X		X	4	54	X	X	X
Macizo de Chiapas	3	3			X	1	16	X	X	X
Total	41	58				30	327			

*Mora y Valley (1985), Corona-Chávez *et al.* (2006), Solari *et al.* (2004), Estrada-Carmona *et al.* (2009), Ortega-Gutiérrez *et al.* (2004), Vega-Granillo *et al.* (2007), Weber y Hetch (2003), Maldonado Villanueva (2011), Ramos-Arias *et al.* (2012), Galaz *et al.* (2013), Estrada-Carmona *et al.* (2016b), Maldonado *et al.* (2016), González-Guzmán *et al.* (2016), Maldonado *et al.* (2018a), Maldonado *et al.* (2018b).

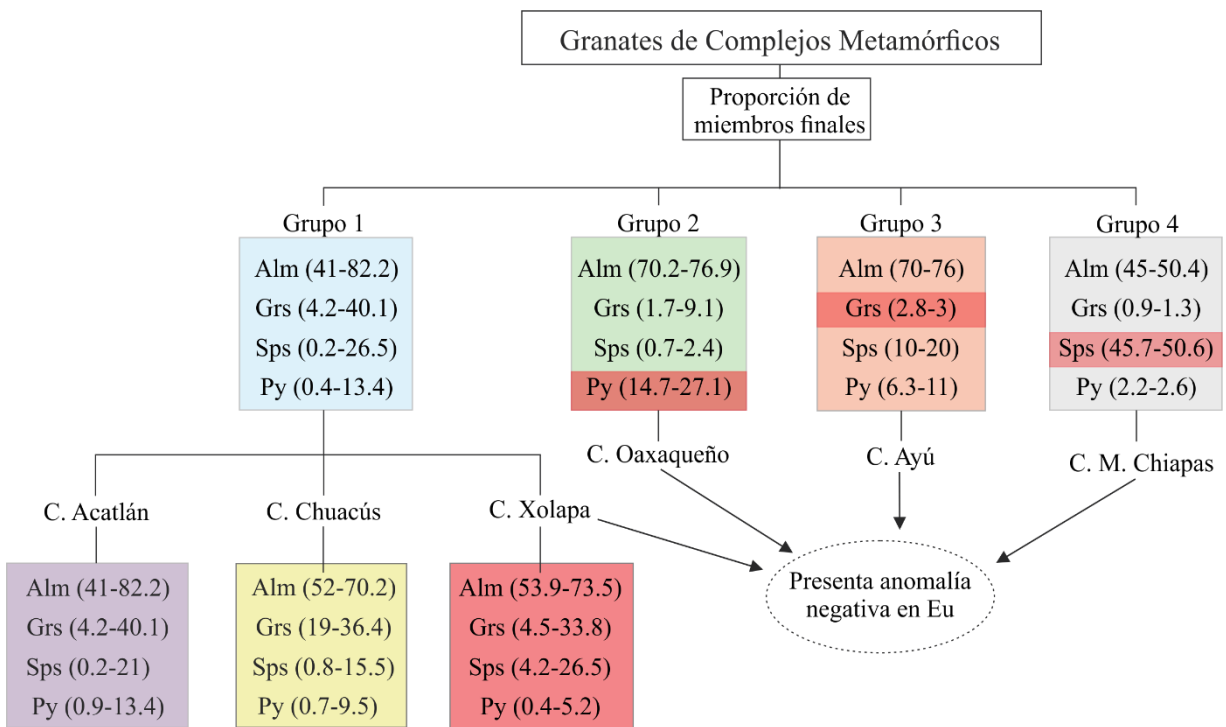


Figura 4.9 Diagrama que resume las características químicas de los granates que diferencian a los complejos metamórficos estudiados.

CONCLUSIONES

- La caracterización geoquímica de granate por LA-ICP-MS, utilizando de manera conjunta la composición de elementos mayores, traza y REE, permitió la diferenciación de los complejos metamórficos del sur de México y límites con Guatemala, logrando establecer su uso como trazador de procedencia.
- Las proporciones molares de componentes ideales permitieron identificar cuatro diferentes tipos de granate: los Tipo 1 que corresponden a los complejos Acatlán, Xolapa y Chuacús Alm_(41-82.2), Grs_(4.2-40.1), Sps_(0.2-26.5), Py_(0.4-13.4); los Tipo 2 correspondientes al Complejo Oaxaqueño Alm_(70.2-76.9), Grs_(1.7-9.1), Sps_(0.7-2.4), Py_(14.4-27.1); los Tipo 3 que pertenecen al Complejo Macizo de Chiapas Alm_(45-50.4), Grs_(0.9-1.3), Sps_(45.7-50.6), Py_(2.2-2.6); y los Tipo 4, andraditas de skarn.
- Los diagramas ternarios de componentes ideales (Alm+Sps-Py-Grs y Alm-Py-Sps) propuestos para los complejos estudiados son útiles para discriminar la procedencia de granates detríticos.
- Un diagrama ternario de componentes ideales (Al-Fe-Ca) es propuesto para diferenciar granates de tipo andradita relacionados a skarn, analizados mediante LA-ICP-MS.
- Las diferencias composicionales y de zoneamiento entre los granates de skarn y los de complejos metamórficos podrían estar relacionados a la diferencia de las condiciones de metamorfismo (térmico vs regional).
- La composición de elementos traza y tierras raras de granate no permite una diferenciación directa de los complejos por sí sola; sin embargo, puede dar información de la clase química y la historia de metamorfismo de algunas rocas en particular.
- El comportamiento de las tierras raras refleja la competencia y compatibilidad del granate durante su crecimiento con respecto a otras fases minerales que son compatibles con estos elementos, por ejemplo, como la anomalía en Eu producida por la cristalización en equilibrio con la plagioclasa.

- La anomalía de Eu en los patrones de tierras raras permitió separar los granates del C. Xolapa de los complejos Acatlán y Chuacús, algo que no se pudo definir con los elementos mayores y traza.
- El zoneamiento es una de las características del granate con menor utilidad para identificar su procedencia, sin embargo, pueden llegar a revelar aspectos petrogenéticos de las rocas metamórficas.
- Los diagramas de procedencia aquí propuestos tienen mayor utilidad cuando se observan y ponderan las posibles fuentes, de esta forma se reduce el traslape de campos composicionales. Su utilidad se ve reducida cuando las posibles fuentes muestran similitudes en los tipos de roca y las condiciones metamórficas a las que se formaron, por ejemplo, entre los complejos Acatlán y Chuacús.
- Este trabajo aporta una amplia base de datos de geoquímica de granate que permitirá reconocer en subsecuentes estudios de procedencia la posible fuente de las que se derivan. La reconfiguración de los campos composicionales de componentes ideales en diagramas ternarios, apoyados con las tierras raras y elementos traza, permite con mayor confiabilidad determinar la posible fuente.
- El uso del granate como trazador de procedencia no sustituye el trabajo geológico convencional (cartografía geológica, petrografía de detalle, conteo de puntos, geocronología U-Pb en zircones detríticos, etc.), sino que debe considerarse como una herramienta complementaria para un análisis de procedencia a detalle.
- Los resultados obtenidos por LA-ICP-MS respecto a EPMA son confiables. Además, esta técnica permite la obtención de datos con mayor rapidez, cuantificando con buena resolución tanto elementos mayores como traza en un mismo punto de abalación.

REFERENCIAS

Ague, J. J., y Carlson, W. D. (2013). Metamorphism as garnet sees it: The kinetics of nucleation and growth, equilibration, and diffusional relaxation. *Elements*, 9(6), 439-445.

Alaniz-Álvarez, S. (1988). Geología y petrología del Complejo Xolapa, en la Barranca de Xolapa, Estado de Guerrero. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. (Tesis de Licenciatura), 53 pp.

Aubrecht, R., Méres, Š., Sýkora, M., y Mikuš, T. (2009). Provenance of the detrital garnets and spinels from the Albian sediments of the Czorsztyn Unit (Pieniny Klippen Belt, Western Carpathians, Slovakia). *Geologica Carpathica*, 60(6), 463-483.

Baxter, E. F., y Scherer, E. E. (2013). Garnet geochronology: timekeeper of tectonometamorphic processes. *Elements*, 9(6), 433-438.

Bea, F., Montero, P., Garuti, G., y Zacharini, F. (1997). Pressure-Dependence of Rare Earth Element Distribution in Amphibolite-and Granulite-Grade Garnets. A LA-ICP-MS Study. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 21(2), 253-270.

Boggs, S., Jr. y D. Krinsley. (2006). *Application of Cathodoluminescence Imaging to Study of Sedimentary Rocks*: Cambridge University Press, Cambridge.

Caddick, M. J., y Kohn, M. J. (2013). Garnet: Witness to the evolution of destructive plate boundaries. *Elements*, 9(6), 427-432.

Cameron, K. L., Lopez, R., Ortega-Gutiérrez, F., Solari, L. A., Keppie, J. D., y Schulze, C. (2004). U-Pb geochronology and Pb isotopic compositions of leached feldspars: Constraints on the origin and evolution of Grenville rocks from eastern and southern Mexico. *Geological Society of America Memoirs*, 197, 755-769.

Camprubí, A., y Canet, C. (2009). Comment on “Berthierine and chamosite hydrothermal: genetic guides in the Pena Colorada magnetite-bearing ore deposit, Mexico”. *Earth, Planets and Space*, 61(2), 291-295.

Camprubí, A., Tolson, G., Centeno-García, E., Ortega, B., Bolaños, D., Portugal-Reyna, J. L., y Corona-Chávez, P. (2011). Mineralogy, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and structural analysis of the Peña Colorada magnetite deposits (Colima, Mexico). In 11th SGA Biennial Meeting—Let's Talk Ore Deposits (Vol. 2, pp. 446-448). Ediciones Universidad Católica del Norte Antofagasta, Chile.

Dorantes Castro, C. (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.

Chesapeake Gold Corporation. (2007). Chesapeake consolidates a new significant mining district in Veracruz, Mexico: Chesapeake Gold Corporation página Web Accesada en May 4, 2018, Sitio web: http://www.chesapeakegold.com/downloads/ChesapeakeGold_2007_10_10_40.pdf.

Corona-Chávez, P., Poli, S., y Bigioggero, B. (2006). Syn-deformational migmatites and magmatic-arc metamorphism in the Xolapa Complex, southern Mexico. *Journal of Metamorphic Geology*, 24(3), 169-191.

Čopjaková, R., Sulovský, P., y Paterson, B. A. (2005). Major and trace elements in pyrope–almandine garnets as sediment provenance indicators of the Lower Carboniferous Culm sediments, Drahany Uplands, Bohemian Massif. *Lithos*, 82(1-2), 51-70.

de Cserna, Z. (1965). Reconocimiento geológico en la Sierra Madre del Sur de México, entre Chilpancingo y Acapulco, estado de Guerrero. Instituto de geología.

Deer, W. A., Howie, R. A., y Zussman, J. (2001). *Rock-forming minerals: Orthosilicates*. A, 1A. Geological Society.

Elías-Herrera, M., Macías-Romo, C., Ortega-Gutiérrez, F., Sánchez-Zavala, J. L., Iriando, A., y Ortega-Rivera, A. (2007). Conflicting Stratigraphic and Geochronologic Data From the Acatlán Complex: "Ordovician" Granites Intrude Metamorphic and Sedimentary Rocks of Devonian-Permian age. In AGU Spring Meeting Abstracts.

Estrada-Carmona, J., Weber, B., Hecht, L., y Martens, U. (2009). PTt trajectory of metamorphic rocks from the central Chiapas Massif Complex: the Custepec Unit, Chiapas, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 243-259.

Estrada-Carmona, J., Weber, B., Martens, U., y López-Martínez, M. (2012). Petrogenesis of Ordovician magmatic rocks in the southern Chiapas Massif Complex: relations with the early Palaeozoic magmatic belts of northwestern Gondwana. *International Geology Review*, 54(16), 1918-1943.

Estrada-Carmona, J. (2013). Magmatismo ordovícico en el sur del Bloque Maya y metamorfismo de alta presión misisípico en el Terreno Mixteca: Implicaciones para la evolución tectónica del noroeste de Gondwana durante el Paleozoico (Estudio geoquímico e isotópico y geocronometría por U-Pb y Lu-Hf). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. (Tesis de Doctorado) 103 pp.

Estrada-Carmona, J., Weber, B., Scherer, E. E., Martens, U., y Elías-Herrera, M. (2016a). Lu-Hf geochronology of Mississippian high-pressure metamorphism in the Acatlán Complex, southern México. *Gondwana Research*, 34, 174-186.

Estrada-Carmona, J., Solari, L. A., y Ortega-Obregón, C. (2016b). Petrochronology of the migmatization event of the Xolapa Complex, Mexico, microchemistry and equilibrium growth of zircon and garnet. *International Geology Review*, 58(11), 1382-1397.

Fedorowich, J. S., Jain, J. C., Kerrich, R., y Sopuck, V. (1995). Trace-element analysis of garnet by laser-ablation microprobe ICP-MS. *Canadian Mineralogist*, 33, 469-469.

Galaz-Escaniña, G., H. (2013). Instituto Politécnico Nacional, Tesis de Licenciatura, 2016, 120 p.(Tesis de Doctorado). 50 pp.

Gillis, R. J., Gehrels, G. E., Ruiz, J., y de Dios González, L. A. F. (2005). Detrital zircon provenance of Cambrian–Ordovician and Carboniferous strata of the Oaxaca terrane, southern Mexico. *Sedimentary Geology*, 182(1-4), 87-100.

González-Guzmán, R., Weber, B., Manjarrez-Juárez, R., Cisneros de León, A., Hecht, L., y Herguera-García, J. C. (2016). Provenance, age constraints and metamorphism of Ediacaran

metasedimentary rocks from the El Triunfo Complex (SE Chiapas, México): evidence for Rodinia breakup and Iapetus active margin. *International Geology Review*, 58(16), 2065-2091.

Grew, E. S., Locock, A. J., Mills, S. J., Galuskina, I. O., Galuskin, E. V., y Hålenius, U. (2013). Nomenclature of the garnet supergroup. *American Mineralogist*, 98(4), 785-811.

Griffin, D. T., Hatch, D. M., Phillips, W. R., y Kulaksiz, S. (1992). Crystal chemistry and symmetry of a birefringent tetragonal pyralspite 75-grandite 25 garnet. *American Mineralogist*, 77(3-4), 399-406.

Harley, S. L., y Kelly, N. M. (2007). The impact of zircon–garnet REE distribution data on the interpretation of zircon U–Pb ages in complex high-grade terrains: an example from the Rauer Islands, East Antarctica. *Chemical Geology*, 241(1-2), 62-87.

Houghton, P. D. W., y Farrow, C. M. (1989). Compositional variation in Lower Old Red Sandstone detrital garnets from the Midland valley of Scotland and the Anglo-Welsh Basin. *Geological Magazine*, 126(4), 373-396.

Helbig, M., Keppie, J. D., Murphy, J. B., y Solari, L. A. (2012). U–Pb geochronological constraints on the Triassic–Jurassic Ayú Complex, southern México: derivation from the western margin of Pangea-A. *Gondwana Research*, 22(3-4), 910-927.

Hernández-Pineda, G. A., Solari, L., y Torres-de León, R. (2006). Geochronology of granitoids in the Tierra Colorada area, guerrero: its significance in the tectonic evolution of southern Mexico. In *V South American Symposium on Isotope Geology* (pp. 108-112).

Herrmann, U. R., Nelson, B. K., y Ratschbacher, L. (1994). The origin of a terrane: U/Pb zircon geochronology and tectonic evolution of the Xolapa complex (southern Mexico). *Tectonics*, 13(2), 455-474.

Hurlbut, C. S., y Klein, C. (1977). *Manual of mineralogy* (after James D. Dana). Wiley.

Jarosewich, E., Nelen, J. A., y Norberg, J. A. (1980). Reference samples for electron microprobe analysis. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 4(1), 43-47.

Jochum, K. P., Weis, U., Stoll, B., Kuzmin, D., Yang, Q., Raczek, I., y Günther, D. (2011). Determination of reference values for NIST SRM 610–617 glasses following ISO guidelines. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 35(4), 397-429.

Jochum, K. P., Stoll, B., Herwig, K., Willbold, M., Hofmann, A. W., Amini, M., y Raczek, I. (2006). MPI-DING reference glasses for in situ microanalysis: New reference values for element concentrations and isotope ratios. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(2).

Keppie, J. D., Dostal, J., Ortega-Gutiérrez, F., y Lopez, R. (2001). A Grenvillian arc on the margin of Amazonia: evidence from the southern Oaxacan Complex, southern Mexico. *Precambrian Research*, 112(3-4), 165-181.

Keppie, J. D., Dostal, J., Cameron, K. L., Solari, L. A., Ortega-Gutiérrez, F., y Lopez, R. (2003). Geochronology and geochemistry of Grenvillian igneous suites in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: tectonic implications. *Precambrian Research*, 120(3-4), 365-389.

Keppie, J. D., Sandberg, C. A., Miller, B. V., Sánchez-Zavala, J. L., Nance, R. D., y Poole, F. G. (2004a). Implications of latest Pennsylvanian to Middle Permian paleontological and U-Pb SHRIMP data from the Tecamate Formation to re-dating tectonothermal events in the Acatlán Complex, southern Mexico. *International Geology Review*, 46(8), 745-753.

Keppie, J. D., Nance, R. D., Dostal, J., Ortega-Rivera, A., Miller, B. V., Fox, D., y Lee, J. W. K. (2004b). Mid-Jurassic tectonothermal event superposed on a Paleozoic geological record in the Acatlán Complex of southern Mexico: Hotspot activity during the breakup of Pangea. *Gondwana Research*, 7(1), 238-260.

Keppie, J. D., Nance, R. D., Fernández-Suárez, J., Storey, C. D., Jeffries, T. E., y Murphy, J. B. (2006). Detrital zircon data from the Eastern Mixteca Terrane, Southern Mexico: evidence for an Ordovician—Mississippian continental rise and a Permo-Triassic clastic wedge adjacent to Oaxaquia. *International Geology Review*, 48(2), 97-111.

Keppie, J. D., y Dostal, J. (2007). Rift-related basalts in the 1.2–1.3 Ga granulites of the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: evidence for a rifted arc on the northwestern margin of Amazonia. *Proceedings of the Geologists' Association*, 118(1), 63-74.

Keppie, J. D., Dostal, J., y Elías-Herrera, M. (2007). Ordovician-Devonian oceanic basalts in the Cosoltepec Formation, Acatlan Complex, southern Mexico: Vestiges of the Rheic Ocean?. *Geological Society of America*, volumen especial 423, 477.

Keppie, J. D., Dostal, J., Murphy, J. B., y Nance, R. D. (2008). Synthesis and tectonic interpretation of the westernmost Paleozoic Variscan orogen in southern Mexico: From rifted Rheic margin to active Pacific margin. *Tectonophysics*, 461(1-4), 277-290.

Keppie, J. D., y Ortega-Gutiérrez, F. (2010). 1.3–0.9 Ga Oaxaquia (Mexico): remnant of an arc/backarc on the northern margin of Amazonia. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(1), 21-27.

Maldonado, R. (2011), *Petrología metamórfica de la porción central del Complejo Xolapa: región de Cacahuatpec-Amuzgos, Oaxaca*, Universidad Nacional Autónoma de México. (Tesis de Maestría) 164 p.

Maldonado, R., Weber, B., Ortega-Gutiérrez, F., y Hernández-Uribe, D. (2016a). Garnet-Chloritoid-paragonite metapelite from the Chuacús Complex (Central Guatemala): new evidence for continental subduction in the North America – Caribbean plate boundary. *European Journal of Mineralogy*, 28 (6), 1169-1186.

Maldonado, R., Weber, B., Ortega-Gutiérrez, F., y Ortiz-Joya, G. A. (2018b). Subduction of Proterozoic to Late Triassic continental basement in the Guatemala Suture Zone: A petrological and geochronological study of high-pressure metagranitoids from Chuacús complex. *Lithos*, 308, 83-103.

Maldonado, R., Weber, B., Ortega-Gutiérrez, F., y Solari, L. A. (2018). High-pressure metamorphic evolution of eclogite and associated metapelite from the Chuacús complex (Guatemala Suture Zone): Constraints from phase equilibria modelling coupled with Lu-Hf and U-Pb geochronology. *Journal of Metamorphic Geology*, 36(1), 95-124.

Mange, M. A., y Maurer, H. (1992). *Heavy minerals in colour*. Springer Science y Business Media.

Manjarrez-Juárez, U. R. (2013). *Basamento grenviliano y orogénesis ordovícica en el sur del Macizo de Chiapas—Implicaciones paleogeográficas para el Bloque Maya Sur en el*

Paleozoico temprano. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. (Tesis de Maestría) 80 pp.

Manzotti, P., y Ballèvre, M. (2013). Multistage garnet in high-pressure metasediments: Alpine overgrowths on Variscan detrital grains. *Geology*, 41(11), 1151-1154.

Martens, U. C., Brueckner, H. K., Mattinson, C. G., Liou, J. G., y Wooden, J. L. (2012). Timing of eclogite-facies metamorphism of the Chuacús complex, Central Guatemala: record of Late Cretaceous continental subduction of North America's sialic basement. *Lithos*, 146, 1-10.

Martini, M., Ramírez-Calderón, M., Solari, L., Villanueva-Amadoz, U., Zepeda-Martínez, M., Ortega-Gutiérrez, F., y Elías-Herrera, M. (2016). Provenance analysis of Jurassic sandstones from the Otlaltepec Basin, southern Mexico: Implications for the reconstruction of Pangea breakup. *Geosphere*, 12(6), 1842-1864.

Milliken, K. L., y Mack, L. E. (1990). Subsurface dissolution of heavy minerals, Frio Formation sandstones of the ancestral Rio Grande Province, South Texas. *Sedimentary Geology*, 68(3), 187-199.

Mora, C. I., y Valley, J. W. (1985). Ternary feldspar thermometry in granulites from the Oaxacan Complex, Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89(2-3), 215-225.

Morton, A. C. (1985). A new approach to provenance studies: electron microprobe analysis of detrital garnets from Middle Jurassic sandstones of the northern North Sea. *Sedimentology*, 32(4), 553-566.

Morton, A. C. (1985). A new approach to provenance studies: electron microprobe analysis of detrital garnets from Middle Jurassic sandstones of the northern North Sea. *Sedimentology*, 32(4), 553-566.

Morton, A. C. (1991). Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. Geological Society, London, Special Publications, 57(1), 31-45.

Morton, A. C., y Hallsworth, C. (2007). Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis. *Developments in Sedimentology*, 58, 215-245.

Murphy, J. B., Keppie, J. D., Nance, R. D., Miller, B. V., Dostal, J., Middleton, M., y Storey, C. D. (2006). Geochemistry and U–Pb protolith ages of eclogitic rocks of the Asis Lithodeme, Piaxtla Suite, Acatlán Complex, southern Mexico: tectonothermal activity along the southern margin of the Rheic Ocean. *Journal of the Geological Society*, 163(4), 683-695.

Nance, R. D., Miller, B. V., Keppie, J. D., Murphy, J. B., y Dostal, J. (2007). Vestige of the Rheic ocean in North America: the Acatlan complex of southern Mexico. *Special Papers-Geological Society of America*, 423, 437.

Ortega-Flores, B., Martini, M., Guerrero-Moreno, S., Colás, V., Solari, L., Centeno-Garcia, E., y Grajales-Nishimura, M. (2018). Provenance analysis of Oligocene sandstone from the Cerro Pelón area, southern Gulf of Mexico. *International Geology Review*, 1-21.

Ortega-Gutiérrez, F. (1978). Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca baja, estados de Puebla y Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2(2), 112-131.

Ortega-Gutiérrez, F. (1981). Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance. *Geofísica Internacional*, 20(3).

Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Reyes-Salas, M., Macías-Romo, C., y López, R. (1999). Late Ordovician–Early Silurian continental collisional orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections. *Geology*, 27(8), 719-722.

Ortega-Gutiérrez, F., Solari, L. A., Solé, J., Martens, U., Gómez-Tuena, A., Morán-Ical, S., y Reyes-Salas, M. (2004). Polyphase, high-temperature eclogite-facies metamorphism in the Chuacús Complex, central Guatemala: Petrology, geochronology, and tectonic implications. *International Geology Review*, 46(5), 445-470.

Ortega-Obregon, C., Keppie, J. D., Murphy, J. B., Lee, J. K. W., y Ortega-Rivera, A. (2009). Geology and geochronology of Paleozoic rocks in western Acatlán Complex, southern Mexico: Evidence for contiguity across an extruded high-pressure belt and constraints on Paleozoic reconstructions. *Geological Society of America Bulletin*, 121(11-12), 1678-1694.

Ortega-Obregón, C. (2011). Geoquímica y geocronología de las unidades metamórficas del Complejo Acatlán en el área de Olinalá, Guerrero. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. (Tesis de Doctorado), 64 pp.

Pérez-Gutiérrez, R., Solari, L. A., Gómez-Tuena, A., y Martens, U. (2009). Evolución geológica mesozoica del Complejo Xolapa al norte de Acapulco, sur de México: implicaciones para las reconstrucciones paleogeográficas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 201-221.

Pettijohn, F. J. (1941). Persistence of heavy minerals and geologic age. *The Journal of Geology*, 49(6), 610-625.

Pompa-Mera, V. (2009). Geoquímica y geocronología de los complejos intrusivos en el sureste de Chiapas, México. Instituto de Geofísica, UNAM, México, (Tesis de Licenciatura).

Keppie, J. D., Dostal, J., Cameron, K. L., Solari, L. A., Ortega-Gutiérrez, F., y Lopez, R. (2003). Geochronology and geochemistry of Grenvillian igneous suites in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: tectonic implications. *Precambrian Research*, 120(3-4), 365-389.

Ramos-Arias, M. A. (2011). Petrogénesis y extrusión de rocas de alta presión (facies esquisto azul-eclogita) en la porción oeste del Complejo Acatlán, Ixcamilpa de Guerrero, Pue., sur de México. Guerrero. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. (Tesis de Doctorado), 126 pp.

Ramos-Arias, M. A., Keppie, J. D., Lee, J. K., y Ortega-Rivera, A. (2012). A Carboniferous high-pressure klippe in the western Acatlán Complex of southern México: Implications for the tectonothermal development and palaeogeography of Pangea. *International Geology Review*, 54(7), 779-798.

Ratschbacher, L., Franz, L., Min, M., Bachmann, R., Martens, U., Stanek, K., y López-Martínez, M. (2009). The North American-Caribbean plate boundary in Mexico-Guatemala-Honduras. *Geological Society, London, Special Publications*, 328(1), 219-293.

Rollinson, H. R. (2014). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Routledge.

Rubatto, D., y Hermann, J. (2007). Experimental zircon/melt and zircon/garnet trace element partitioning and implications for the geochronology of crustal rocks. *Chemical Geology*, 241(1-2), 38-61.

Sabeen, H. M., Ramanujam, N., y Morton, A. C. (2002). The provenance of garnet: constraints provided by studies of coastal sediments from southern India. *Sedimentary Geology*, 152(3-4), 279-287.

Sánchez-Zavala, J. L., Ortega-Gutierrez, F., Keppie, J. D., Jenner, G. A., Belousova, E., y Macías-Romo, C. (2004). Ordovician and Mesoproterozoic zircons from the Tecamate Formation and Esperanza granitoids, Acatlán Complex, southern Mexico: local provenance in the Acatlán and Oaxacan complexes. *International Geology Review*, 46(11), 1005-1021.

Shimizu, N., y Richardson, S. H. (1987). Trace element abundance patterns of garnet inclusions in peridotite-suite diamonds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(3), 755-758.

Solari, L. A., Keppie, J. D., Ortega-Gutiérrez, F., Cameron, K. L., y Lopez, R. (2004). ~ 990 Ma peak granulitic metamorphism and amalgamation of Oaxaquia, Mexico: U Pb zircon geochronological and common Pb isotopic data. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(2).

Solari, L. A., de León, R. T., Hernández Pineda, G., Solé, J., Solís-Pichardo, G., y Hernández-Treviño, T. (2007). Tectonic significance of Cretaceous–Tertiary magmatic and structural evolution of the northern margin of the Xolapa Complex, Tierra Colorada area, southern Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 119(9-10), 1265-1279.

Solari, L. A., Tuena, A. G., Gutiérrez, F. O., y Ortega-Obregón, C. (2011). The Chuacús Metamorphic Complex, central Guatemala: geochronological and geochemical constraints on its Paleozoic-Mesozoic evolution. *Geologica Acta*, 9(3-4), 329-350.

Solari, L. A., Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Ortega-Obregón, C., Macías-Romo, C., y Reyes-Salas, M. (2014). Detrital provenance of the Grenvillian Oaxacan Complex, southern Mexico: a zircon perspective. *International Journal of Earth Sciences*, 103(5), 1301-1315.

Spear, F. S., y Spear, F. S. (1993). *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths* (Vol. 1, p. 799). Washington, DC: Mineralogical Society of America.

Spear, F. S., y Kohn, M. J. (1996). Trace element zoning in garnet as a monitor of crustal melting. *Geology*, 24(12), 1099-1102.

Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Gehrels, G. E., Meza-Figueroa, D. M., Vega-Granillo, R., y Campa-Uranga, M. F. (2005). U–Pb geochronology of the Acatlán Complex and implications for the Paleozoic paleogeography and tectonic evolution of southern Mexico. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(3-4), 682-699.

Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Corona-Chavez, P., Gehrels, G. E., Sarmiento-Villagrana, A., García-Díaz, J. L., y Salgado-Souto, S. A. (2013). Origin and provenance of basement metasedimentary rocks from the Xolapa Complex: New constraints on the Chortis–southern Mexico connection. *Earth and Planetary Science Letters*, 369, 188-199.

Tsujimori, T., Sisson, V. B., Liou, J. G., Harlow, G. E., Sorensen, S. S., Hacker, B. R., y McClelland, W. C. (2006). Petrologic characterization of Guatemalan lawsonite eclogite: Eclogitization of subducted oceanic crust in a cold subduction zone. *Special Papers-Geological Society of America*, 403, 147.

Vega-Granillo, R., Talavera-Mendoza, O., Meza-Figueroa, D., Ruiz, J., Gehrels, G. E., López-Martínez, M., y de la Cruz-Vargas, J. C. (2007). Pressure-temperature-time evolution of Paleozoic high-pressure rocks of the Acatlán Complex (southern Mexico): Implications for the evolution of the Iapetus and Rheic Oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 119(9-10), 1249-1264.

Witt, C., Bricau, S., y Carter, A. (2012). New constraints on the origin of the Sierra Madre de Chiapas (south Mexico) from sediment provenance and apatite thermochronometry. *Tectonics*, 31(6).

Weber, B., y Köhler, H. (1999). Sm–Nd, Rb–Sr and U–Pb geochronology of a Grenville Terrane in Southern Mexico: origin and geologic history of the Guichicovi Complex. *Precambrian Research*, 96(3-4), 245-262.

Weber, B., y Hecht, L. (2003). Petrology and geochemistry of metagneous rocks from a Grenvillian basement fragment in the Maya block: the Guichicovi complex, Oaxaca, southern Mexico. *Precambrian Research*, 124(1), 41-67.

Weber, B., Schaaf, P., Valencia, V. A., Iriondo, A., y Ortega-Gutiérrez, F. (2006). Provenance ages of late Paleozoic sandstones (Santa Rosa Formation) from the Maya Block, SE

México: implications on the tectonic evolution of western Pangea. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(3), 262-276.

Weber, B., Iriondo, A., Premo, W. R., Hecht, L., y Schaaf, P. (2007). New insights into the history and origin of the southern Maya block, SE México: U–Pb–SHRIMP zircon geochronology from metamorphic rocks of the Chiapas massif. *International Journal of Earth Sciences*, 96(2), 253-269.

Weber, B., Valencia, V. A., Schaaf, P., Pompa-Mera, V., y Ruiz, J. (2008). Significance of provenance ages from the Chiapas Massif Complex (southeastern Mexico): redefining the Paleozoic basement of the Maya Block and its evolution in a peri-Gondwanan realm. *The Journal of Geology*, 116(6), 619-639.

Weber, B., Scherer, E. E., Schulze, C., Valencia, V. A., Montecinos, P., Mezger, K., y Ruiz, J. (2010). U–Pb and Lu–Hf isotope systematics of lower crust from central-southern Mexico—Geodynamic significance of Oaxaquia in a Rodinia Realm. *Precambrian Research*, 182(1-2), 149-162.

Weber, B., González-Guzmán, R., Manjarrez-Juárez, R., de León, A. C., Martens, U., Solari, L., y Valencia, V. (2018). Late Mesoproterozoic to Early Paleozoic history of metamorphic basement from the southeastern Chiapas Massif Complex, Mexico, and implications for the evolution of NW Gondwana. *Lithos*, 300, 177-199.

Ya. ez, P., Ruiz, J., Patchett, P. J., Ortega-Gutierrez, F., y Gehrels, G. E. (1991). Isotopic studies of the Acatlan complex, southern Mexico: Implications for Paleozoic North American tectonics. *Geological Society of America Bulletin*, 103(6), 817-828.

ANEXO I

Anexo 1. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Acatlán
OL-104

	OL-104																		OL102								
	G1 (B)	G1 (C)	G1 (B)	G2 (C)	G3 (C)	G4 (B)	G4 (C)	G5 (B)	G5 (C)	G6 (B)	G6 (B-C)	G7 (B-C)	G8 (B)	G8 (C)	G9 (B)	G9 (C)	G10 (B)	G10 (C)	G1 (B1)	G1 (B-C1)	G1 (C)	G1 (B-C2)	G1 (B2)	G2 (B1)	G2 (B-C1)	G2 (C)	
(% peso)*																											
SiO ₂	36.6	39.6	37.7	37.6	37.2	37.6	37.6	37.9	37.3	37.7	37.0	37.6	38.2	39.4	39.5	38.7	45.4	41.7	37.6	37.4	37.7	37.7	37.7	37.6	38.3	37.3	
Al ₂ O ₃	20.3	19.3	20.7	20.4	20.3	20.2	20.1	20.0	20.3	20.4	20.1	20.2	20.3	19.7	20.0	19.9	19.7	19.2	20.7	20.8	20.4	20.6	20.7	20.7	20.3	20.5	
CaO	2.52	2.25	2.57	3.61	3.56	3.70	4.45	1.79	1.92	3.46	4.10	2.61	2.97	3.35	2.90	3.07	2.03	2.65	5.59	5.50	5.64	5.34	5.53	5.07	5.87	5.85	
MgO	4.02	3.56	4.37	4.58	4.08	4.55	3.95	5.19	5.08	4.38	3.57	4.38	5.35	2.83	5.00	4.23	4.65	4.00	3.28	2.66	2.25	2.68	3.41	3.35	2.23	2.07	
FeO	32.9	29.9	32.8	32.4	33.1	32.3	31.2	34.1	34.6	33.0	33.5	34.6	32.5	25.1	31.5	31.3	27.1	28.9	32.1	32.4	31.6	32.4	32.0	32.8	31.4	31.2	
MnO	3.15	4.96	1.74	1.37	1.60	1.69	2.64	0.7	0.5	1.10	1.59	0.6	0.7	9.3	0.8	2.55	1.05	3.35	0.6	1.19	2.29	1.14	0.6	0.4	1.87	2.92	
TiO ₂	0.52	0.44	0.12	0.07	0.09	0.02	0.03	0.44	0.33	0.02	0.13	0.02	0.04	0.27	0.29	0.13	0.06	0.12	0.08	0.04	0.05	0.04	0.07	0.05	0.06	0.16	
(ppm)**																											
Li	10.8	20.4	18.8	10.8	11.7	17.4	18.4	17.5	19.8	14.6	31.5	12.3	21.4	32.7	16.7	23.0	15.5	17.0	8.64	8.91	19.1	11.0	7.81	10.9	19.2	17.7	
Sc	32.2	31.3	39.6	29.6	63.1	94.2	80.7	61.9	72.0	122	78.1	96.6	53.2	11.4	40.4	32.5	34.8	30.6	62.5	56.9	59.9	62.0	63.6	64.9	90.8	92.7	
V	12.2	12.1	13.9	22.5	34.5	15.9	18.4	34.4	31.0	10.9	16.9	14.8	11.2	12.1	9.5	8.98	24.2	15.2	17.8	17.6	23.1	21.7	18.2	16.3	24.5	23.9	
Cr	152	29.0	108	57.4	82.2	54.8	156	65.9	57.0	79.1	109	56.6	16.8	36.5	34.5	64.6	41.3	47.8	19.0	19.0	42.3	59.3	19.1	5.53	86.1	68.2	
Co	22.2	20.7	24.9	42.5	39.5	46.3	38.6	44.7	41.1	48.7	38.8	38.3	41.3	15.5	35.6	28.2	39.1	31.6	26.7	21.5	19.5	23.2	28.5	26.4	19.2	17.3	
Zn	114	108	131	127	123	155	151	164	170	159	144	151	138	74.0	116	114	158	265	99.7	85.9	90.1	93.9	97.6	96.9	83.2	69.6	
Ga	3.81	4.72	4.60	5.21	4.53	5.77	5.30	5.10	5.37	4.56	4.17	4.86	4.16	6.08	3.96	5.04	8.65	4.85	4.47	4.12	4.68	4.34	5.00	4.71	4.75	4.09	
Ge	6.19	9.2	6.79	3.86	7.21	11.9	15.6	7.67	8.70	10.3	17.0	9.1	6.52	3.81	6.31	6.15	5.72	2.98	9.4	12.0	14.2	12.1	9.3	10.2	14.7	14.2	
Y	157	782	186	104	263	326	539	298	244	437	1326	303	537	145	316	314	158	181	335	468	725	351	295	692	728	693	
Nb	3.69	5.80	0.66	0.27	0.62	--	0.05	2.88	0.71	0.01	0.92	0.005	0.005	9.30	22.9	7.72	0.31	1.96	--	--	--	--	--	--	0.02	0.82	
Zr	10.7	17.2	11.4	8.00	8.40	4.40	600	460	7.20	7.00	6.30	27.0	9.6	48.0	9.9	32.0	360	95.0	5.63	10.2	4.33	12.9	5.60	4.40	310	82.0	
La	0.05	0.04	0.02	0.02	0.30	0.03	0.05	0.03	0.30	--	0.005	2.20	--	0.15	0.04	8.00	0.42	0.33	--	--	0.05	0.05	0.02	--	0.004	--	
Ce	0.13	0.14	0.05	0.06	1.22	0.05	0.23	0.11	0.68	--	0.003	5.20	0.02	0.19	0.07	18.0	0.96	0.40	--	--	0.06	0.13	0.02	0.01	0.01	--	
Pr	0.033	0.025	0.008	0.008	0.157	0.013	0.026	0.022	0.147	--	--	0.520	0.005	0.069	0.036	2.10	0.223	0.175	0.001	--	0.013	0.014	0.014	0.001	0.006	--	
Nd	0.28	0.33	0.23	0.17	1.07	0.16	0.17	0.39	0.82	0.08	0.03	1.60	0.14	0.68	0.29	7.60	1.20	0.98	0.13	0.03	0.09	0.16	0.11	0.08	0.04	0.03	
Sm	1.82	2.61	2.00	0.70	1.37	0.98	0.58	1.80	2.22	1.14	0.33	2.36	1.33	1.65	1.51	2.70	2.03	1.97	0.96	0.31	0.15	0.48	0.84	0.86	0.28	0.26	
Eu	1.32	1.42	1.48	0.57	0.76	1.06	0.49	1.39	1.65	1.13	0.36	1.52	1.24	1.15	1.23	1.34	1.43	1.06	0.93	0.38	0.24	0.43	0.95	0.85	0.29	0.23	
Gd	17.2	23.6	18.4	3.52	9.9	13.6	7.11	14.1	13.7	15.7	5.58	18.9	12.6	5.78	11.8	10.7	9.2	9.2	14.2	5.60	3.77	6.51	13.5	14.4	4.13	4.27	
Tb	5.28	10.1	6.41	1.28	3.71	7.84	5.57	5.43	4.95	8.98	5.13	8.18	6.31	1.72	4.82	4.01	2.72	2.73	8.23	4.18	3.30	4.43	7.48	9.21	3.37	3.44	
Dy	35.2	109	41.9	13.4	35.9	73.2	77.5	49.0	40.6	87.6	107	65.4	67.7	15.8	43.8	38.7	23.7	25.9	77.8	58.0	65.9	55.5	72.4	114	64.6	62.1	
Ho	5.74	28.7	6.77	3.53	8.72	12.5	19.3	10.8	8.56	17.5	43.3	12.6	17.9	4.38	10.6	10.6	5.41	6.46	12.6	17.3	25.7	12.9	11.5	25.6	26.3	24.1	
Er	14.1	98.6	16.7	12.5	29.9	25.7	51.0	32.1	23.8	46.9	178	31.0	65.4	18.3	36.2	42.0	17.5	22.1	22.9	64.7	106	36.2	21.1	61.0	118	106	
Yb	11.3	97.1	12.9	14.9	35.8	13.5	29.6	30.2	21.0	35.6	158	20.8	94.5	35.7	52.0	70.1	20.8	30.0	13.4	78.1	140	32.1	12.2	37.6	194	154	
Lu	1.48	13.3	1.79	2.15	5.24	1.63	3.56	3.98	2.74	4.78	18.6	2.52	14.1	5.56	7.87	11.3	3.12	4.47	1.78	11.1	23.7	4.38	1.71	4.93	34.3	25.4	
Hf	0.39	0.86	0.26	0.18	0.29	0.24	15.2	12.3	0.23	0.20	0.28	0.79	0.35	1.72	0.18	0.59	9.70	2.26	0.32	0.15	0.04	0.56	0.32	0.23	11.8	2.20	
Ta	0.48	0.63	0.11	0.09	0.05	0.03	0.04	0.39	0.09	0.03	0.17	0.02	0.02	1.18	0.47	0.59	0.10	0.29	0.01	0.04	0.04	0.03	0.01	0.06	0.10	0.16	
Pb	0.30	0.27	1.19	0.19	0.36	0.45	0.62	0.29	0.90	0.11	0.12	0.25	0.19	0.66	0.32	0.95	2.98	1.98	--	--	0.30	0.32	0.19	--	0.08	0.07	
Th	0.07	0.07	0.07	0.03	0.09	0.04	0.71	0.56	0.09	--	0.01	0.65	0.01	0.14	0.10	1.90	0.90	0.45	--	--	0.01	0.21	--	--	0.22	0.05	
U	0.318	0.820	0.156	0.048	0.173	0.007	1.21	1.80	0.239	0.014	0.050	0.184	0.042	0.510	0.186	0.410	1.31	0.800	--	0.090	0.018	0.277	0.005	0.004	1.13	0.510	

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--": Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

Anexo 1. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Acatlán
OL102

	G2 (B-C2)	G2 (B2)	G3 (B1)	G3 (B-C1)	G3 (B-C2)	G3 (C)	G3 (B-C3)	G3 (B-C4)	G3 (B2)	G4 (B)	G4 (C)
(% peso)*											
SiO ₂	37.9	38.1	37.9	37.2	36.8	36.0	37.5	36.8	37.2	37.4	37.4
Al ₂ O ₃	20.2	20.6	20.6	20.7	20.4	20.5	19.9	20.7	20.8	20.9	20.7
CaO	5.53	5.46	4.74	4.57	5.55	6.32	5.97	4.80	4.80	4.86	6.16
MgO	2.27	3.52	3.54	3.15	2.03	1.51	1.55	2.66	3.49	3.82	3.60
FeO	32.3	31.7	33.0	33.7	29.3	25.0	25.8	32.5	33.5	31.9	30.9
MnO	1.71	0.5	0.1	0.6	5.79	10.4	8.82	2.55	0.1	1.04	1.17
TiO ₂	0.05	0.08	0.08	0.06	0.18	0.15	0.46	0.04	0.07	0.03	0.06
(ppm)**											
Li	14.1	12.6	8.50	12.2	12.4	17.5	12.5	10.7	7.90	8.30	9.4
Sc	90.0	85.7	61.0	56.6	142	91.2	119	63.6	72.6	57.4	44.3
V	22.7	21.3	24.5	18.4	24.7	29.8	34.8	16.0	23.3	15.3	25.2
Cr	45.4	83.4	67.8	40.1	30.2	36.2	33.7	42.2	58.2	58.3	35.4
Co	20.1	30.9	23.3	19.6	11.4	9.5	10.4	15.0	21.2	30.6	30.0
Zn	73.7	108	73.1	63.2	46.5	33.4	41.0	58.7	74.2	114	119
Ga	4.19	5.35	4.83	4.42	5.08	5.63	5.13	4.06	5.06	4.74	5.20
Ge	13.6	8.29	8.38	10.7	12.1	14.4	13.1	12.5	8.43	7.01	9.1
Y	440	330	110	550	230	87.0	84.0	601	151	476	102
Nb	--	--	--	--	0.82	0.33	3.14	--	--	--	0.02
Zr	7.80	9.3	9.8	6.60	142	4.90	5.20	6.90	6.67	3.50	8.30
La	0.001	--	--	--	31.0	0.30	0.002	--	--	--	0.07
Ce	--	0.01	0.004	0.002	64.0	0.65	0.004	--	0.01	--	0.14
Pr	0.006	--	--	--	7.60	0.085	--	--	0.004	--	0.028
Nd	0.07	0.12	0.14	0.13	25.1	0.28	0.05	0.03	0.18	0.05	0.12
Sm	0.39	1.33	1.14	0.84	3.90	0.06	0.10	0.47	1.11	0.51	0.03
Eu	0.39	1.26	0.88	0.78	1.01	0.05	0.10	0.40	1.05	0.64	0.05
Gd	6.44	16.3	11.3	10.5	4.90	0.7	1.26	5.68	13.0	11.0	1.0
Tb	4.17	8.75	3.79	6.63	1.86	0.41	0.75	4.20	4.78	5.95	0.65
Dy	56.1	75.5	24.3	81.4	24.0	5.89	8.64	63.3	32.1	74.7	10.8
Ho	15.9	11.7	4.11	20.2	6.91	2.32	2.33	19.5	5.48	18.0	3.26
Er	55.3	21.9	10.4	61.2	27.2	14.4	10.1	69.3	15.1	52.6	12.2
Yb	68.8	11.9	7.61	52.0	37.1	51.7	17.3	72.0	10.2	45.0	16.8
Lu	11.0	1.41	0.9	6.39	6.29	11.7	3.29	10.5	1.29	6.28	2.83
Hf	0.29	0.32	0.22	0.30	3.90	--	0.10	0.25	0.20	0.17	--
Ta	0.042	0.018	0.01	0.02	0.10	0.13	0.42	0.01	0.01	0.04	0.01
Pb	--	0.04	--	--	0.71	0.18	--	0.02	0.06	--	0.48
Th	0.002	--	--	--	4.40	0.10	0.01	--	--	--	0.05
U	0.018	--	0.004	--	0.8	0.038	0.018	0.005	0.004	0.001	0.083

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--" : Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

OL216

	G1 (C)	G2 (B)	G2 (C)	G3 (C)	G4 (B)	G4 (C)	G5 (B1)	G5 (C)	G5 (B2)	G6 (C)	G7 (B1)	G7 (C)	G7 (B2)	G8 (B1)
(% peso)*														
SiO ₂	37.3	36.0	36.6	36.4	36.2	36.4	38.7	40.7	40.3	38.4	36.3	36.9	36.5	37.3
Al ₂ O ₃	20.2	21.0	21.0	20.8	20.7	20.9	18.9	20.8	21.2	20.9	21.0	20.9	21.0	20.7
CaO	9.6	9.8	10.2	9.6	9.5	9.7	9.6	7.93	9.2	9.4	9.9	9.3	9.8	9.6
MgO	1.08	1.22	1.02	1.08	1.82	1.13	2.68	1.58	1.37	1.24	1.29	1.29	1.32	1.29
FeO	26.2	27.5	25.2	26.3	28.6	26.4	24.0	24.1	26.1	25.9	28.2	27.8	28.2	27.8
MnO	5.43	4.29	5.85	5.64	3.03	5.26	2.16	4.68	1.75	4.06	3.15	3.66	2.99	3.27
TiO ₂	0.18	0.16	0.18	0.18	0.12	0.18	3.96	0.15	0.07	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13
(ppm)**														
Li	0.9	0.7	1.07	0.8	4.93	--	12.5	5.07	1.16	4.06	1.08	1.10	0.9	0.5
Sc	50.9	59.5	42.4	55.1	39.7	43.1	90.0	25.3	54.6	55.1	75.3	73.5	75.8	71.9
V	127	131	174	148	237	212	348	150	121	179	157	156	217	157
Cr	--	--	0.8	--	2.75	--	27.6	2.17	3.14	2.49	2.71	3.83	5.20	1.71
Co	8.47	10.9	8.69	9.4	15.2	8.93	23.7	12.6	12.1	10.6	11.4	10.9	12.1	10.9
Zn	11.3	12.1	12.8	10.1	30.9	9.4	57.2	23.2	15.5	16.1	10.9	13.1	11.8	12.1
Ga	4.95	5.03	8.08	5.32	6.56	5.38	13.1	9.2	5.72	7.35	4.99	5.06	4.82	5.05
Ge	5.11	4.86	4.63	6.05	4.87	5.46	4.27	4.09	4.73	4.85	4.58	5.11	5.47	4.80
Y	73.6	78.6	68.8	84.3	65.3	98.0	75.0	41.7	35.7	84.7	76.4	85.0	67.3	63.2
Nb	0.01	--	--	0.02	--	--	9.50	--	--	--	--	--	--	--
Zr	4.40	3.80	4.50	3.60	4.80	1.67	18.6	2.60	2.70	2.80	3.00	4.00	3.40	3.70
La	--	--	0.07	--	--	--	0.44	0.01	0.01	0.90	0.20	0.01	--	0.01
Ce	--	0.001	0.25	--	--	0.003	2.91	0.02	0.03	2.34	0.43	0.01	--	--
Pr	--	--	0.050	--	--	0.004	0.840	0.007	0.002	0.360	0.052	--	--	--
Nd	--	--	0.25	--	--	--	5.90	0.02	--	1.89	0.23	--	--	--
Sm	--	0.02	0.10	--	0.06	0.02	3.18	0.01	--	0.49	--	0.01	--	0.03
Eu	0.01	0.02	0.18	0.01	0.03	0.02	1.06	0.04	0.02	0.21	0.04	0.02	0.02	0.01
Gd	0.3	0.3	0.4	0.2	0.5	0.4	4.32	0.2	0.1	0.9	0.4	0.3	0.3	0.3
Tb	0.23	0.26	0.21	0.21	0.35	0.30	1.01	0.09	0.08	0.39	0.24	0.27	0.25	0.29
Dy	4.49	5.07	4.00	4.73	5.09	6.31	9.2	2.14	2.12	5.74	5.24	6.02	5.12	5.47
Ho	2.21	2.46	2.06	2.53	2.02	3.02	2.57	1.17	1.13	2.67	2.40	2.75	2.18	2.03
Er	13.5	13.4	13.6	17.7	8.20	15.1	11.2	7.75	6.30	14.4	11.5	13.3	10.2	8.90
Yb	27.4	19.5	35.6	44.0	7.96	22.7	13.5	17.3	9.5	21.4	12.7	14.0	10.5	8.50
Lu	4.84	3.29	7.36	8.95	1.05	3.52	1.93	3.20	1.34	3.65	1.82	1.96	1.46	1.10
Hf	--	--	--	0.02	0.04	--	0.83	--	--	--	0.09	--	--	--
Ta	0.004	--	--	--	--	--	0.60	--	--	--	--	--	--	--
Pb	0.19	0.26	1.62	0.14	0.11	0.07	2.17	0.56	0.33	0.82	0.10	0.26	--	0.13
Th	--	--	0.004	--	--	--	0.03	--	--	0.03	0.05	--	--	--
U	--	--	--	--	--	--	0.034	--	0.003	0.019	--	--	--	--

Anexo 1. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Acatlán

	OL216																OL218													
	G8 (C)	G8 (B2)	G9 (C)	G10 (B1)	G10 (C)	G10 (B2)	G11 (B)	G11 (C)	G12 (B)	G12 (C)	G13 (C)	G14 (B)	G14 (C)	G15 (C)	G16 (C)	G1 (B1)	G1 (C)	G1 (B2)	G2 (C)	G3 (B)	G3 (C)	G4 (B1)	G4 (C)	G4 (B2)	G5 (C)	G6 (C)	G7 (B)			
(% peso)*																														
SiO ₂	37.7	37.6	37.3	37.3	37.4	37.3	36.8	37.9	37.1	36.7	36.8	37.3	36.7	43.4	37.0	36.3	36.9	36.6	36.6	36.9	36.7	36.8	37.1	36.6	36.6	36.6	37.2			
Al ₂ O ₃	20.7	21.0	20.6	20.7	20.9	20.8	20.8	20.8	20.6	21.1	20.8	20.6	20.8	20.6	20.6	21.1	20.3	21.1	20.7	20.8	20.7	20.9	20.7	21.0	20.9	20.7	20.8			
CaO	8.64	11.1	9.4	9.9	9.7	9.8	9.6	9.4	9.9	10.6	10.4	9.7	9.5	7.63	9.4	11.4	9.9	10.3	9.9	10.7	9.8	10.9	10.0	10.6	9.9	9.9	10.5			
MgO	1.79	1.31	1.19	1.33	1.41	1.30	1.31	1.11	1.24	1.07	1.37	1.27	1.09	1.20	1.21	1.41	1.41	1.38	1.17	1.39	1.21	1.37	1.07	1.34	1.25	1.22	1.34			
FeO	26.2	26.6	27.2	27.9	27.3	27.5	27.8	25.0	27.5	25.6	28.2	27.4	26.0	23.5	26.9	26.7	25.9	26.1	25.9	26.4	26.0	26.4	25.4	26.3	26.0	26.0	26.2			
MnO	4.73	1.95	4.28	2.78	3.16	3.07	3.55	5.52	3.44	4.73	2.24	3.50	5.69	3.49	4.79	2.95	5.17	4.42	5.46	3.61	5.19	3.60	5.50	3.94	5.16	5.31	3.84			
TiO ₂	0.21	0.51	0.15	0.12	0.12	0.13	0.14	0.16	0.15	0.17	0.10	0.14	0.17	0.13	0.13	0.12	0.34	0.16	0.19	0.13	0.31	0.13	0.16	0.15	0.18	0.18	0.14			
(ppm)**																														
Li	6.90	0.7	0.9	--	2.11	0.8	1.0	0.9	1.07	1.12	--	--	--	2.46	0.6	1.48	3.60	1.55	0.9	1.06	--	1.0	--	1.26	0.9	0.9	0.7			
Sc	72.3	89.4	58.2	37.3	37.0	59.9	31.5	19.7	72.4	60.3	61.3	44.9	37.2	69.3	22.7	71.0	71.1	71.8	76.3	72.9	95.1	69.1	37.4	84.5	90.8	71.1	77.9			
V	203	223	172	233	198	206	188	138	204	205	200	168	131	174	269	117	97.4	81.2	97.3	116	117	109	68.0	101	108	76.4	93.8			
Cr	3.78	5.74	3.61	--	--	2.66	--	--	3.97	1.91	3.34	--	--	--	--	9.00	--	2.15	--	13.5	4.28	47.4	--	10.4	6.24	2.21	9.3			
Co	15.1	12.6	10.1	11.6	12.2	12.6	11.2	8.57	11.3	8.31	12.4	11.3	8.10	9.4	10.0	13.5	14.9	13.8	11.9	14.0	12.5	12.3	11.4	13.1	11.3	11.5	13.2			
Zn	32.8	14.0	11.1	11.4	15.8	11.1	11.5	11.1	12.0	11.2	12.1	11.1	10.4	14.5	10.7	13.0	12.7	13.9	11.1	13.4	10.9	10.4	11.0	10.3	11.1	9.8	10.2			
Ga	8.86	7.93	5.15	5.30	6.93	5.39	5.43	6.60	5.23	8.29	4.54	5.10	5.08	11.3	5.70	4.76	6.18	5.51	5.40	4.65	5.14	4.67	4.74	4.49	4.70	4.72	4.85			
Ge	4.82	4.74	4.95	5.07	4.40	4.71	5.05	4.97	4.43	5.00	4.57	5.16	5.01	4.26	4.68	5.70	5.45	5.28	5.52	5.68	5.19	4.98	4.47	5.98	5.05	4.76	5.20			
Y	96.1	55.2	80.5	38.5	41.5	70.2	91.8	74.7	93.0	126	62.8	70.7	75.4	76.9	56.7	78.9	145	89.4	152	85.9	114	79.6	78.2	101	126	134	97.3			
Nb	0.25	1.25	--	--	--	--	--	0.01	--	0.12	--	--	0.03	--	0.01	--	2.59	--	--	0.01	0.63	--	0.23	--	0.01	0.07	--			
Zr	4.40	5.80	3.60	2.90	3.50	4.30	3.60	3.00	4.80	203	2.27	4.80	4.50	5.50	3.80	7.60	174	5.30	4.40	7.40	13.4	3.45	5.50	9.2	4.90	5.80	1.86			
La	1.18	3.97	--	--	0.60	--	--	0.01	0.10	16.0	0.004	0.19	0.03	0.06	0.04	0.01	2.08	0.01	0.02	0.02	0.59	0.004	0.01	0.01	2.46	1.40	0.003			
Ce	3.24	11.3	--	--	1.48	--	--	0.01	0.28	37.0	--	0.64	0.11	0.08	0.04	0.01	5.20	0.01	0.03	0.02	1.47	0.01	0.01	0.04	6.77	3.39	0.01			
Pr	0.494	1.71	--	--	0.197	--	--	0.006	0.026	4.20	--	0.125	0.009	0.017	0.019	0.001	0.730	--	0.001	--	0.181	0.001	--	--	1.04	0.600	--			
Nd	2.47	8.28	--	--	1.00	--	--	--	0.17	16.9	--	0.36	0.08	0.04	0.05	--	4.09	--	--	0.01	1.27	--	--	--	4.98	2.26	--			
Sm	0.81	2.34	0.03	--	0.29	--	0.03	0.03	0.04	3.53	--	0.15	0.01	0.02	0.06	--	1.18	0.02	0.05	--	0.30	--	0.05	--	1.17	0.52	--			
Eu	0.22	0.63	0.01	--	0.27	0.03	0.04	0.02	0.04	0.91	--	0.04	0.02	0.09	0.07	--	0.23	0.03	0.02	0.01	0.06	0.01	0.03	0.01	0.18	0.14	0.02			
Gd	1.17	2.96	0.3	0.1	0.6	0.1	0.5	0.4	0.3	4.14	0.2	0.6	0.3	0.5	0.7	0.2	1.99	0.3	0.6	0.2	1.02	0.2	0.6	0.3	2.32	1.36	0.3			
Tb	0.38	0.57	0.23	0.12	0.17	0.17	0.31	0.33	0.29	0.81	0.17	0.36	0.23	0.30	0.36	0.17	0.68	0.25	0.47	0.20	0.46	0.20	0.25	0.23	0.68	0.58	0.20			
Dy	6.17	5.64	5.05	2.63	2.75	4.39	6.69	4.90	6.28	11.1	4.04	6.13	4.31	5.46	4.93	4.54	10.5	5.63	9.8	5.07	8.20	5.07	5.24	5.66	9.3	9.7	5.45			
Ho	3.10	1.89	2.53	1.18	1.25	2.35	3.06	2.36	3.10	4.20	1.98	2.40	2.38	2.41	1.74	2.52	4.52	2.86	4.53	2.80	3.58	2.47	2.38	3.19	4.10	4.20	3.26			
Er	18.9	7.94	15.9	5.97	5.74	12.5	14.2	14.5	16.5	21.6	11.7	9.5	15.1	11.9	8.07	13.7	23.4	15.2	27.2	14.7	18.3	13.3	14.9	19.4	21.7	25.2	19.4			
Yb	35.4	7.30	26.0	7.21	6.34	16.3	17.4	38.6	22.8	35.0	18.1	8.59	27.9	16.3	12.7	17.2	42.5	24.2	60.7	20.2	33.1	16.4	38.1	30.6	42.3	53.8	33.1			
Lu	5.91	0.9	4.49	0.9	0.8	2.38	2.54	7.06	3.61	5.79	2.60	1.14	4.77	2.74	1.91	2.11	7.96	3.71	11.9	2.90	5.63	2.20	7.98	4.78	7.93	10.8	4.82			
Hf	0.13	0.12	0.02	--	--	--	--	--	0.12	5.70	--	--	--	0.13	--	0.05	5.30	--	--	0.24	0.32	--	0.08	0.26	0.08	--	--			
Ta	0.05	0.07	--	--	--	--	--	--	--	0.11	--	--	0.02	0.01	--	--	0.29	--	--	--	0.08	--	0.03	--	--	0.02	0.01			
Pb	0.85	2.50	0.10	0.06	1.25	0.12	0.02	0.35	0.29	2.50	0.14	0.10	0.19	0.65	0.08	0.12	0.16	0.25	0.14	0.14	0.24	0.12	0.11	0.08	0.14	0.11	0.06			
Th	0.37	0.87	--	--	0.03	--	--	--	0.01	3.91	--	0.02	--	0.04	0.002	--	0.51	--	--	--	0.02	--	--	--	0.10	0.05	--			
U	0.021	0.088	--	--	0.016	--	--	--	0.005	0.870	--	0.003	--	0.004	--	--	0.177	--	--	--	0.004	--	--	0.001	0.021	0.009	--			

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--": Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

Anexo 1. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Acatlán
OL218

	OL218																			OL96							
	G7 (C)	G8 (B)	G8 (C)	G9 (C)	G10 (C)	G11 (C)	G12 (B1)	G12 (C)	G12 (B2)	G13 (C)	G14 (C)	G15 (B2)	G15 (C)	G16 (C)	G17 (B)	G17 (C)	G18 (B1)	G18 (C)	G18 (B2)	G1 (B)	G1 (C)	G2 (B1)	G2 (C)	G2 (B2)	G3 (C)	G4 (C)	
(% peso)*																											
SiO ₂	36.6	36.9	36.6	36.3	36.6	37.2	37.6	37.3	37.2	38.0	37.4	38.1	37.5	37.9	36.3	37.7	37.7	37.6	37.3	51.1	37.9	37.4	37.3	36.8	37.5	39.2	
Al ₂ O ₃	20.8	21.1	20.7	20.9	20.8	20.7	20.8	20.7	20.9	20.5	20.5	20.6	20.7	20.8	19.3	20.5	20.8	20.5	20.8	16.3	20.4	20.4	20.6	20.6	20.6	19.8	
CaO	9.6	11.0	10.5	10.3	9.5	10.5	10.5	10.1	11.0	9.3	9.8	11.1	10.0	10.4	13.9	9.8	10.5	9.6	10.5	11.8	15.5	15.1	15.8	15.5	16.3	15.4	
MgO	1.24	1.37	1.31	1.32	1.23	1.45	1.31	1.25	1.36	1.24	1.27	1.30	1.20	1.21	1.74	1.18	1.34	1.20	1.29	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	
FeO	26.3	26.9	26.1	26.8	26.2	26.3	25.6	25.6	26.1	25.5	25.8	25.4	25.2	25.2	24.5	25.4	26.0	25.6	25.8	16.9	20.9	22.1	21.3	21.5	17.1	18.2	
MnO	5.32	2.61	4.59	4.29	5.42	3.72	4.06	4.87	3.32	5.34	4.99	3.40	5.20	4.45	2.58	5.20	3.55	5.29	4.17	3.14	4.61	4.31	4.33	4.69	7.90	6.70	
TiO ₂	0.18	0.09	0.26	0.15	0.23	0.18	0.15	0.16	0.13	0.16	0.23	0.13	0.19	0.16	1.68	0.24	0.13	0.20	0.15	0.12	0.20	0.19	0.20	0.34	0.22	0.21	
(ppm)**																											
Li	1.34	--	0.8	0.9	1.27	1.86	1.05	--	1.14	1.0	1.19	--	1.22	0.9	4.15	--	1.01	--	1.0	2.88	2.05	2.25	1.35	2.11	2.72	2.26	
Sc	91.4	85.5	97.0	77.1	87.0	87.2	81.6	73.6	66.4	57.1	75.2	90.2	77.6	71.3	69.8	76.5	68.9	72.6	76.8	26.9	39.9	34.0	37.6	28.4	25.4	157	
V	107	91.0	95.2	90.5	123	107	102	70.5	103	71.6	113	113	85.4	89.4	118	71.2	90.4	96.3	79.3	69.9	133	99.7	130	94.5	48.7	93.0	
Cr	2.94	26.1	15.9	12.1	80.8	21.2	5.04	2.41	11.6	2.72	--	11.2	2.08	--	19.4	2.40	13.9	1.42	3.57	31.4	10.3	33.5	21.4	124	--	6.15	
Co	11.8	13.8	12.1	12.3	12.1	13.1	12.1	12.2	12.5	11.8	12.1	13.0	11.7	11.5	16.2	10.8	11.7	12.0	12.4	4.76	5.20	5.21	4.97	4.99	4.11	4.13	
Zn	10.9	10.2	9.6	10.4	11.9	12.5	10.0	10.7	10.4	10.7	9.9	11.7	10.3	9.7	28.4	10.3	10.5	10.2	9.5	19.1	19.0	19.4	17.9	18.2	13.3	15.1	
Ga	4.80	3.80	4.53	4.41	4.75	4.80	5.26	4.88	4.46	4.83	4.65	4.74	5.54	6.05	5.77	5.17	4.06	4.91	4.93	7.08	6.98	6.01	5.97	6.11	6.96	7.01	
Ge	5.91	5.65	5.09	5.20	5.92	5.13	5.34	4.82	5.41	4.96	5.05	5.36	4.39	5.25	5.20	5.00	4.62	4.77	5.55	8.89	9.9	11.8	9.8	13.7	9.7	9.5	
Y	144	71.5	113	99	151	116	91.3	104	100	132	110	106	122	102	142	137	98.3	120	100	280	147	277	127	264	180	98.1	
Nb	--	--	0.73	--	0.08	0.22	--	--	--	0.07	0.17	--	0.02	0.11	8.40	1.02	0.003	0.12	--	0.14	0.13	0.48	0.15	5.40	0.33	0.25	
Zr	3.50	5.00	210	2.73	2.10	3.40	4.00	3.00	3.90	4.80	3.40	4.60	3.30	2.06	2040	114	3.60	6.30	2.90	1.90	3.00	1.88	2.31	1.34	1.25	1.50	
La	0.002	0.003	0.46	0.21	0.02	0.02	--	0.24	0.01	0.03	0.05	0.04	0.26	3.70	14.7	0.28	0.003	0.41	--	6.83	0.61	0.08	--	0.10	0.04	2.49	
Ce	0.01	0.01	1.25	0.55	0.03	0.06	0.002	0.70	0.02	0.10	0.10	0.11	0.70	9.80	40.0	0.74	--	1.06	0.003	16.4	1.65	0.33	0.01	0.30	0.13	4.50	
Pr	--	--	0.182	0.057	--	0.009	--	0.086	0.006	0.010	0.012	--	0.100	1.44	5.80	0.116	--	0.140	--	2.20	0.215	0.038	--	0.025	0.037	0.420	
Nd	--	--	0.96	0.26	--	0.05	--	0.35	--	0.06	0.16	0.08	0.56	6.70	28.4	0.63	--	0.33	--	8.89	0.90	0.15	--	0.17	0.22	1.55	
Sm	0.03	0.03	0.23	0.05	0.05	0.04	--	0.17	0.04	0.04	0.01	--	0.21	1.93	8.10	0.19	--	0.14	--	2.79	0.27	0.07	--	0.13	0.07	0.25	
Eu	0.04	--	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	0.07	0.02	0.05	0.02	0.01	0.15	0.85	1.09	0.18	0.01	0.04	0.02	0.53	0.05	0.02	0.01	0.05	0.08	0.22	
Gd	0.7	0.2	0.5	0.6	0.6	0.3	0.2	0.6	0.3	0.9	0.5	0.3	0.9	2.87	10.5	1.0	0.3	0.8	0.2	3.04	0.7	0.8	0.5	1.43	0.8	0.6	
Tb	0.49	0.15	0.31	0.27	0.49	0.25	0.22	0.38	0.25	0.47	0.32	0.24	0.47	0.67	1.64	0.53	0.20	0.44	0.24	0.90	0.39	0.67	0.29	0.90	0.57	0.33	
Dy	8.72	3.90	6.26	5.58	9.6	6.37	4.88	6.55	5.57	8.64	6.25	5.40	8.00	7.68	14.2	9.9	5.26	8.04	5.48	15.6	8.42	14.8	6.84	16.6	10.2	6.10	
Ho	4.48	2.39	3.59	3.18	4.69	3.78	3.01	3.22	3.20	4.07	3.28	3.29	3.88	3.27	5.13	4.51	3.20	3.75	3.13	8.65	4.50	8.11	3.63	7.18	5.56	2.85	
Er	25.5	14.7	23.6	19.3	26.6	25.8	18.0	17.9	19.8	24.0	20.7	22.6	21.6	17.4	24.0	24.3	20.9	21.1	19.7	46.2	24.6	44.2	19.9	28.4	34.3	14.8	
Yb	55.5	23.1	49.8	34.8	59.2	52.4	37.4	41.3	33.7	59.6	56.2	42.7	57.4	33.2	37.9	52.5	42.8	50.9	42.7	60.7	34.1	53.5	24.3	20.4	86.3	21.8	
Lu	11.1	3.32	8.44	5.87	11.6	8.49	6.15	7.89	4.85	13.0	12.0	6.74	12.2	5.60	5.64	10.4	6.84	10.9	7.01	8.08	4.32	6.44	2.97	1.92	15.7	3.09	
Hf	--	--	5.60	--	--	--	--	--	--	0.13	--	--	--	--	50.3	2.90	--	0.12	--	0.12	--	0.03	0.03	0.06	--	--	
Ta	--	--	0.08	--	--	0.04	--	--	--	0.02	0.01	--	--	--	1.23	0.07	--	0.02	--	0.02	--	0.08	0.03	0.68	0.05	0.01	
Pb	0.09	0.11	0.16	0.06	0.21	0.05	0.09	0.34	0.08	0.10	0.09	0.12	0.34	1.24	0.90	0.56	0.16	0.17	0.07	8.55	1.36	0.05	--	0.09	0.15	0.31	
Th	--	--	0.08	0.003	--	--	--	0.02	--	--	--	0.005	0.04	0.34	1.54	0.12	--	0.03	--	0.26	0.01	0.17	0.01	0.11	0.09	0.04	
U	--	--	0.106	--	--	--	--	0.002	--	--	--	--	0.003	0.098	1.04	0.067	--	--	--	0.855	0.355	0.177	--	0.051	0.01	0.012	

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--": Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

Anexo 1. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Acatlán

	OL96					3119D																			
	G5 (C)	G6 (C)	G7 (C)	G8 (C)	G9 (C)	G1 (B1)	G1 (B-C1)	G1 (C)	G1 (B-C2)	G1 (B2)	G2 (B1)	G2 (B-C1)	G2 (C1)	G2 (B-C2)	G2 (B2)	G3 (B1)	G3 (B-C1)	G3 (C)	G3 (B-C2)	G3 (B2)	G4 (B1)	G4 (B-C1)	G4 (C)	G4 (B-C2)	
(% peso)*																									
SiO ₂	37.9	37.8	38.4	39.2	39.0	37.0	37.1	36.8	36.7	37.3	37.2	36.2	36.7	36.6	36.7	36.5	37.6	37.5	36.3	35.8	36.6	36.6	36.4	36.6	
Al ₂ O ₃	20.8	20.3	20.1	20.5	19.9	19.9	20.4	18.7	20.1	20.4	20.7	19.2	19.0	19.9	20.5	19.6	18.3	18.8	18.7	18.8	20.2	19.5	19.7	20.3	
CaO	16.5	16.4	15.7	15.4	15.5	10.8	10.3	11.6	11.4	11.2	10.7	12.5	12.1	11.5	11.4	12.3	11.6	11.0	11.5	13.1	12.4	12.0	11.6	11.1	
MgO	0.3	0.4	0.5	0.4	0.5	1.39	1.29	1.16	1.25	1.60	2.03	1.28	1.18	1.25	1.40	1.29	1.06	1.0	1.0	1.22	1.37	1.20	1.11	1.15	
FeO	17.0	17.2	17.2	18.1	18.5	28.2	28.6	25.9	27.3	28.6	29.0	25.7	25.2	26.1	28.0	26.7	24.3	24.2	24.0	25.4	27.3	25.6	25.0	26.0	
MnO	7.28	7.68	7.85	6.35	6.32	1.32	2.01	2.29	2.04	0.6	0.2	1.93	2.69	2.90	1.63	1.19	3.25	4.56	4.67	1.45	1.0	2.49	3.91	3.30	
TiO ₂	0.08	0.24	0.23	0.07	0.19	1.31	0.34	3.56	1.21	0.21	0.12	3.06	3.11	1.77	0.39	2.34	3.86	2.85	3.73	4.25	1.16	2.55	2.24	1.47	
(ppm)**																									
Li	--	2.14	2.15	--	2.35	2.85	3.54	3.60	3.14	1.72	1.28	1.88	3.28	3.22	1.86	2.19	3.39	3.62	3.95	2.19	1.56	3.04	3.08	3.17	
Sc	5.28	38.2	40.6	4.49	36.0	68.3	64.9	68.8	63.1	63.7	49.6	55.9	66.3	55.3	52.9	50.3	41.1	35.8	33.1	44.5	54.1	54.0	43.4	50.3	
V	2.91	51.7	72.5	2.31	43.4	154	151	166	158	172	138	173	154	146	132	139	138	177	185	148	158	160	141	140	
Cr	--	11.0	5.39	--	7.22	92.2	58.0	54.3	74.9	124	151	358	69.5	72.0	62.9	30.5	56.6	66.5	72.3	63.3	81.1	55.0	52.6	51.9	
Co	3.52	3.72	4.40	3.72	4.13	15.2	14.6	12.5	13.8	17.2	18.5	15.6	14.7	15.0	16.6	14.2	11.8	10.4	11.2	12.6	15.5	13.4	11.2	12.0	
Zn	12.2	13.6	18.2	13.8	15.7	48.8	50.3	54.7	50.4	41.9	36.3	37.4	42.1	43.0	35.8	41.5	43.6	42.4	55.5	40.9	33.8	44.4	40.5	36.6	
Ga	8.73	7.57	8.96	7.11	6.66	7.99	8.86	7.85	9.1	8.24	8.56	6.83	7.37	6.67	6.90	7.41	7.75	8.83	8.46	7.37	6.89	6.64	6.73	6.90	
Ge	8.35	10.9	9.7	7.59	8.38	4.04	4.08	3.93	4.13	4.23	3.49	3.63	4.38	4.19	4.16	4.06	4.18	3.77	4.05	3.80	3.62	3.19	3.41	3.47	
Y	55.7	202	131	13.0	158	158	163	148	148	85.7	84.7	98.4	105	89.5	104	144	117	78.2	88.7	160	92.1	98.3	64.2	69.7	
Nb	0.40	0.38	0.34	0.57	0.28	9.30	1.53	31.6	6.83	0.86	0.15	19.8	21.9	13.1	1.84	19.1	22.0	18.2	24.9	30.0	7.70	19.4	16.4	11.0	
Zr	2.10	1.21	--	1.71	1.59	310	110	97.0	383	18.0	30.0	91.0	188	136	570	97.0	211	139	143	95.0	70.0	93.0	166	90.5	
La	7.55	0.29	30.0	2.06	0.07	0.06	101	0.16	10.0	0.01	--	0.55	1.36	1.07	0.05	0.19	6.00	100.0	0.67	0.51	0.03	0.82	5.80	4.49	
Ce	12.9	0.61	65.0	3.65	0.22	0.29	238	1.12	26.3	0.13	0.01	2.44	5.85	4.53	0.18	1.34	16.4	230	3.61	2.81	0.14	3.96	17.2	13.8	
Pr	1.32	0.078	6.50	0.346	0.023	0.074	29.4	0.317	4.02	0.025	--	0.539	1.14	0.940	0.030	0.395	2.71	27.6	0.990	0.790	0.060	0.760	2.68	2.23	
Nd	4.07	0.19	22.1	1.31	0.07	0.86	114	2.93	18.3	0.25	--	3.41	6.61	4.96	0.19	2.89	13.8	108	6.70	5.90	0.25	4.79	12.3	10.9	
Sm	0.79	0.05	3.00	0.30	0.10	0.63	14.8	1.88	3.97	0.25	0.09	1.26	2.24	1.82	0.13	1.95	4.58	15.2	2.90	3.13	0.22	1.49	2.94	2.51	
Eu	1.81	0.11	0.39	0.47	0.08	0.36	2.61	0.77	1.10	0.14	0.07	0.43	0.75	0.59	0.06	0.74	1.35	3.60	1.08	1.26	0.13	0.75	0.97	0.83	
Gd	0.8	0.7	2.90	0.3	0.4	2.35	10.4	4.48	5.01	1.43	1.0	1.96	2.84	2.41	0.6	4.77	7.61	13.4	6.22	6.40	0.8	2.17	3.49	2.77	
Tb	0.22	0.59	0.63	0.05	0.38	1.04	1.90	1.55	1.50	0.70	0.57	0.62	0.78	0.64	0.32	1.41	1.79	1.86	1.56	1.66	0.39	0.65	0.64	0.56	
Dy	3.31	12.6	9.6	0.7	8.94	14.8	18.3	16.8	16.5	8.85	8.10	7.47	8.71	7.64	6.34	15.3	15.5	11.8	11.9	17.5	6.84	8.15	6.12	6.24	
Ho	1.40	6.22	3.95	0.3	5.09	5.26	5.49	4.86	5.07	2.93	2.78	3.04	3.46	2.78	3.32	4.51	3.86	2.53	2.81	5.26	2.95	3.06	1.97	2.16	
Er	8.15	35.1	18.8	2.04	29.6	22.2	21.1	17.4	18.0	11.1	9.8	15.3	17.3	13.7	19.2	19.0	12.6	7.63	9.4	21.0	15.6	14.9	8.58	10.0	
Yb	17.7	64.2	28.7	5.27	65.5	29.2	24.9	22.1	20.9	14.2	8.32	29.7	34.5	23.8	42.5	26.7	15.3	8.34	11.8	30.4	26.3	27.8	15.0	19.1	
Lu	2.79	10.1	4.01	0.8	10.3	4.36	3.64	3.27	3.25	2.07	0.9	5.49	5.86	4.20	7.69	4.29	2.60	1.40	2.12	4.92	4.32	4.59	2.79	3.61	
Hf	--	--	--	--	0.10	7.50	2.60	2.68	8.80	0.63	1.10	2.45	5.11	3.39	14.8	2.07	5.90	3.86	3.60	2.65	1.68	1.98	4.49	2.01	
Ta	0.10	0.01	0.02	0.04	0.03	0.67	0.13	1.92	0.53	0.07	--	1.38	1.52	0.78	0.09	1.14	1.53	1.20	1.56	1.87	0.51	1.26	0.92	0.64	
Pb	7.04	0.28	35.0	2.29	0.21	0.12	0.49	0.27	0.62	0.06	--	0.16	0.23	0.14	0.05	0.25	0.39	0.92	0.45	0.24	0.12	0.26	0.38	0.41	
Th	3.04	0.05	0.05	--	0.01	0.11	6.59	0.12	1.93	0.01	--	0.13	0.19	0.12	0.06	0.03	1.65	7.70	0.19	0.05	0.04	0.18	1.22	0.90	
U	0.117	0.031	0.048	0.001	0.008	0.105	0.458	0.148	0.481	0.011	--	0.069	0.111	0.086	0.029	0.094	0.330	0.560	0.169	0.100	0.023	0.131	0.213	0.211	

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--": Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

Anexo 1. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Acatlán

	3119D														22D9											
	G4 (B2)	G5 (B1)	G5 (B-C1)	G5 (C)	G5 (B-C2)	G5 (B2)	G6 (B1)	G6 (C)	G6 (B2)	G7 (B1)	G7 (B-C1)	G7 (C)	G7 (B-C2)	G7 (B2)	G1 (B)	G1 (C)	G1 (B2)	G2 (B)	G2 (C)	G2 (B)	G3 (B)	G3 (C)	G3 (B)	G4 (B)	G4 (C)	G4 (B)
(% peso)*																										
SiO ₂	36.3	36.4	35.8	36.4	36.1	36.9	36.1	35.9	36.9	36.2	36.1	35.0	37.2	37.5	37.4	38.6	37.5	37.3	37.2	37.4	37.6	37.5	37.9	37.6	38.4	37.4
Al ₂ O ₃	21.0	21.0	19.3	19.7	20.1	20.9	20.0	18.7	20.6	20.6	19.9	19.8	20.6	20.5	21.2	20.5	20.9	21.1	21.0	21.2	21.3	21.1	21.3	21.5	21.0	21.4
CaO	11.9	11.5	12.5	11.6	11.7	11.4	12.8	12.6	10.6	9.9	9.8	9.1	9.5	10.3	11.6	10.2	11.4	9.9	9.8	10.3	11.2	11.0	11.0	9.9	8.82	9.8
MgO	1.50	1.47	1.49	1.35	1.30	1.73	1.37	1.12	1.38	1.32	1.25	1.28	1.27	1.33	3.80	3.49	3.34	3.41	3.47	3.68	3.88	3.20	4.10	4.38	4.54	4.30
FeO	28.4	27.5	24.4	24.6	25.5	28.6	26.8	24.5	27.9	28.1	26.6	27.8	28.0	28.3	24.9	24.8	25.7	26.3	26.6	26.2	25.4	25.7	24.9	25.7	25.6	26.2
MnO	0.7	1.68	2.65	3.67	3.07	0.4	0.8	2.84	2.13	3.22	4.13	4.24	3.13	1.88	1.02	2.13	1.04	1.86	1.75	1.07	0.4	1.37	0.7	0.8	1.11	0.8
TiO ₂	0.10	0.32	3.89	2.78	2.25	0.08	2.14	4.42	0.46	0.62	2.14	2.78	0.24	0.16	0.09	0.19	0.07	0.11	0.11	0.09	0.14	0.10	0.11	0.11	0.49	0.12
(ppm)**																										
Li	0.6	1.40	2.81	2.90	2.63	1.26	1.89	3.08	2.92	1.70	3.13	3.19	1.97	2.33	2.53	8.68	2.58	5.28	5.70	4.27	5.90	4.30	3.22	3.53	4.99	6.99
Sc	48.0	45.7	47.8	40.3	47.6	38.2	50.9	47.4	57.7	33.4	35.0	45.3	42.6	57.8	57.9	55.3	57.5	47.5	53.6	62.0	50.5	54.1	52.6	44.0	31.9	46.9
V	129	129	164	139	148	126	136	141	113	145	140	124	114	108	107	130	111	98.9	95.4	98.7	141	111	129	101	151	109
Cr	82.0	39.6	49.4	46.4	134	90.4	92.4	55.1	38.4	274	52.7	135	295	60.8	134	520	165	46.9	67.1	156	179	77.4	332	49.5	37.3	57.4
Co	15.9	13.0	14.6	12.7	12.2	15.0	14.2	12.0	14.4	12.3	11.5	12.1	11.3	10.6	32.0	30.6	29.1	28.2	26.8	27.8	34.8	26.6	35.6	36.8	37.2	37.4
Zn	24.4	28.1	48.0	48.8	42.9	28.4	35.0	47.7	46.3	38.8	47.3	59.1	32.6	35.6	73.7	73.7	56.9	66.8	60.2	50.5	65.5	57.9	77.6	80.5	70.7	78.3
Ga	6.44	6.51	5.50	5.54	5.53	6.75	6.61	6.51	6.76	7.23	7.36	6.74	7.56	7.64	5.84	4.60	5.46	5.45	5.08	4.94	6.29	4.70	6.95	4.75	6.29	4.94
Ge	3.88	3.78	3.91	4.29	3.96	3.87	3.78	3.62	3.46	3.51	3.38	3.46	3.52	3.51	6.60	7.86	7.75	8.35	7.77	7.03	5.77	7.59	5.59	6.79	5.88	6.27
Y	47.1	98.4	74.8	66.9	75.9	82.7	104	88.2	110	35.9	113	128	112	133	86.7	52.0	75.2	113	126	162	162	70.2	155	25.1	22.3	26.7
Nb	--	1.29	25.9	14.5	13.0	--	13.0	25.6	2.00	4.10	6.50	1.26	0.02	0.02	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1.91	--
Zr	23.0	3.50	88.0	99.0	111	12.2	82.0	231	14.9	6.60	172	112	105	78.0	5.00	18.0	4.40	5.80	4.80	3.97	5.80	6.90	8.30	6.20	10.1	340
La	--	0.02	0.90	0.52	0.63	--	3.85	1.67	0.05	0.11	1.30	0.04	0.01	0.01	--	--	--	--	--	--	--	--	0.03	--	0.05	--
Ce	--	0.05	5.09	2.79	3.10	--	9.90	6.65	0.28	0.53	3.90	0.14	0.06	0.03	--	--	--	--	--	0.01	--	--	0.02	--	0.14	--
Pr	--	0.010	1.08	0.546	0.630	--	1.32	1.42	0.063	0.135	0.490	0.026	0.013	--	--	0.001	--	--	--	--	0.003	--	0.009	--	0.023	--
Nd	--	0.03	6.12	3.93	3.69	--	6.60	8.34	0.44	0.91	2.55	0.34	0.06	0.07	--	--	--	--	0.01	0.08	--	--	0.09	--	0.13	--
Sm	0.06	0.06	2.11	1.50	1.41	0.06	1.56	3.51	0.22	0.53	0.94	0.28	0.24	0.09	0.10	0.08	0.02	0.13	0.09	0.50	0.25	0.01	0.38	0.02	0.16	0.07
Eu	0.04	0.08	0.71	0.51	0.41	0.07	0.64	1.43	0.12	0.33	0.32	0.22	0.18	0.12	0.08	0.09	0.04	0.19	0.30	0.96	0.32	0.03	0.34	0.05	0.12	0.03
Gd	0.8	0.9	3.15	2.90	2.00	0.8	2.51	4.58	1.0	2.39	3.06	2.65	2.22	1.35	0.8	1.08	0.3	1.22	1.67	5.92	3.51	0.4	4.29	0.3	0.9	0.2
Tb	0.39	0.46	0.79	0.78	0.58	0.45	0.70	1.06	0.53	0.67	1.19	1.10	0.96	0.68	0.47	0.48	0.27	0.81	1.06	2.86	2.08	0.24	2.33	0.14	0.37	0.12
Dy	4.60	7.53	8.23	7.88	6.96	7.34	8.87	9.6	8.64	5.05	12.7	13.7	11.2	11.4	7.57	5.71	5.09	11.5	14.9	27.7	24.8	4.66	25.5	1.69	3.35	1.76
Ho	1.57	3.16	2.48	2.28	2.41	2.82	3.38	2.82	3.63	1.08	3.56	4.26	3.61	4.38	3.01	1.80	2.59	3.94	4.60	6.32	6.02	2.31	5.97	0.8	0.8	0.9
Er	5.96	14.0	9.6	8.13	10.5	11.2	15.6	10.4	15.8	3.06	13.1	16.0	14.5	20.2	12.7	7.46	13.5	14.5	16.0	17.3	15.4	11.9	14.3	5.13	2.71	5.22
Yb	7.67	18.5	12.0	10.7	14.6	11.2	23.6	13.7	21.5	2.20	16.6	19.2	19.1	28.5	10.7	13.2	19.9	16.0	15.9	11.5	7.97	18.7	7.63	12.5	3.68	14.5
Lu	1.05	2.92	1.86	1.79	2.34	1.42	3.77	2.18	3.38	0.3	2.72	3.23	3.42	4.91	1.21	2.21	2.70	2.20	2.10	1.42	0.8	2.95	0.7	2.29	0.6	2.66
Hf	0.82	0.09	2.23	2.52	2.70	0.22	2.40	5.64	0.28	0.02	4.40	2.83	2.59	1.83	0.06	0.26	--	0.02	0.08	0.03	0.08	0.18	0.06	0.07	0.23	9.90
Ta	--	0.08	1.83	0.92	0.97	--	0.87	1.59	0.14	0.25	0.55	0.14	0.01	0.01	--	0.003	0.003	--	--	--	0.01	--	--	0.003	0.10	--
Pb	--	0.04	0.27	0.18	0.21	--	0.34	0.39	0.05	0.05	0.09	0.05	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Th	0.02	0.01	0.13	0.15	0.25	--	0.53	0.34	0.01	0.03	0.46	0.08	0.04	0.04	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.003	--
U	0.015	0.001	0.103	0.110	0.078	--	0.119	0.229	0.020	0.028	0.163	0.087	0.070	0.047	--	0.012	--	--	--	--	--	--	0.006	--	0.004	0.048

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--" : Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

Anexo 1. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Acatlán

	P13														PX02															
	G6 (BC)	G6 (C)	G6 (BC)	G6 (B)	G7 (B)	G7 (BC)	G7 (BC)	G7 (B)	G8 (B)	G8 (C)	G8 (B)	G9 (B)	G9 (C)	G9 (B)	G1 (B)	G1 (C)	G1 (B)	G2 (B)	G2 (C)	G2 (B)	G3 (B)	G3 (C)	G3 (B)	G4 (B)	G4 (C)	G4 (B)	G5 (B)	G5 (C)	G5 (B)	
(% peso)*																														
SiO ₂	38.0	39.1	38.7	37.5	38.2	38.8	37.8	38.3	38.5	37.5	38.4	39.9	37.8	38.3	37.1	37.4	37.1	37.2	37.6	37.4	37.7	37.4	37.8	37.4	37.2	37.4	38.9	39.0	37.3	
Al ₂ O ₃	21.1	20.7	20.9	21.6	21.3	20.8	21.3	21.3	21.2	21.4	21.4	20.8	21.4	20.7	20.7	20.5	20.6	20.1	20.6	20.6	20.2	20.5	20.5	20.6	20.9	20.4	19.8	20.6		
CaO	13.0	12.2	12.6	12.1	12.9	11.9	13.3	11.2	11.4	12.6	11.1	11.5	12.4	9.8	8.75	9.7	10.0	8.56	9.6	9.8	9.0	9.9	9.9	9.6	10.9	10.2	8.99	9.9		
MgO	2.50	3.31	2.68	3.98	3.01	2.78	2.55	4.41	4.10	2.87	4.21	3.82	3.70	1.42	0.9	1.46	1.26	1.22	1.42	1.64	0.8	1.36	1.26	1.32	1.30	1.84	1.42	1.53		
FeO	23.7	23.1	23.8	24.2	24.1	24.0	24.1	24.3	24.2	24.2	24.3	23.3	23.4	30.1	27.1	30.5	29.7	28.3	30.3	29.5	25.6	29.7	29.7	29.8	28.8	27.7	30.0	29.9		
MnO	1.38	1.42	1.14	0.4	0.4	1.48	0.9	0.3	0.3	1.23	0.3	0.5	1.05	0.6	5.34	0.4	1.03	3.94	0.5	0.6	6.73	0.5	0.9	1.35	0.4	0.9	0.6	0.6		
TiO ₂	0.25	0.23	0.13	0.13	0.09	0.27	0.15	0.13	0.15	0.17	0.13	0.11	0.24	0.19	0.23	0.23	0.22	0.19	0.18	0.14	0.23	0.18	0.19	0.19	0.19	0.09	0.16	0.14		
(ppm)**																														
Li	15.8	6.24	10.8	4.33	7.57	16.6	16.1	4.59	2.91	12.1	4.93	3.48	7.70	2.20	1.30	2.69	1.61	11.1	1.0	--	1.53	1.32	1.22	3.29	1.50	3.42	4.33	2.72		
Sc	18.4	15.3	53.8	51.6	52.2	23.3	45.3	43.0	32.0	41.8	57.2	40.8	31.5	29.0	70.7	17.6	62.1	73.6	17.9	72.7	128	24.2	28.4	40.5	17.1	119	52.3	126		
V	82.0	44.7	180	148	125	76.6	147	112	89.0	132	165	100	117	84.5	82.5	76.8	93.3	96.9	72.5	73.5	84.6	77.6	81.0	79.5	99.1	59.2	116	67.3		
Cr	--	1.69	68.2	153	197	17.2	96.0	229	192	45.5	891	232	30.7	762	230	255	287	128	97.0	123	105	57.7	77.9	97.1	87.0	83.0	154	114		
Co	25.1	32.4	24.4	35.2	26.2	24.3	23.4	40.0	23.4	26.9	37.7	36.1	37.1	13.6	8.87	14.5	11.7	11.6	14.2	14.3	7.91	13.8	18.7	14.1	13.7	10.1	13.0	11.6		
Zn	86.9	94.9	65.8	83.5	67.2	93.0	63.2	98.0	63.3	86.3	106	95.0	104	30.3	18.2	32.5	27.3	28.5	30.5	34.2	17.5	29.3	28.4	28.6	29.1	38.5	31.7	31.2		
Ga	6.71	5.54	6.09	6.08	5.97	6.23	5.73	6.68	4.43	5.99	6.99	6.27	6.43	7.56	7.64	6.40	7.37	8.63	6.13	3.90	7.18	6.48	7.43	7.03	12.2	3.03	6.70	4.69		
Ge	4.64	2.21	4.11	3.00	4.44	3.40	4.74	2.85	2.53	4.73	2.84	3.70	4.33	3.42	5.57	2.70	3.90	4.61	3.57	4.24	6.71	3.26	4.61	4.03	3.80	5.70	2.91	4.17		
Y	58.9	37.4	88.2	52.3	68.8	88.3	83.9	75.1	39.4	165	74.5	66.1	49.7	49.5	283	39.1	53.0	178	20.2	36.1	617	51.1	54.4	56.9	47.9	21.6	37.2	44.5		
Nb	0.02	0.01	--	0.02	--	0.06	--	--	--	--	--	0.003	0.02	0.02	1.51	1.33	0.68	0.40	--	0.32	1.53	--	0.01	0.07	--	--	0.08	0.02		
Zr	6.10	6.90	2.30	4.30	3.30	6.90	3.05	202	3.40	3.50	7.10	5.45	6.30	76.0	76.0	48.0	53.0	2.63	4.90	29.5	2.70	3.12	3.90	17.3	10.9	1.81	2.90	3.20		
La	--	0.29	0.23	0.13	0.04	0.58	0.02	0.03	--	--	0.01	0.03	0.02	45.3	64.0	1.00	0.02	0.12	0.52	0.005	0.25	--	78.0	7.30	47.9	0.05	0.08	0.04		
Ce	--	0.81	0.05	0.07	0.02	0.12	0.01	0.01	--	--	0.01	--	0.01	87.0	119	2.20	--	0.02	0.99	0.003	0.43	--	155	14.6	98.3	0.04	0.05	0.01		
Pr	--	0.173	0.054	0.053	0.009	0.126	0.002	--	--	0.004	0.005	0.008	0.052	9.5	14.2	0.270	0.010	0.032	0.140	--	0.075	--	17.6	1.70	10.7	0.034	0.020	0.011		
Nd	0.04	1.26	0.26	0.20	0.09	0.35	--	0.08	0.02	0.06	0.06	0.10	0.10	34.3	47.0	0.83	0.02	0.13	0.14	--	0.27	--	61.0	6.20	40.7	0.11	0.17	0.12		
Sm	0.46	0.72	0.53	0.40	0.23	0.27	0.32	0.52	0.22	0.59	0.62	0.37	0.43	6.30	8.90	0.12	0.11	0.27	0.02	--	0.62	0.05	10.5	1.09	8.84	0.05	0.15	0.03		
Eu	0.38	0.31	0.26	0.24	0.16	0.21	0.28	0.52	0.22	0.30	0.41	0.23	0.12	1.34	2.28	0.08	0.10	0.29	0.03	0.01	0.59	0.04	2.28	0.38	2.30	0.01	0.08	--		
Gd	3.54	2.32	4.26	2.41	2.41	2.07	3.29	5.57	2.63	7.27	5.23	3.44	2.66	5.85	11.0	0.6	1.28	3.18	0.1	0.2	7.02	0.8	8.90	2.66	7.13	0.1	1.50	0.3		
Tb	1.08	0.60	1.46	0.96	0.96	0.76	1.30	2.47	1.08	2.37	2.03	1.29	0.80	1.00	3.91	0.27	0.70	1.90	0.10	0.10	5.01	0.48	1.48	1.07	1.01	0.03	0.51	0.15		
Dy	9.1	4.61	13.5	9.0	10.2	9.1	12.3	19.1	8.73	23.6	16.9	11.5	6.66	7.46	41.0	3.83	7.57	25.1	1.53	2.40	72.7	6.15	9.5	9.5	6.61	1.06	5.26	2.76		
Ho	1.86	1.12	2.95	1.85	2.47	2.71	2.91	2.86	1.44	5.69	2.88	2.48	1.64	1.54	10.0	1.15	1.78	6.64	0.5	1.17	24.1	1.87	1.82	1.92	1.52	0.7	1.28	1.41		
Er	5.61	4.08	10.5	5.24	7.20	12.0	9.4	6.27	3.50	19.4	6.86	7.02	5.16	4.92	35.1	4.06	6.30	26.1	1.83	6.90	110	6.49	5.41	6.04	5.71	5.45	4.30	7.97		
Yb	5.16	4.70	10.5	3.58	4.95	17.2	7.71	3.68	2.23	18.0	4.53	5.20	2.73	4.56	40.1	3.41	7.68	34.5	1.43	12.4	167	5.42	4.05	5.64	5.09	20.1	4.39	14.7		
Lu	0.8	0.7	1.48	0.5	0.6	2.88	1.0	0.5	0.2	2.46	0.5	0.7	1.15	0.7	4.05	0.5	1.17	3.62	0.2	1.90	17.6	0.7	0.5	0.8	0.7	4.57	0.7	2.33		
Hf	0.13	0.10	0.03	0.05	--	0.09	0.03	5.20	0.03	0.11	0.23	0.07	0.05	2.50	2.20	1.77	2.10	--	0.10	0.59	0.15	0.08	0.08	0.70	0.20	--	--	--		
Ta	--	--	--	--	--	0.01	--	--	--	0.01	--	--	--	--	0.22	0.08	0.02	0.04	--	0.03	0.24	0.01	--	--	--	--	--	--		
Pb	--	0.42	1.17	0.88	0.51	0.24	0.07	0.36	--	--	0.14	0.36	0.09	2.45	2.96	0.81	0.18	1.24	0.06	0.02	0.08	--	3.11	0.87	11.3	0.64	1.09	0.29		
Th	--	0.11	0.41	0.23	--	--	--	0.01	--	--	--	0.01	--	28.0	28.3	0.62	0.02	0.06	0.20	0.001	0.12	--	41.0	2.70	14.2	0.06	0.04	0.01		
U	--	0.112	--	0.01	--	--	--	0.076	--	--	--	--	--	2.21	2.97	0.167	0.063	--	0.024	0.011	0.038	--	3.32	0.320	2.46	--	--	--		

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--": Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

Anexo 1. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Acatlán

PIAX 13 ii

	G1(B)	G1(C)	G1(B-C)	G1(B)	G2(B)	G3(C)	G3(B)	G4(B)	G4(C)	G5(B)	G6(C)	G6(B)	G7(B)	G8(C)	G8(B)
(% peso)*															
SiO ₂	39.5	39.0	39.6	38.8	38.3	38.2	38.6	37.3	39.2	38.3	38.0	37.5	38.6	38.1	38.3
Al ₂ O ₃	21.6	21.7	21.6	20.7	21.7	21.8	21.7	22.0	21.6	21.7	21.6	22.2	21.5	21.7	21.8
CaO	11.7	10.3	12.0	11.6	11.1	11.8	10.5	10.9	9.3	10.8	11.3	10.9	11.0	11.7	9.9
MgO	3.15	4.27	3.54	4.87	4.10	3.55	4.43	4.11	3.71	4.06	3.76	4.09	4.34	3.43	4.67
FeO	23.2	24.2	22.4	22.7	24.2	23.9	24.2	25.3	24.0	24.3	23.9	24.8	24.0	24.5	24.9
MnO	0.7	0.4	0.6	0.5	0.5	0.6	0.4	0.3	1.98	0.6	1.20	0.4	0.5	0.4	0.3
TiO ₂	0.13	0.11	0.12	0.90	0.08	0.11	0.10	0.09	0.13	0.13	0.24	0.07	0.10	0.11	0.09
(ppm)**															
Li	7.86	4.17	4.05	9.3	6.39	4.64	6.07	3.41	11.9	3.70	7.45	3.46	8.34	4.66	3.81
Sc	40.1	42.3	47.4	40.3	42.7	45.8	43.5	50.7	43.0	44.2	27.1	47.9	37.9	41.5	41.7
V	114	110	153	182	118	145	107	108	282	208	128	116	120	121	126
Cr	51.9	295	754	165	281	268	190	153	143	351	40.3	177	255	139	280
Co	31.2	43.4	35.3	44.7	40.4	34.0	43.9	38.5	34.5	38.0	38.2	38.2	39.7	31.9	44.5
Zn	80.1	96.2	79.7	134	91.0	78.3	98.2	80.6	78.1	82.7	90.8	79.3	92.4	62.0	92.6
Ga	11.4	7.34	5.62	7.15	5.11	4.32	5.28	4.71	4.90	9.6	7.34	5.93	5.67	5.67	5.13
Ge	3.38	2.92	3.19	3.25	3.35	3.52	2.79	2.82	2.85	2.95	3.73	2.91	2.81	2.97	2.46
Y	61.4	69.7	69.7	54.4	66.9	40.5	81.8	66.2	45.8	99	40.9	66.3	56.1	65.0	100
Nb	0.003	--	0.001	3.56	0.003	0.01	--	--	0.01	0.01	0.01	--	--	--	--
Zr	9.8	10.1	8.20	11.9	7.80	7.41	10.0	64.0	9.2	128	11.3	7.90	9.3	9.0	10.0
La	0.01	0.02	0.28	1.17	0.02	0.01	0.002	--	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01
Ce	0.04	0.06	0.69	4.29	0.05	0.02	0.01	0.003	0.05	0.03	0.05	0.02	0.01	0.02	--
Pr	--	0.009	0.106	0.698	0.015	0.005	--	--	0.004	0.008	0.012	0.012	--	0.002	0.010
Nd	0.06	0.11	0.48	3.62	0.07	0.04	0.05	0.04	0.10	0.13	0.10	0.08	0.07	0.04	0.12
Sm	0.19	0.64	0.37	1.42	0.21	0.13	0.60	0.28	0.24	0.32	0.34	0.42	0.28	0.11	0.88
Eu	0.21	0.49	0.23	0.63	0.25	0.10	0.66	0.27	0.06	0.17	0.12	0.49	0.42	0.26	1.14
Gd	1.65	4.25	2.19	3.49	2.07	0.9	6.09	2.44	1.90	3.09	2.52	3.98	3.41	1.73	9.6
Tb	0.72	1.67	0.84	1.05	0.92	0.38	2.44	1.14	0.67	1.15	0.75	1.70	1.29	0.86	3.83
Dy	7.78	14.1	8.82	8.86	10.0	4.33	18.5	11.2	6.20	12.9	5.70	13.1	11.1	9.8	25.4
Ho	2.07	2.78	2.48	2.03	2.70	1.28	3.23	2.52	1.69	3.68	1.36	2.63	2.16	2.46	3.96
Er	6.99	6.67	8.34	6.39	8.09	5.35	7.69	7.01	5.71	14.0	4.31	6.52	5.79	7.13	8.56
Yb	7.00	4.60	8.03	5.68	6.38	6.18	5.02	5.18	6.79	16.2	4.45	4.82	4.26	5.24	5.37
Lu	1.03	0.6	1.18	0.8	0.9	0.9	0.6	0.7	1.28	2.77	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6
Hf	0.08	0.09	--	0.21	0.06	0.01	0.07	3.00	0.04	3.00	0.08	0.10	0.10	0.04	0.11
Ta	0.004	--	--	0.24	--	--	0.01	--	0.002	0.01	--	0.01	--	--	--
Pb	0.09	0.18	0.71	1.28	0.22	0.15	0.06	--	0.40	0.07	0.51	0.37	0.28	0.10	0.07
Th	--	--	0.02	0.08	--	0.03	--	0.002	--	0.09	--	--	0.004	--	--
U	0.009	--	0.013	0.126	0.002	0.001	--	0.011	0.002	0.053	0.006	0.007	0.001	--	--

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--": Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

ANEXO II

Anexo 2. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Oaxaqueño

VS-4														
	G7 (B)	G8 (B)	G9 (B)	G10 (B)	G1 (C)	G2 (C)	G3 (C)	G4 (C)	G5 (C)	G6 (C)	G7 (C)	G8 (C)	G9 (C)	G10 (C)
(% peso)*														
SiO ₂	37.4	37.9	37.2	37.6	38.1	38.4	37.8	37.9	38.2	38.1	37.6	38.0	38.7	38.2
Al ₂ O ₃	21.8	21.9	21.9	21.8	22.0	21.9	21.8	22.0	22.0	21.9	21.7	21.9	21.6	21.7
CaO	3.08	3.06	3.22	3.19	3.06	3.02	3.22	3.03	3.14	3.40	3.02	3.07	3.10	3.16
MgO	6.02	6.58	6.16	6.46	6.83	7.07	6.75	6.75	6.77	6.70	6.10	6.55	6.26	6.46
FeO	30.9	29.7	30.7	30.1	29.1	28.8	29.4	29.5	29.1	28.9	30.8	29.7	29.6	29.7
MnO	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	0.7	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7
TiO ₂	0.04	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03
(ppm)**														
Li	6.05	8.70	8.15	11.8	5.83	6.38	5.99	7.16	7.77	3.30	5.78	8.37	8.93	10.0
Sc	148	146	108	206	122	62.1	84.3	105	104	74.1	142	146	103	206
Ti	185	159	105	120	185	160	220	145	123	213	215	155	124	149
V	132	138	156	150	170	177	206	149	144	218	134	134	154	160
Cr	289	227	200	233	197	158	320	184	184	174	301	240	210	237
Co	16.7	17.9	17.9	20.8	17.8	18.4	21.3	19.1	18.8	24.4	17.5	17.9	18.3	19.7
Zn	101	104	42.1	97.7	81.1	101	94.0	101	99.5	66.7	103	99.5	46.3	95.7
Ga	10.9	10.8	12.5	11.2	10.8	15.0	12.2	12.7	12.6	12.9	11.0	10.5	13.4	11.6
Ge	5.27	4.09	2.59	3.96	3.73	3.04	4.09	4.53	4.11	3.13	3.84	3.95	3.30	3.78
Y	631	735	491	923	721	320	948	543	560	284	567	742	461	880
Nb	--	--	0.011	--	--	--	--	--	--	--	0.189	--	--	--
Zr	20.4	4.40	4.30	3.70	19.9	780	17.8	8.10	5.20	26.0	10.1	4.50	3.60	10.0
La	0.005	0.02	0.46	0.07	0.25	5.50	0.8	0.01	0.15	--	0.26	0.01	0.08	0.10
Ce	0.084	0.049	1.08	0.212	0.540	11.2	1.80	0.036	0.260	0.173	0.430	0.035	0.147	0.230
Pr	0.09	0.03	0.20	0.04	0.16	1.18	0.3	0.04	0.05	0.17	0.11	0.02	0.04	0.06
Nd	2.13	0.90	1.62	0.66	2.47	5.70	3.23	1.11	1.14	4.73	1.93	0.92	0.93	1.18
Sm	13.0	9.37	12.8	8.61	11.7	13.6	9.58	10.3	9.45	17.5	12.5	8.74	11.3	9.51
Eu	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
Gd	51.3	38.0	58.6	50.4	52.5	54.2	38.8	47.9	46.7	49.5	48.4	38.8	53.0	48.2
Tb	12.8	11.5	14.4	15.9	13.8	11.2	14.4	11.8	12.4	9.7	11.2	11.5	13.6	15.2
Dy	88.6	96.5	87.9	127	108	64.3	136	88.0	91.1	55.1	77.8	96.9	82.7	120
Ho	20.2	25.3	16.3	30.6	23.3	10.6	30.9	18.0	19.1	9.4	19.0	25.3	15.3	28.8
Er	78.4	87.5	42.3	101	66.3	25.0	87.7	50.4	52.9	23.1	78.2	86.9	40.1	94.3
Yb	119	95.0	34.7	107	58.9	18.2	74.0	44.5	45.6	17.0	122	94.8	33.2	102
Lu	24.0	14.3	4.37	15.5	7.57	2.31	9.02	6.04	6.25	2.16	24.8	14.2	4.24	14.7
Hf	0.52	0.25	0.25	0.54	0.78	22.0	0.98	0.40	0.39	0.67	0.45	0.42	0.45	0.59
Ta	0.01	0.05	0.01	0.04	0.02	0.01	0.05	0.03	0.02	--	0.02	0.03	0.01	0.04
Pb	0.10	0.10	0.29	0.20	--	0.13	0.03	0.21	0.07	0.05	0.03	0.06	0.17	0.22
Th	--	0.004	0.005	0.015	0.014	0.380	0.019	0.007	0.003	--	0.018	--	--	0.006
U	0.003	0.001	0.005	0.0013	0.001	0.74	0.004	--	--	0.004	0.004	--	--	0.001

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--": Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

ANEXO III

Anexo 3. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Xolapa

	XO-0214																				XO-0222		XO-0201				
	G5 (B-C)	G6 (B)	G6 (C)	G7 (B)	G7 (C)	G8 (B1)	G8 (C)	G8 (B2)	G9 (C)	G9 (C1)	G10 (B)	G10 (C)	G11 (B1)	G11 (C)	G11 (B2)	G12 (B1)	G12 (C)	G12 (B2)	G13 (C)	G1 (C)	G1 (B)	G1 (C)	G3 (C)	G4 (C)	G5 (C)		
(% peso)*																											
SiO ₂	35.8	36.2	36.8	36.3	36.5	36.1	37.0	36.7	36.9	36.4	37.3	36.4	36.2	36.7	36.5	36.7	36.5	36.0	36.7	36.7	35.9	36.0	36.4	36.5	36.5		
Al ₂ O ₃	21.0	20.8	20.9	20.7	20.8	20.7	20.5	20.5	20.5	20.6	20.3	20.4	20.3	20.6	20.4	20.5	20.7	20.7	20.2	20.6	20.9	20.4	20.3	20.9	20.4		
CaO	6.05	7.89	7.70	5.63	5.57	5.03	5.09	5.25	6.27	6.70	5.55	4.60	4.40	4.52	4.43	5.05	6.17	6.10	5.69	9.5	8.94	9.9	8.99	13.7	11.9		
MgO	1.96	1.82	1.84	1.46	1.65	1.95	2.20	1.80	2.01	1.98	1.61	1.61	1.45	1.55	1.43	1.97	1.98	1.82	1.71	1.78	1.68	0.2	0.2	0.2	0.2		
FeO	30.4	29.9	29.5	28.3	29.1	31.7	31.3	31.0	30.4	30.5	29.6	30.1	30.5	30.3	30.1	31.5	30.7	30.9	29.5	27.3	27.6	24.1	24.7	24.1	23.2		
MnO	4.75	3.40	3.23	7.51	6.41	4.52	3.97	4.80	3.80	3.79	5.74	6.80	7.02	6.37	7.02	4.27	3.94	4.46	6.06	4.10	4.94	9.3	9.4	4.67	7.66		
TiO ₂	0.015	0.027	0.028	0.014	0.013	0.017	0.018	0.013	0.017	0.016	0.012	0.010	0.007	0.008	0.008	0.009	0.015	0.016	0.016	0.029	0.031	0.020	0.022	0.019	0.026		
(ppm)**																											
Li	7.20	5.58	5.27	13.0	11.3	10.2	7.37	9.8	6.14	6.28	9.1	13.1	17.4	14.7	16.0	7.34	6.09	7.33	11.1	7.50	11.1	69.3	87.0	52.5	60.4		
Ti	68.1	145	135	72.2	57.6	83.7	89.2	65.0	82.1	79.4	60.8	47.7	35.9	39.1	42.1	45.4	69.8	75.1	74.9	128	151	101	110	87.3	134		
Sc	142	143	125	211	171	166	152	162	137	145	165	159	185	177	195	151	137	158	171	59.4	76.8	51.4	50.4	24.0	35.2		
V	59.5	72.5	59.7	75.3	67.9	117	107	68.4	74.4	62.0	65.4	84.2	87.7	79.4	86.7	77.8	57.9	63.2	76.8	131	124	81.4	77.7	20.8	114		
Cr	57.5	63.7	52.2	7.47	8.48	68.4	70.7	66.6	75.8	43.9	58.0	67.3	63.8	45.9	76.0	73.5	48.0	41.5	21.3	13.6	5.19	--	--	--	4.92		
Co	7.06	7.98	7.16	6.16	6.04	6.68	7.84	6.13	7.63	8.04	6.63	6.59	6.43	6.14	5.83	7.96	6.88	7.13	6.42	7.27	7.37	1.35	1.34	1.0	1.39		
Zn	36.2	42.4	41.9	37.1	35.2	37.0	35.1	36.0	43.5	42.6	38.5	36.0	35.4	29.5	33.9	36.0	30.3	35.3	37.4	20.6	22.0	42.1	39.3	39.0	45.6		
Ga	12.3	14.2	12.6	13.7	11.8	11.7	12.4	13.4	12.5	13.9	12.6	11.9	13.3	12.9	13.0	13.3	12.3	12.5	13.7	8.29	11.7	22.2	19.6	31.1	21.8		
Ge	11.5	13.2	10.8	12.1	11.7	7.91	7.99	12.6	10.7	12.4	11.3	10	12.2	12.2	10.6	11.4	11.8	11.6	5.81	8.67	4.60	28.9	25.4	24.4	31.6		
Y	760	592	545	1349	1254	1080	1003	959	629	613	943	1338	1712	1483	1612	829	640	720	1267	933	1236	2287	2534	1604	2388		
Nb	--	--	0.013	--	--	--	--	--	0.004	--	--	--	0.012	--	--	--	--	--	--	0.021	--	0.039	0.049	0.087	0.033		
Zr	2.90	3.60	2.40	3.80	1.76	2.70	3.40	3.80	1.90	2.90	2.30	2.70	2.00	3.00	3.20	2.70	2.70	3.00	2.40	--	1.90	3.10	1.50	1.10	2.70		
La	--	--	0.01	--	--	--	0.05	--	0.01	--	--	--	0.01	0.01	--	--	--	--	--	0.003	0.03	--	--	--	--		
Ce	0.033	0.063	0.070	0.028	0.022	0.035	0.098	0.036	0.053	0.030	0.042	0.060	0.030	0.034	0.018	0.023	0.042	0.044	0.028	0.029	0.037	0.013	--	--	--		
Pr	0.03	0.06	0.07	0.04	--	--	0.06	0.02	0.05	0.05	0.03	--	--	--	0.02	0.04	0.05	0.05	0.02	0.03	0.02	--	--	--	--		
Nd	1.00	1.85	1.21	0.74	0.54	0.83	1.02	0.70	1.00	1.29	1.09	0.67	0.44	0.52	0.44	0.91	1.05	1.07	0.80	0.47	0.59	0.05	--	--	--		
Sm	4.91	6.70	5.58	4.92	4.51	4.78	5.54	4.57	4.99	5.33	4.10	2.94	3.46	3.91	3.67	3.80	4.68	4.72	4.06	3.40	3.40	0.39	0.30	0.16	0.52		
Eu	0.2	0.4	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2		
Gd	32.2	35.5	33.3	46.3	44.4	46.4	42.3	34.3	30.8	35.7	33.6	32.3	37.7	38.5	40.8	36.7	31.0	34.8	43.8	27.1	28.8	7.82	6.30	2.42	8.17		
Tb	12.2	10.3	9.5	19.7	19.8	16.2	14.9	13.3	11.0	11.0	13.6	15.0	18.6	18.5	19.0	12.8	11.0	12.4	18.8	11.0	12.5	6.71	6.10	2.73	7.00		
Dy	119	89.5	84.2	206	207	163	150	137	99.8	97.5	140	178	233	211	225	123	96.9	111	195	117	146	132	136	63.8	141		
Ho	28.5	22.1	20.6	46.3	46.2	39.8	37.1	34.6	22.7	22.4	35.0	50.2	61.2	52.3	56.7	29.0	21.8	25.3	43.8	29.9	38.3	61.5	67.9	36.6	75.0		
Er	80.8	66.6	61.6	120	115	115	111	104	65.3	63.4	105	162	178	153	166	86.6	67.2	74.0	129	106	142	429	491	317	496		
Yb	78.3	70.9	62.5	96.9	81.9	113	110	105	67.0	63.1	110	178	166	131	151	84.2	68.4	64.0	106	101	145	1019	1306	1125	1085		
Lu	11.9	10.5	9.31	12.5	10.2	16.1	17.1	15.3	10.2	9.18	16.3	26.6	23.4	17.6	20.5	12.5	9.87	8.87	13.8	13.8	20.1	227	295	224	234		
Hf	0.530	0.240	0.39	0.47	0.49	0.36	0.34	0.38	0.52	0.34	0.25	0.82	0.33	1.02	0.94	0.53	0.53	0.46	1.15	--	0.69	0.13	0.43	0.40	0.45		
Ta	0.04	0.04	0.04	0.11	0.11	0.12	0.06	0.05	0.03	0.04	0.07	0.12	0.04	0.08	0.14	0.03	0.03	0.07	0.05	0.06	0.11	0.15	0.13	0.25	0.13		
Pb	0.43	--	0.48	--	0.07	0.10	0.40	0.07	0.22	0.09	--	0.10	0.32	--	--	0.12	--	--	0.15	--	--	--	--	--	--		
Th	--	--	0.010	--	--	--	0.031	--	0.008	0.012	--	0.015	--	--	0.003	--	--	--	--	--	--	0.014	--	--	--		
U	--	0.027	0.032	0.018	0.011	0.018	0.029	0.012	0.026	0.0075	0.017	0.026	0.015	0.0107	0.019	0.017	0.022	0.017	0.0106	--	0.069	0.3	0.017	0.01	0.022		

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--": Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

Anexo 3. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Xolapa

XO-03

	G5 (B)	G5 (C)	G5 (B2)	G6 (B)	G6 (C)	G7 (B)	G7 (C)	G8 (B)	G8 (C)	G9 (C)	G10 (C)
(% peso)*											
SiO ₂	37.4	36.7	39.2	36.9	36.6	37.2	37.3	37.4	38.3	37.3	37.6
Al ₂ O ₃	20.3	20.6	21.2	20.5	20.8	20.5	20.6	20.3	20.3	20.2	20.2
CaO	8.14	7.87	8.17	9.3	8.74	7.55	8.51	8.33	9.7	7.84	7.85
MgO	1.67	1.75	1.42	1.39	1.55	1.67	1.71	1.46	1.49	1.58	1.61
FeO	28.0	28.5	25.4	26.8	27.5	27.6	27.3	28.1	26.2	28.1	28.2
MnO	4.36	4.45	4.56	5.03	4.83	5.48	4.59	4.42	3.93	4.92	4.52
TiO ₂	0.034	0.020	0.028	0.040	0.028	0.021	0.038	0.018	0.046	0.017	0.017
(ppm)**											
Li	7.79	9.5	9.9	8.18	12.1	12.9	8.72	9.8	8.04	22.1	10.9
Ti	157	94.9	131	191	138	101	187	88.8	226	84.4	83.8
Sc	139	147	152	158	161	151	151	136	135	141	147
V	93.8	131	94.5	98.1	94.8	108	83.3	115	94.2	123	105
Cr	11.3	12.4	15.0	24.4	22.2	38.4	29.3	11.3	26.1	31.9	19.7
Co	6.36	6.99	5.35	5.62	7.35	7.09	7.62	5.92	6.85	6.59	6.33
Zn	23.9	24.7	20.3	24.7	28.1	26.5	25.3	25.4	24.3	32.8	24.4
Ga	12.6	12.7	13.5	13.2	14.1	12.6	13.1	13.6	14.1	13.8	13.8
Ge	12.1	11.1	11.5	10	13.2	11.3	13.2	8.77	10.4	10	10.3
Y	888	1116	944	701	924	1513	1076	1022	714	1306	1195
Nb	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.117	--
Zr	2.30	1.69	2.16	2.31	3.10	2.08	3.02	2.21	2.90	3.60	2.86
La	--	0.03	0.13	--	0.17	0.02	0.04	--	0.02	0.06	0.004
Ce	0.028	0.067	0.214	0.054	0.080	0.056	0.064	0.024	0.047	0.064	0.019
Pr	0.03	0.02	0.07	0.04	0.09	0.02	0.05	0.01	0.07	0.04	0.03
Nd	0.81	0.60	0.73	0.98	0.86	0.47	0.86	0.47	1.04	0.34	0.59
Sm	3.71	3.85	3.18	3.65	4.08	3.31	4.08	3.66	3.90	2.77	3.69
Eu	0.37	0.28	0.38	0.50	0.42	0.29	0.43	0.45	0.50	0.34	0.31
Gd	30.0	34.3	26.2	25.4	31.8	32.2	32.0	38.9	25.5	32.4	34.4
Tb	12.7	15.2	11.1	10.3	12.4	16.1	14.0	16.5	10.0	15.0	15.2
Dy	114	146	108	89.3	114	171	133	148	90.8	160	152
Ho	27.8	36.7	28.8	21.1	29.6	48.5	33.0	34.8	22.5	43.7	39.7
Er	92.5	119	102	69.7	96.5	171	107	101	70.8	150	128
Yb	97.7	125	125	76.9	107	207	113	89.8	72.2	160	133
Lu	14.4	17.6	19.4	10.7	14.9	30.4	15.3	12.1	9.77	22.3	17.7
Hf	0.32	0.50	0.31	0.35	0.38	0.37	0.48	0.42	0.33	0.53	0.49
Ta	0.03	0.09	0.05	0.01	0.05	0.08	0.04	0.07	0.04	0.08	0.06
Pb	--	0.11	2.48	--	0.49	0.21	0.08	0.08	0.21	0.64	0.12
Th	--	0.008	0.170	--	0.376	0.011	0.137	0.014	0.011	0.100	0.002
U	0.039	0.047	0.045	0.045	0.053	0.071	0.041	0.025	0.038	0.044	0.027

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--": Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

ANEXO IV

ANEXO 4. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Chuacús

	GT-0315																		GT-0318									
	G1 (B)	G1 (C)	G2 (B)	G2 (C)	G3 (C)	G4 (C)	G5 (C)	G6 (B)	G6 (C)	G7 (B)	G7 (C)	G8 (B)	G8 (C)	G9 (C)	G10 (B)	G10 (C)	G11 (B)	G11 (C)	G12 (C)	G1 (B)	G1 (C)	G2 (B)	G2 (C)	G3 (B)	G3 (B-C)	G3 (B-C2)	G4 (B)	G4 (B2)
(% peso)*																												
SiO ₂	35.7	36.2	36.2	36.1	36.7	36.5	37.1	36.0	36.5	36.6	37.1	37.0	42.6	36.8	37.0	36.2	36.4	36.6	36.6	38.3	37.5	37.0	36.9	36.8	37.7	37.9	37.6	37.1
Al ₂ O ₃	20.8	20.6	20.4	20.6	20.7	20.7	20.7	20.6	20.7	20.4	20.5	20.6	18.9	20.3	20.5	20.7	20.8	20.8	20.6	21.0	21.5	21.4	21.5	21.4	21.4	21.3	21.2	21.4
CaO	13.5	13.3	13.7	13.4	10.6	9.6	10.5	10.4	9.9	13.4	11.2	10.0	9.9	13.1	9.1	10.3	10.8	12.0	10.6	14.7	14.4	14.7	14.3	15.1	14.5	14.4	14.8	14.6
MgO	1.37	1.34	1.26	1.27	1.13	1.60	1.89	1.74	1.70	1.35	1.48	1.73	1.45	1.41	1.76	1.67	1.59	1.46	1.19	2.32	2.32	2.08	2.16	2.54	2.35	2.47	2.22	2.34
FeO	26.2	25.9	26.4	26.4	29.5	30.0	28.5	29.6	29.6	25.7	26.9	29.0	24.9	25.5	29.8	29.5	28.2	26.6	29.8	21.6	22.1	22.7	22.9	22.0	21.9	22.1	22.1	22.6
MnO	2.39	2.49	1.90	1.97	1.34	1.57	1.34	1.56	1.55	2.49	2.69	1.60	2.22	2.77	1.78	1.58	2.24	2.52	1.22	1.97	2.09	1.98	2.16	2.13	2.01	1.74	1.98	1.84
TiO ₂	0.08	0.08	0.13	0.15	0.07	0.08	0.07	0.08	0.07	0.06	0.08	0.07	0.04	0.07	0.05	0.12	0.04	0.05	0.07	0.11	0.15	0.12	0.17	0.11	0.13	0.11	0.14	0.06
(ppm)**																												
Li	1.75	1.61	1.21	1.02	--	1.22	0.9	--	0.8	1.01	--	--	--	2.39	0.6	0.9	--	--	1.08	2.15	2.01	2.47	1.54	1.52	2.48	1.83	2.85	1.47
Sc	24.0	19.4	39.0	33.8	41.8	20.4	56.7	60.7	25.5	33.7	48.0	33.8	37.0	22.6	58.4	36.7	34.3	41.4	37.9	14.8	48.4	17.1	15.0	16.4	17.2	15.1	15.1	16.4
Ti	420	390	701	739	344	370	346	428	352	297	367	342	156	307	261	592	222	224	300	542	739	613	822	559	641	576	737	322
V	31.8	28.4	34.6	31.3	22.4	16.0	34.5	53.5	17.6	33.4	42.6	17.3	11.1	52.9	28.1	28.4	12.5	28.0	20.1	42.5	66.2	46.3	39.6	52.4	42.0	42.1	51.7	42.0
Cr	4.40	--	3.45	3.09	18.5	6.00	22.8	21.1	7.10	4.95	6.50	3.22	2.56	27.5	7.50	8.03	6.65	2.26	38.3	50.0	39.5	78.4	58.9	130	130	95.9	146	33.0
Co	10.3	9.5	9.5	8.98	9.9	11.6	12.0	13.2	11.8	9.3	8.81	11.7	7.16	8.02	11.4	10.5	11.7	7.77	9.3	11.9	9.7	11.7	10.6	24.4	11.2	11.6	59.0	11.8
Zn	36.6	32.2	50.3	46.9	25.6	26.6	37.2	31.6	28.3	26.5	27.6	32.7	20.9	28.3	33.7	27.9	30.6	25.3	20.9	48.5	50.3	53.8	44.6	47.6	49.9	48.0	50.3	52.5
Ga	10.1	9.1	12.3	10.5	6.45	9.6	10.5	13.2	9.1	10.6	10.0	9.7	5.38	10.2	12.0	11.1	7.09	8.09	5.88	3.66	4.76	3.51	3.76	3.55	3.59	3.94	4.14	4.02
Ge	14.5	13.5	10.7	10	9	10	8.36	10.0	10.0	14.8	10	10.3	9	14.9	6.97	8.91	10.9	11.2	9	3.20	6.69	4.22	3.66	3.53	4.42	3.60	3.90	3.55
Y	1160	1291	457	448	396	900	518	389	608	1104	663	638	635	1841	157	436	820	404	384	74.4	126	127	61.6	164	105	76.2	148	186
Nb	0.015	--	--	--	--	--	0.016	--	--	0.004	--	--	0.011	--	0.015	--	--	--	--	--	0.004	--	0.034	0.060	--	--	0.224	--
Zr	3.90	3.10	4.20	2.90	2.50	2.75	3.08	2.00	3.60	3.00	3.80	3.30	3.30	2.70	2.55	3.40	3.20	2.40	1.80	--	3.10	4.20	3.50	5.80	3.50	2.30	21.0	1.47
La	--	0.002	--	--	--	--	0.004	0.01	--	--	--	--	--	--	--	0.01	--	--	--	0.03	--	--	--	0.09	--	--	0.02	--
Ce	--	0.006	--	0.006	--	0.008	0.023	0.057	0.024	0.008	--	0.010	0.006	--	0.013	0.041	0.038	--	--	--	--	--	--	0.019	--	--	0.013	--
Pr	--	0.01	--	--	0.01	0.02	--	0.02	0.01	--	--	0.02	--	--	0.02	0.02	0.01	--	--	--	--	--	--	0.03	--	--	--	--
Nd	0.13	0.25	0.13	0.18	0.27	0.44	0.47	0.35	0.46	0.18	0.20	0.43	0.11	0.13	0.47	0.51	0.26	0.23	0.27	0.04	--	--	--	0.09	--	--	0.03	--
Sm	1.29	1.32	0.88	0.58	1.32	2.28	1.95	1.87	1.49	0.57	1.37	2.47	0.85	1.05	1.81	2.52	1.43	1.07	1.30	--	--	--	--	0.06	--	--	--	0.04
Eu	1.20	1.25	0.8	0.8	1.30	1.61	1.54	1.51	1.19	0.7	1.23	1.62	0.7	1.14	1.52	2.01	1.08	0.8	1.26	0.0	0.0	0.1	--	0.1	0.016	0.013	0.1	0.1
Gd	13.7	16.1	8.57	8.22	13.8	18.1	15.8	14.0	12.7	9.63	13.5	16.6	7.67	14.1	10.3	17.5	12.6	8.83	12.8	0.26	0.84	0.26	0.19	0.73	0.27	0.23	0.53	0.85
Tb	7.73	8.50	3.79	3.66	5.31	7.38	5.83	4.74	5.00	5.42	5.45	6.53	3.31	8.33	3.14	6.06	5.58	3.16	5.28	0.2	0.6	0.3	0.1	0.6	0.3	0.2	0.4	0.6
Dy	113	132	49.2	48.7	55.8	96.0	69.2	54.6	68.6	96.1	71.3	80.6	56.7	150	26.4	64.9	81.0	38.9	55.1	3.82	8.28	6.81	2.42	10.3	5.37	4.00	8.81	11.5
Ho	40.2	43.4	14.3	14.4	13.5	31.6	19.5	14.4	22.6	42.2	25.2	25.0	23.7	69.3	5.36	16.5	30.2	14.3	13.9	2.18	3.85	3.89	1.70	5.41	3.32	2.48	5.11	6.27
Er	154	166	45.8	46.8	35.1	115	68.6	43.7	87.8	190	101	79.7	101	340	13.2	44.3	117	59.6	33.5	12.9	20.0	22.0	13.3	29.1	19.7	15.6	25.5	29.6
Yb	177	189	45.0	47.5	25.6	118	82.3	40.8	105	298	148	79.7	136	649	12.4	35.9	146	107	25.3	27.9	40.5	38.2	47.7	50.6	42.7	31.3	45.5	41.6
Lu	26.1	27.4	6.71	6.67	2.95	14.8	12.5	5.32	14.9	49.3	24.2	10.6	21.5	116	1.53	4.52	22.1	16.3	2.97	5.33	7.23	6.03	10.4	8.24	7.01	5.52	7.27	5.96
Hf	0.52	0.27	0.29	0.11	0.16	0.27	0.25	0.20	0.32	0.19	0.37	0.29	0.37	0.93	0.15	--	0.20	0.17	0.17	--	0.06	--	--	--	--	--	--	--
Ta	0.05	0.09	0.04	0.03	0.02	0.05	0.03	0.04	0.04	0.07	0.05	0.02	0.06	0.18	--	0.02	0.05	--	--	--	--	0.02	--	--	--	--	--	--
Pb	0.07	0.04	0.06	0.07	--	--	0.67	0.49	0.15	--	0.02	--	0.12	--	0.13	0.20	0.28	0.09	0.02	--	--	0.10	--	0.58	--	--	0.08	0.02
Th	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
U	--	--	0.005	--	--	--	0.012	--	--	--	--	0.002	--	--	0.004	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.006	--

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--" : Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

ANEXO 4. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Chuacús

GT-0318																												
	G4 (C)	G5 (B)	G5 (C)	G5 (B2)	G6 (B)	G6 (B-C)	G6 (C)	G7 (B)	G7 (C)	G8 (B)	G8 (C)	G9 (B)	G9 (C)	G10 (C)	G10 (B-C)	G11 (C)	G11 (B-C)	G12 (B)	G12 (C)	G13 (B)	G13 (C)	G14 (B)	G14 (C)	G15 (B)	G15 (C)	G16 (B)	G16 (C)	G17 (B)
(% peso)*																												
SiO ₂	36.3	36.8	37.3	37.1	36.5	37.2	35.9	37.4	37.2	37.5	36.4	36.6	37.0	37.8	37.4	37.0	37.1	36.7	36.7	36.9	36.5	35.5	37.1	36.5	35.9	37.0	36.5	37.0
Al ₂ O ₃	21.8	21.5	21.6	21.2	21.7	21.6	21.9	21.4	21.5	21.4	21.4	21.5	21.4	21.4	21.3	21.3	21.3	21.5	21.8	21.3	21.7	21.8	21.1	21.4	21.7	21.4	21.5	21.5
CaO	15.0	14.5	12.4	14.8	13.2	11.4	11.4	13.1	8.42	14.7	15.0	15.1	13.2	14.6	15.3	14.9	14.8	15.1	15.0	15.1	14.6	15.0	12.6	14.5	14.7	15.1	14.3	11.0
MgO	2.12	2.81	3.15	2.16	2.63	3.05	2.74	3.22	3.94	2.07	2.22	2.58	2.79	2.55	2.07	1.68	2.15	2.18	2.65	2.47	2.87	2.24	2.27	2.14	2.16	2.07	2.34	3.54
FeO	22.7	21.8	22.6	23.5	23.7	23.8	25.2	21.6	24.3	22.6	23.1	22.0	23.3	21.5	21.8	23.6	22.8	22.7	21.5	21.9	22.0	23.4	24.8	24.4	24.5	22.2	23.9	23.1
MnO	1.94	2.47	2.88	1.01	2.07	2.75	2.80	3.06	4.45	1.62	1.58	2.01	2.26	2.06	2.09	1.37	1.80	1.60	2.20	2.16	2.14	2.02	2.09	0.9	0.9	2.09	1.28	3.77
TiO ₂	0.06	0.09	0.12	0.12	0.07	0.06	0.06	0.13	0.13	0.12	0.26	0.11	0.09	0.13	0.10	0.22	0.12	0.13	0.17	0.13	0.11	0.10	0.09	0.11	0.15	0.08	0.07	0.14
(ppm)**																												
Li	2.27	--	2.95	3.53	3.19	2.44	3.40	2.21	3.77	2.45	3.72	1.29	--	1.94	3.13	3.78	2.78	3.53	3.90	2.21	--	2.61	--	2.72	3.62	3.19	2.23	3.13
Sc	15.8	18.2	36.5	23.3	12.9	11.5	11.0	11.7	27.9	20.6	49.4	23.3	41.1	15.0	16.2	48.2	17.2	16.3	12.5	14.6	21.9	17.8	46.5	29.6	26.4	16.0	27.6	28.3
Ti	282	470	589	647	340	285	272	654	610	614	1264	539	417	634	503	1152	639	679	856	646	544	487	445	541	738	438	340	718
V	36.4	46.9	55.8	58.9	32.8	25.5	23.7	34.6	24.6	46.7	65.1	48.4	52.8	43.9	49.0	81.1	54.3	55.9	39.0	43.1	36.0	50.2	66.6	49.3	50.4	47.2	34.6	39.3
Cr	13.9	138	32.2	43.1	24.8	17.0	17.5	33.0	17.8	83.0	48.1	51.3	67.1	70.6	81.1	56.0	68.0	120	43.3	104	34.1	89.2	41.5	43.5	29.9	75.4	45.5	22.7
Co	10.8	12.0	11.3	9.3	11.2	14.2	12.5	13.1	15.9	10.1	11.9	10.9	10.9	11.0	11.1	11.6	9.8	11.5	11.4	11.4	12.4	10.6	10.6	8.00	6.79	11.4	10.1	14.6
Zn	44.8	45.8	42.7	56.1	52.6	49.3	47.2	44.0	42.9	53.3	51.4	46.8	40.6	46.1	50.2	50.3	46.2	50.9	44.5	50.9	71.0	47.6	41.9	56.6	56.9	49.2	51.9	36.0
Ga	3.67	4.14	7.11	5.58	4.58	4.49	3.94	4.75	4.46	3.95	5.03	4.04	4.97	3.52	3.46	5.74	3.96	4.60	3.48	3.50	3.85	3.80	5.43	5.79	4.62	3.69	3.56	4.50
Ge	3.08	4.08	10.5	4.69	3.65	7.29	7.02	4.69	12.2	3.81	6.77	5.86	13.4	3.46	3.46	6.27	3.48	3.51	2.84	3.18	4.43	3.50	11.8	4.25	3.80	3.56	4.46	11.0
Y	152	193	1306	69.1	496	1061	1030	412	871	111	96.6	77.5	279	93.1	129	52.6	102	147	39.5	98.0	97.3	124	295	128	39.8	132	60.8	834
Nb	--	--	0.015	--	--	--	--	0.024	--	--	0.108	0.028	--	--	--	0.046	0.004	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Zr	1.40	2.10	2.10	2.30	3.40	2.90	46.0	2.40	--	2.80	4.70	3.50	1.98	5.80	1.70	8.10	2.41	4.20	4.50	2.70	2.90	1.10	2.60	2.10	2.90	2.30	3.60	1.19
La	--	0.003	--	--	0.01	--	--	--	--	--	0.003	--	--	--	0.01	--	--	--	--	--	--	--	--	0.01	--	--	--	--
Ce	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.003	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Pr	0.004	0.003	--	--	0.005	0.01	--	--	--	--	--	--	--	--	0.01	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.003	--	--
Nd	--	--	--	--	--	--	--	--	0.10	--	--	--	0.08	--	--	--	--	0.01	--	--	--	--	--	0.03	--	--	--	0.07
Sm	--	0.08	0.09	0.09	0.15	0.19	0.15	--	0.55	--	0.09	0.03	0.46	--	0.06	0.14	--	0.05	--	--	--	--	0.40	--	0.05	--	--	0.40
Eu	0.1	0.0	0.2	0.1	0.28	0.53	0.49	0.03	0.38	0.02	0.11	0.03	0.44	0.01	0.04	0.10	0.03	0.07	--	0.0	--	--	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4
Gd	0.61	0.89	2.91	1.48	3.64	6.30	6.09	0.88	5.13	0.27	1.47	0.55	4.44	0.19	0.38	1.26	0.45	0.67	--	0.42	0.51	0.41	5.11	1.87	0.58	0.38	0.09	4.37
Tb	0.4	0.7	2.95	0.7	2.95	5.20	4.95	0.8	3.25	0.3	0.6	0.3	2.24	0.2	0.4	0.6	0.3	0.5	0.0	0.3	0.3	0.3	2.57	1.08	0.3	0.4	0.1	2.68
Dy	8.65	13.0	67.0	8.04	50.4	90.9	87.8	20.6	54.7	5.99	8.31	5.13	28.5	4.28	7.88	5.73	5.36	9.1	1.29	5.47	5.93	7.84	32.5	13.8	4.01	7.31	2.99	52.7
Ho	4.97	6.83	38.6	2.27	18.1	36.2	35.5	13.3	26.9	3.47	3.38	2.24	9.4	2.68	3.81	1.53	2.79	4.31	0.8	2.76	2.50	3.27	9.0	3.39	1.03	3.47	1.46	23.3
Er	24.1	33.7	183	6.97	54.4	125	119	73.9	136	18.1	13.4	12.6	31.0	18.2	23.4	6.40	17.0	24.9	8.86	18.5	17.7	19.9	38.6	13.9	4.40	23.7	12.1	173
Yb	32.7	60.7	276	8.04	48.1	116	111	130	188	28.5	21.5	30.2	26.0	42.0	40.3	9.3	34.6	39.0	34.2	41.1	42.6	36.3	46.6	15.5	5.63	41.4	27.0	447
Lu	4.44	10.1	44.9	1.25	6.74	15.2	14.8	20.3	27.2	4.45	3.45	5.88	3.70	7.69	6.17	1.40	6.43	6.32	7.21	7.17	7.85	5.85	7.26	2.33	0.96	6.42	5.18	75.3
Hf	--	--	0.33	--	--	0.44	2.30	--	0.20	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.13	--	--	0.42
Ta	--	--	0.10	--	0.03	0.05	0.07	0.01	0.05	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.05
Pb	--	0.12	0.05	0.04	--	0.12	--	0.04	--	--	--	--	--	0.03	--	--	0.11	0.09	--	--	0.14	0.09	--	0.04	--	--	--	--
Th	--	--	--	--	--	--	0.017	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
U	--	--	--	0.003	--	--	0.43	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.038

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--" : Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

ANEXO 4. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Chuacús

GT-0309						
	G9 (C)	G10 (C)	G11 (B)	G11 (C)	G12 (C)	G13 (C)
(% peso)*						
SiO ₂	36.4	36.6	36.3	36.5	36.1	36.1
Al ₂ O ₃	20.3	20.3	20.4	20.3	20.3	20.4
CaO	13.6	13.3	12.7	13.4	13.6	14.0
MgO	0.4	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4
FeO	28.5	28.3	28.4	28.4	28.5	28.1
MnO	0.6	0.9	1.59	0.7	0.9	0.8
TiO ₂	0.24	0.21	0.16	0.24	0.21	0.20
(ppm)**						
Li	3.13	1.85	1.91	2.20	1.94	2.04
Sc	12.8	12.6	30.2	15.4	9.7	16.1
Ti	1127	1063	816	1133	1034	948
V	26.7	19.9	34.5	33.5	25.7	31.5
Cr	3.89	--	--	4.10	9.4	13.0
Co	7.13	7.98	7.48	7.98	7.44	7.08
Zn	50.5	57.5	50.6	46.9	47.5	46.5
Ga	15.8	15.1	17.4	15.6	15.4	15.0
Ge	10.4	10.5	12.1	10	10.2	11.0
Y	139	200	423	249	155	256
Nb	--	--	--	--	--	--
Zr	3.40	2.60	2.60	2.30	2.50	--
La	--	--	--	--	--	--
Ce	0.023	0.025	0.016	0.013	0.025	0.024
Pr	0.01	0.01	--	0.03	0.03	0.03
Nd	0.66	0.57	0.50	0.68	0.50	0.73
Sm	3.71	2.97	3.88	3.97	3.09	3.52
Eu	2.86	2.83	2.60	2.50	2.57	2.24
Gd	23.8	23.3	26.2	26.8	20.6	25.5
Tb	5.89	6.24	8.96	8.07	5.71	8.44
Dy	34.8	42.6	71.1	54.0	33.5	56.7
Ho	5.42	8.13	16.5	10.5	6.23	10.5
Er	12.2	19.9	52.0	28.0	18.1	25.9
Yb	6.42	12.3	45.7	15.8	14.8	14.7
Lu	0.83	1.93	6.47	2.45	2.46	2.22
Hf	0.25	--	0.38	0.17	--	0.18
Ta	--	--	0.04	--	0.01	--
Pb	0.04	--	--	0.01	--	0.05
Th	--	--	--	--	--	--
U	0.009	--	--	0.011	--	--

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--" : Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

ANEXO V

Anexo 5. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates del Complejo Macizo de Chiapas

MCH-705																
	G1 (C)	G2 (C)	G3 (C)	G4 (C)	G5 (C)	G6 (C)	G7 (C)	G8 (C)	G9 (C)	G10 (C)	G11 (C)	G12 (C)	G13 (C)	G14 (C)	G15 (C)	G16 (C)
(% peso)*																
SiO ₂	36.4	36.5	36.4	36.7	36.3	36.9	36.7	36.1	37.1	36.6	35.9	36.9	36.7	36.1	35.6	36.6
Al ₂ O ₃	20.1	20.0	20.1	20.0	20.2	19.9	20.0	20.3	19.7	19.9	20.2	19.8	20.0	20.2	20.4	19.9
CaO	0.56	0.46	0.46	0.47	0.49	0.48	0.54	0.45	0.43	0.42	0.41	0.47	0.58	0.54	0.52	0.48
MgO	1.13	1.05	1.09	1.13	1.11	1.10	1.25	1.05	1.06	1.03	1.0	1.09	1.00	1.12	1.05	1.03
FeO	21.4	19.9	20.4	20.4	21.1	19.7	20.8	21.2	20.5	21.3	22.1	20.7	21.5	22.0	20.8	21.5
MnO	20.3	21.9	21.6	21.2	20.6	21.8	20.5	20.8	21.1	20.7	20.3	20.9	20.1	20.0	21.6	20.4
TiO ₂	0.14	0.10	0.09	0.09	0.11	0.13	0.14	0.10	0.11	0.08	0.10	0.12	0.12	0.11	0.09	0.11
(ppm)**																
Li	92.4	91.6	119	109	127	146	145	101	128	93.6	113	136	107	135	103	140
Sc	84.2	118	103	74.8	70.7	77.9	67.9	75.4	85.4	86.0	105	73.2	90.0	83.5	106	77.0
Ti	787	562	528	541	634	714	820	530	612	454	585	668	657	635	529	629
V	5.76	6.58	9.2	7.01	5.68	5.90	7.18	4.93	6.67	6.76	8.89	5.61	3.98	5.89	5.82	6.55
Cr	--	--	2.88	1.92	--	1.53	--	3.26	--	--	2.90	--	--	1.68	3.42	--
Co	3.88	3.71	4.61	3.60	4.57	3.84	4.25	5.30	3.98	3.56	3.92	3.62	3.45	4.16	3.41	3.78
Zn	130	109	128	126	109	140	138	101	114	120	131	129	117	142	120	117
Ga	33.9	28.4	27.8	28.3	29.5	33.1	33.0	26.9	28.7	28.7	28.8	30.0	27.8	29.0	30.3	29.0
Ge	34.8	45.4	45.6	41.9	41.6	49.0	39.0	39.6	42.4	42.7	45.2	38.6	25.7	37.1	40.5	41.9
Y	3349	2076	2581	1967	2543	2999	3902	1547	2715	1455	2307	2789	2044	3036	2376	3099
Nb	9.5	2.10	1.05	1.23	2.39	5.79	8.60	4.18	2.09	0.707	1.32	4.66	5.00	3.07	2.43	1.91
Zr	21.5	15.3	11.5	13.0	16.0	19.1	17.3	17.0	16.1	13.8	12.8	19.6	18.7	19.1	14.5	59.0
La	0.14	0.005	--	--	0.005	--	--	--	0.003	--	--	--	--	--	0.002	--
Ce	0.440	0.005	--	0.010	0.052	0.035	0.039	0.021	0.010	0.007	0.012	0.010	0.055	0.038	0.040	0.023
Pr	0.12	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.04	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.08	0.04	0.02	0.05
Nd	1.62	0.48	0.45	0.48	1.04	1.06	1.47	0.70	0.78	0.51	0.57	0.95	1.73	1.27	0.88	0.96
Sm	14.8	8.28	7.36	8.24	12.0	12.8	14.0	9.44	9.16	7.15	7.48	12.0	16.7	12.8	8.38	10.2
Eu	0.14	0.05	0.06	0.07	0.12	0.07	0.09	0.06	0.10	0.07	0.07	0.11	0.16	0.12	0.09	0.09
Gd	93.6	71.0	68.6	68.3	80.9	91.3	95.6	72.1	79.2	68.1	71.1	85.0	94.0	87.3	68.4	76.8
Tb	42.8	32.4	33.3	32.4	38.5	43.1	46.9	32.0	38.3	30.9	35.4	38.8	36.8	40.5	33.1	38.2
Dy	452	301	350	289	363	421	503	256	373	243	339	384	320	409	329	402
Ho	110	58.2	78.9	54.7	72.2	84.6	121	41.3	78.1	37.2	66.3	80.7	57.3	91.4	70.7	92.9
Er	402	157	245	151	208	236	418	99.3	229	81.7	178	262	147	290	228	312
Yb	828	179	292	174	251	271	692	96.5	278	67.4	194	423	160	447	355	502
Lu	125	21.8	37.5	21.3	29.7	32.9	93.6	11.5	34.8	7.88	23.8	57.2	16.5	60.8	48.8	69.7
Hf	2.49	1.38	1.83	1.91	2.19	2.64	2.87	1.82	1.91	1.36	1.60	2.64	1.99	2.12	1.78	6.10
Ta	2.77	1.33	0.63	1.06	1.49	2.57	2.68	1.68	1.05	0.55	0.82	1.94	1.81	1.46	1.46	1.26
Pb	0.30	0.27	0.19	0.30	0.33	0.25	0.14	0.75	0.19	0.35	1.74	0.27	0.17	1.16	0.71	0.23
Th	0.210	0.002	0.040	0.004	0.056	0.007	0.003	0.106	0.012	0.016	0.064	0.008	0.004	0.156	0.113	0.160
U	1.57	0.223	0.26	0.147	0.335	0.518	0.583	0.354	0.294	0.126	0.192	0.524	0.521	0.487	0.29	1.8

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--": Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

ANEXO VI

Anexo 6. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates de skarns

5S01																									
	G1 (B)	G1 (B-C1)	G1 (B-C2)	G1 (B-C3)	G1 (C)	G1 (B-C4)	G1 (B-C5)	G1 (B-C6)	G2 (B)	G2 (B-C1)	G2 (B-C2)	G2 (C1)	G2 (C2)	G2 (B-C3)	G2 (B-C4)	G2 (B)	G3 (B)	G3 (B-C1)	G3 (B-C2)	G3 (C1)	G3 (C2)	G3 (C3)	G3 (C4)	G3 (C5)	
(% peso)*																									
SiO ₂	33.7	34.8	34.8	52.3	37.4	33.9	34.8	34.4	34.4	34.7	35.2	37.4	36.6	35.8	35.5	34.9	37.3	32.7	36.3	36.3	36.7	36.4	36.2	35.3	
Al ₂ O ₃	6.84	7.70	8.80	12.7	16.2	7.56	7.62	7.07	6.76	7.11	6.34	17.6	13.9	8.20	7.15	6.56	16.3	0.1	14.6	14.3	14.2	13.9	13.7	12.7	
CaO	37.2	37.3	37.5	30.1	39.7	37.9	36.8	36.3	36.2	36.8	37.1	39.3	39.0	36.9	35.4	35.2	38.4	36.3	37.5	37.6	37.0	37.0	37.2	37.2	
MgO	0.020	0.015	0.027	0.024	0.022	0.022	0.017	0.014	0.022	0.018	0.015	0.021	0.042	0.013	0.016	0.023	0.054	0.027	0.037	0.043	0.033	0.036	0.048	0.046	
FeO	20.8	19.1	17.7	4.72	6.56	19.8	19.6	20.7	21.1	20.3	20.8	5.56	10.2	18.8	20.9	21.8	7.25	30.8	10.5	10.5	10.7	11.3	11.2	13.8	
MnO	1.35	1.06	0.93	0.07	0.07	0.74	1.08	1.30	1.28	1.03	0.50	0.08	0.04	0.29	1.04	1.24	0.25	0.12	0.64	0.91	1.24	1.12	1.15	0.67	
TiO ₂	0.15	0.003	0.12	0.04	0.03	0.08	0.03	0.15	0.23	0.02	0.02	0.04	0.16	0.04	0.02	0.30	0.41	0.0004	0.35	0.42	0.10	0.17	0.47	0.38	
(ppm)**																									
Li	0.4	--	0.4	7.22	--	0.3	--	0.4	0.7	--	--	--	--	0.4	--	0.7	1.56	--	2.17	3.04	0.9	1.21	3.50	2.49	
Sc	12.3	10.8	10.3	9.4	8.63	10.6	9.9	11.2	12.7	10.0	10.2	7.12	8.20	9.2	9.6	13.5	8.53	11.7	8.00	7.58	7.51	8.06	7.56	7.51	
Ti	1145	24.3	892	176	195	649	241	1192	1844	175	199	193	1006	296	166	2490	2481	3.51	2220	2734	651	1109	3040	2500	
V	219	37.9	64.5	28.6	23.9	47.6	46.4	175	231	37.3	12.9	21.0	62.0	18.1	34.2	266	58.4	0.3	34.4	39.9	39.5	61.9	48.7	42.8	
Cr	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.9	--	--	0.9	--	--	--	1.16	--	1.55	--	--	--	--	
Co	0.1	--	0.1	0.3	0.2	0.2	--	0.1	--	--	--	0.2	0.1	0.1	--	--	0.3	--	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	
Zn	1.58	--	1.15	1.21	--	1.12	0.9	0.8	1.31	0.6	--	--	--	0.9	0.9	1.92	0.9	0.9	2.01	2.58	1.53	1.99	2.94	1.86	
Ga	8.86	8.09	7.75	13.8	21.7	8.32	8.48	8.52	9.3	8.61	9.7	20.6	20.6	11.9	8.37	9.5	20.3	30.0	17.0	15.2	14.9	14.7	15.6	19.3	
Ge	3.62	1.98	1.46	1	1.31	1.98	2.61	4.30	4.72	2.54	1.63	1.34	2.21	1.67	3.11	6.13	2.30	4.07	4.75	4.07	3.23	4.03	4.13	4.62	
Y	26.5	7.70	19.0	5.46	4.21	14.6	12.5	23.8	27.0	10.2	5.32	4.08	15.8	8.34	10.2	29.4	19.5	0.15	5.25	12.3	11.7	25.2	8.11	3.82	
Nb	6.28	1.42	11.0	2.02	1.39	9.8	5.16	11.6	7.89	2.43	1.59	1.49	4.97	1.84	2.77	11.3	9.9	0.001	2.01	2.21	0.3	1.0	1.50	1.99	
Zr	17.9	11.1	31.3	35.3	49.0	40.3	14.2	30.5	18.7	16.3	33.1	38.1	27.6	41.1	21.7	21.9	27.0	10.1	10.5	15.8	32.3	16.4	25.9	7.40	
La	--	0.002	--	0.01	0.04	0.002	--	--	--	--	--	0.02	0.10	0.11	0.003	--	0.004	7.02	0.003	0.001	0.002	6.00	--	--	
Ce	0.015	0.010	0.011	0.119	0.550	0.074	0.012	0.032	0.011	0.033	0.070	0.284	1.36	1.99	0.026	0.012	0.052	24.5	0.008	0.017	0.054	7.10	0.014	0.009	
Pr	0.01	0.01	0.01	0.10	0.44	0.05	0.01	0.02	0.01	0.02	0.06	0.28	1.18	1.39	0.02	0.01	0.03	3.19	0.01	0.01	0.06	0.85	0.02	0.01	
Nd	0.20	0.12	0.13	2.08	6.55	0.66	0.18	0.25	0.11	0.22	0.84	4.64	15.2	15.1	0.30	0.15	0.84	7.74	0.12	0.21	0.94	3.80	0.24	0.22	
Sm	0.21	0.24	0.29	2.16	3.45	0.78	0.18	0.31	0.24	0.43	1.00	3.02	5.65	5.01	0.52	0.15	1.56	0.45	0.39	0.42	1.61	1.65	0.49	0.38	
Eu	0.1	0.1	0.1	1.07	1.26	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	1.20	1.74	1.39	0.1	0.1	1.25	0.6	0.08	0.09	0.21	0.30	0.08	0.11	
Gd	0.67	0.63	0.95	1.94	2.06	1.65	0.68	0.87	0.59	1.01	1.54	2.26	3.30	3.48	1.12	0.62	3.97	0.31	1.13	1.52	3.66	3.63	1.39	1.12	
Tb	0.21	0.18	0.31	0.26	0.24	0.32	0.21	0.23	0.22	0.25	0.21	0.24	0.46	0.37	0.26	0.21	0.72	0.013	0.2	0.3	0.5	0.7	0.3	0.2	
Dy	2.52	1.41	2.93	1.32	1.04	2.24	1.78	2.53	2.59	1.67	1.10	1.10	2.54	1.70	1.81	2.78	4.17	0.028	1.28	2.38	2.80	4.55	1.77	1.06	
Ho	0.8	0.3	0.6	0.20	0.14	0.44	0.40	0.76	0.88	0.34	0.16	0.14	0.50	0.28	0.32	0.96	0.69	0.004	0.2	0.4	0.4	0.8	0.3	0.1	
Er	3.52	0.7	1.85	0.5	0.4	1.28	1.18	2.88	3.72	0.8	0.4	0.4	1.50	0.7	0.8	4.08	1.64	--	0.4	1.0	0.9	2.44	0.7	0.3	
Yb	5.12	0.4	1.86	0.4	0.3	1.15	1.11	4.15	5.93	0.6	0.3	0.3	1.49	0.7	0.6	7.03	1.47	--	0.3	0.8	0.9	2.16	0.7	0.2	
Lu	0.80	0.06	0.28	0.05	0.05	0.16	0.16	0.64	0.97	0.07	0.04	0.04	0.17	0.10	0.08	1.13	0.21	--	0.03	0.10	0.09	0.23	0.08	0.02	
Hf	0.42	0.02	0.76	0.47	0.53	0.61	0.13	0.58	0.64	0.20	0.49	0.57	0.55	0.56	0.31	0.80	1.43	--	0.17	0.31	0.67	0.62	0.53	0.10	
Ta	0.16	0.01	0.26	0.05	0.08	0.20	0.07	0.17	0.23	0.04	0.07	0.10	0.26	0.09	0.03	0.37	0.86	--	0.04	0.02	0.03	0.06	0.02	0.03	
Pb	--	--	0.06	0.26	0.06	0.06	0.04	--	0.04	0.04	0.07	0.07	0.13	0.11	0.05	0.13	0.05	--	0.13	0.06	0.05	0.20	--	0.10	
Th	0.073	0.028	0.069	0.138	0.458	1.07	0.056	0.141	0.072	0.099	0.874	0.282	0.445	1.87	0.186	0.087	0.093	0.065	0.147	0.185	0.240	0.930	0.224	0.091	
U	0.034	0.059	0.048	0.207	0.529	0.132	0.056	0.039	0.031	0.028	0.100	0.416	0.517	3.38	0.036	0.045	0.714	2.61	0.058	0.145	0.257	0.740	0.171	0.101	

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--" : Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

Anexo 6. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates de skarns

	5S01			NM01																					
	G3 (B-C3)	G3 (B-C4)	G3 (B)	G1 (B1)	G1 (B-C1)	G1 (B-C2)	G1 (C)	G2 (B1)	G2 (B-C1)	G2 (B-C2)	G2 (B-C3)	G2 (C1)	G2 (C2)	G2 (B2)	G3 (B1)	G3 (B-C1)	G3 (B-C2)	G3 (B-C3)	G3 (C1)	G3 (C2)	G3 (C3)	G3 (C4)	G3 (C5)	G3 (B-C4)	
(% peso)*																									
SiO ₂	33.5	33.9	34.0	33.9	35.2	34.4	34.3	33.4	33.5	33.9	34.4	34.7	34.3	34.3	34.8	33.6	33.7	33.4	35.0	35.2	35.1	35.0	33.6	33.3	
Al ₂ O ₃	0.005	0.02	3.54	0.1	8.56	3.08	3.41	0.2	1.85	2.03	4.68	6.57	5.21	1.79	8.39	0.9	0.3	0.1	8.30	9.0	8.92	8.34	0.3	0.1	
CaO	35.5	35.3	35.9	34.8	35.9	35.6	35.6	34.9	35.7	35.5	35.4	35.7	35.6	35.3	35.7	35.5	34.9	35.2	35.8	35.9	36.3	35.5	34.8	35.2	
MgO	0.022	0.025	0.026	0.023	0.021	0.026	0.023	0.017	0.031	0.032	0.022	0.021	0.022	0.032	0.068	0.046	0.051	0.050	0.014	0.016	0.045	0.060	0.033	0.053	
FeO	30.8	30.6	26.2	30.6	19.0	26.3	26.0	30.9	28.3	27.9	24.5	22.0	23.7	28.0	19.8	29.2	30.3	30.6	19.5	18.6	18.0	19.0	30.5	30.7	
MnO	0.16	0.12	0.31	0.6	1.25	0.63	0.69	0.64	0.57	0.60	1.01	1.02	1.11	0.6	1.19	0.73	0.71	0.71	1.32	1.24	1.19	1.32	0.70	0.70	
TiO ₂	0.0001	0.0001	0.06	0.0001	0.12	0.001	0.001	--	0.001	0.002	0.04	0.02	0.07	0.01	0.04	0.002	0.001	--	0.06	0.02	0.44	0.76	0.01	--	
(ppm)**																									
Li	--	--	0.5	--	0.4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.3	0.4	1.01	1.60	--	--	
Sc	10.7	11.4	9.6	11.0	8.33	9.6	9.8	10.3	9.6	9.8	9.2	8.80	8.95	9.9	6.70	10.1	9.9	9.9	8.64	7.71	9.7	8.60	9.6	10.0	
Ti	1.33	1.45	533	0.5	902	7.00	7.90	--	7.40	15.3	378	165	617	116	263	19.0	13.4	--	446	187	3408	5993	71.1	--	
V	--	0.1	26.8	0.1	280	18.9	20.3	0.5	13.2	15.7	53.4	60.3	65.0	24.8	156	8.90	4.57	1.63	153	518	156	109	7.67	2.24	
Cr	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1.84	--	24.0	--	--	--	4.79	--	5.31	10.5	--	--	
Co	--	--	0.3	0.1	--	0.1	--	--	0.1	--	--	0.2	0.2	--	0.7	0.6	0.3	--	--	--	--	0.2	0.4	0.1	
Zn	1.26	1.16	1.13	1.23	1.08	0.8	1.05	1.30	1.07	1.13	1.0	0.8	0.8	1.32	83.0	7.60	0.9	1.76	0.9	1.11	2.49	3.66	1.54	1.69	
Ga	26.8	27.3	49.4	6.42	14.7	31.9	28.0	20.0	35.6	33.5	19.0	18.4	13.6	30.6	18.2	25.0	17.7	27.8	15.8	18.2	13.6	9.4	5.83	16.2	
Ge	3.54	3.18	4.01	2.71	7.33	7.63	6.78	8.80	6.78	6.54	5.66	8.19	8.43	6.29	6.58	7.45	5.83	9	7.22	5.91	5.74	4.28	8.45	5.30	
Y	0.01	0.02	3.91	0.64	33.6	0.48	0.39	0.21	0.25	0.50	3.16	5.33	1.72	0.44	13.4	0.15	0.15	0.02	17.2	12.8	24.3	54.4	1.04	0.01	
Nb	0.004	--	1.28	--	5.32	0.005	0.007	--	--	--	0.3	0.6	0.4	0.0	1.62	0.008	0.0	--	6.05	1.23	8.44	21.5	0.1	--	
Zr	11.5	8.09	11.1	8.70	11.3	8.30	8.40	7.80	9.10	7.50	25.1	18.2	27.6	12.5	10.5	9.30	8.50	10.2	27.5	9.80	62.9	60.3	8.90	8.10	
La	4.69	2.77	1.08	0.11	0.001	0.004	0.003	0.06	0.02	0.02	--	--	--	0.02	0.15	0.05	0.07	0.18	--	--	--	--	0.22	0.12	
Ce	1.66	3.62	4.68	0.266	0.010	0.072	0.087	0.320	0.208	0.272	0.037	0.010	0.048	0.170	0.760	0.289	0.284	0.565	--	0.048	0.051	0.014	0.572	0.184	
Pr	0.12	0.42	0.90	0.03	0.004	0.02	0.04	0.06	0.07	0.09	0.02	0.004	0.03	0.06	0.15	0.06	0.04	0.06	--	0.03	0.03	0.01	0.12	0.01	
Nd	0.34	1.24	5.10	0.08	0.02	0.21	0.40	0.38	0.49	0.64	0.27	0.16	0.21	0.28	0.46	0.28	0.10	0.11	0.02	0.44	0.41	0.15	0.36	0.03	
Sm	0.01	0.09	2.58	--	0.06	0.12	0.22	0.06	0.13	0.14	0.19	0.19	0.19	0.06	0.06	0.12	0.02	0.01	0.07	0.63	0.64	0.48	0.14	--	
Eu	0.02	0.05	0.59	0.02	0.06	0.32	0.31	0.06	0.29	0.29	0.11	0.29	0.13	0.21	0.14	0.11	0.05	0.05	0.08	0.24	0.25	0.11	0.03	--	
Gd	--	0.07	2.00	0.01	0.28	0.10	0.15	0.06	0.05	0.09	0.23	0.47	0.37	0.06	0.41	--	--	--	0.44	1.33	1.80	1.63	0.15	--	
Tb	--	--	0.19	0.01	0.2	0.01	0.01	0.004	0.003	0.013	0.047	0.095	0.043	0.008	0.1	0.006	0.003	--	0.2	0.3	0.4	0.5	0.01	--	
Dy	--	--	0.85	0.04	2.76	0.08	0.08	0.03	0.03	0.06	0.35	0.71	0.27	0.06	1.49	0.064	0.030	--	1.97	2.18	3.01	4.93	0.10	--	
Ho	--	--	0.15	0.02	1.15	0.02	0.01	0.003	0.005	0.01	0.07	0.18	0.05	0.01	0.5	0.007	0.005	--	0.6	0.4	0.8	1.44	0.03	--	
Er	0.002	--	0.28	0.04	5.50	0.04	0.02	0.02	0.02	0.05	0.27	0.50	0.15	0.04	1.87	--	0.014	--	2.41	1.23	2.46	5.44	0.07	--	
Yb	--	--	0.25	0.1	10.3	0.07	0.05	0.01	0.03	0.04	0.40	0.66	0.19	0.08	3.01	--	--	--	3.66	1.14	2.93	7.91	0.09	--	
Lu	--	--	0.04	0.01	1.65	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.08	0.06	0.02	0.47	--	--	--	0.59	0.13	0.42	1.31	0.01	--	
Hf	--	--	0.13	--	0.39	0.05	--	--	0.04	--	0.51	0.46	1.06	0.09	0.19	--	--	--	0.54	0.06	2.29	2.70	--	--	
Ta	--	--	0.05	--	0.11	--	--	--	--	--	0.02	0.01	0.03	--	0.02	--	--	--	0.04	0.01	0.52	1.71	--	--	
Pb	0.04	0.05	0.10	0.04	0.03	0.04	--	0.04	0.06	--	0.03	--	0.05	0.07	0.72	--	0.06	0.07	0.03	--	0.07	--	--	0.04	
Th	0.002	0.011	0.292	0.003	--	0.198	0.295	0.004	0.235	0.172	0.121	0.079	0.167	0.252	0.014	0.021	--	--	0.006	0.261	0.196	0.034	0.010	--	
U	0.092	0.418	1.60	0.409	0.027	1.01	1.04	0.857	1.92	2.30	0.270	0.256	0.375	1.82	0.290	1.15	1.08	1.43	0.039	0.329	0.632	0.392	0.582	0.582	

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--" : Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

Anexo 6. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates de skarns

	NM01						DR01																			
	G3 (B-C5)	G4 (B1)	G4 (B-C1)	G4 (B-C2)	G4 (C1)	G4 (C2)	G1 (B1)	G1 (B-C1)	G1 (B-C2)	G1 (B-C3)	G1 (C1)	G1 (C2)	G1 (C3)	G1 (B-C4)	G1 (B-C5)	G1 (B2)	G2 (B1)	G2 (B-C1)	G2 (B-C2)	G2 (C1)	G2 (C2)	G2 (C3)	G2 (B-C3)	G2 (B2)		
(% peso)*																										
SiO ₂	33.7	34.9	33.4	35.3	35.2	34.9	33.2	33.8	33.9	34.2	33.6	33.4	33.8	33.6	34.0	34.2	33.5	34.6	34.5	35.3	35.0	33.7	33.8	34.0		
Al ₂ O ₃	0.1	7.54	0.5	8.11	8.12	8.38	0.1	2.10	0.8	0.7	0.7	0.2	0.3	0.2	1.11	3.19	0.5	5.45	6.82	8.89	9.2	1.62	1.16	0.4		
CaO	35.0	36.0	35.2	36.1	36.2	36.1	35.3	35.1	35.3	34.7	35.1	35.1	35.2	35.1	35.0	35.5	35.5	35.6	36.0	35.6	36.0	35.5	35.2	35.2		
MgO	0.043	0.015	0.039	0.030	0.021	0.034	0.022	0.035	0.038	0.041	0.045	0.054	0.046	0.049	0.033	0.026	0.034	0.014	0.019	0.022	0.021	0.026	0.025	0.041		
FeO	30.5	20.5	30.1	18.4	19.0	19.0	30.8	28.2	29.3	29.7	30.0	30.5	30.0	30.3	29.2	26.4	29.9	23.3	21.6	18.9	18.5	28.5	29.3	30.0		
MnO	0.65	1.03	0.74	1.23	1.13	1.23	0.62	0.74	0.62	0.68	0.68	0.68	0.67	0.69	0.68	0.66	0.52	1.00	1.04	1.31	1.34	0.6	0.6	0.5		
TiO ₂	0.0001	0.003	0.004	0.80	0.23	0.41	--	0.0006	--	--	--	--	--	--	0.0002	0.001	--	0.01	0.01	0.01	0.01	--	--	--		
(ppm)**																										
Li	--	--	--	1.68	0.8	1.08	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
Sc	10.0	7.68	9.4	8.71	8.80	8.00	9.4	8.67	8.94	9.6	8.92	9.1	9.3	9.7	9.1	8.42	9.4	7.59	7.29	6.43	7.18	8.56	8.89	8.28		
Ti	1.37	20.5	42.4	6508	1865	3263	--	5.80	--	--	--	--	--	--	1.70	4.80	--	111	82.5	77.8	68.9	--	--	--		
V	2.33	108	12.4	344	312	506	0.4	15.7	6.74	0.8	2.63	0.6	1.05	0.6	5.98	25.3	0.4	62.6	266	142	136	11.0	8.46	0.3		
Cr	--	--	--	--	--	11.1	--	--	--	1.50	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1.65	--	--	1.11		
Co	--	0.1	0.3	--	0.1	--	--	--	--	--	0.2	0.2	0.2	0.2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
Zn	1.94	0.9	1.69	3.69	2.13	2.85	1.18	1.62	1.57	1.86	2.05	1.57	1.57	1.65	1.93	1.44	1.58	1.28	1.32	1.32	1.37	1.86	1.24	0.9		
Ga	33.8	18.6	27.1	15.8	19.1	15.8	27.3	25.9	36.5	23.7	16.0	19.2	17.7	16.0	27.3	23.4	46.3	20.6	22.5	14.7	15.1	42.5	32.3	46.1		
Ge	8.63	10	11.4	8.63	7.62	6.72	18.4	8.83	6.96	9	4.43	5.53	5.54	5.75	8.42	8.45	9	8.43	7.63	5.62	4.43	7.93	7.31	8.50		
Y	0.02	6.22	0.05	40.9	13.2	13.0	0.17	0.72	0.13	0.20	0.18	0.08	0.14	0.14	0.21	1.32	0.19	3.12	1.07	10.8	9.98	0.25	0.32	0.31		
Nb	0.005	0.2	0.005	41.6	4.34	1.54	--	0.0	--	--	--	--	--	--	--	0.0	--	0.2	0.0	0.2	0.1	--	--	--		
Zr	8.40	11.4	7.50	48.6	34.8	47.1	9.20	6.70	6.00	7.70	6.90	6.50	5.70	6.90	7.10	6.70	8.30	9.98	6.70	3.99	4.50	7.34	4.80	5.56		
La	0.14	--	0.03	--	0.004	0.003	0.01	0.08	0.05	0.13	0.11	0.19	0.11	0.10	0.05	0.05	0.003	--	0.01	0.003	--	0.09	0.01	0.02		
Ce	0.430	0.007	0.175	--	0.032	0.032	0.060	0.378	0.560	0.667	0.545	0.809	0.464	0.383	0.356	0.279	0.095	0.021	0.100	0.077	0.039	0.916	0.176	0.278		
Pr	0.04	--	0.03	--	0.02	0.04	0.01	0.08	0.16	0.13	0.07	0.09	0.07	0.07	0.08	0.07	0.05	--	0.05	0.04	0.04	0.29	0.06	0.10		
Nd	0.14	0.07	0.13	0.02	0.35	0.42	0.06	0.31	0.93	0.80	0.22	0.35	0.23	0.15	0.46	0.52	0.32	0.10	0.95	0.56	0.52	2.20	0.51	0.84		
Sm	--	0.15	--	0.04	0.47	0.60	0.02	0.09	0.10	0.13	0.03	--	0.05	0.01	0.11	0.22	0.14	0.10	0.82	0.81	0.73	0.44	0.10	0.18		
Eu	0.024	0.2	0.06	0.08	0.20	0.23	0.03	0.15	0.22	0.16	0.02	0.05	0.04	0.03	0.16	0.22	0.50	0.13	0.27	0.33	0.38	0.43	0.17	0.53		
Gd	--	0.56	--	0.37	1.16	1.47	0.01	0.14	0.05	0.06	0.05	0.03	0.02	0.03	0.08	0.26	0.05	0.26	0.88	1.75	1.43	0.17	0.06	0.03		
Tb	--	0.2	--	0.2	0.3	0.3	0.002	0.024	--	--	0.003	0.001	--	--	0.010	0.1	0.005	0.1	0.1	0.4	0.3	0.014	0.004	0.004		
Dy	--	1.27	0.005	3.10	2.01	2.14	0.02	0.1	--	0.029	0.016	0.014	0.008	0.024	0.025	0.2	0.017	0.5	0.3	2.05	1.96	0.015	0.029	0.020		
Ho	--	0.2	--	1.28	0.469	0.418	0.004	0.024	0.004	--	0.003	--	0.002	--	0.003	0.039	0.003	0.107	0.030	0.365	0.316	0.006	0.004	0.007		
Er	0.005	0.6	--	6.74	1.29	1.21	--	0.049	0.002	0.012	0.013	0.010	0.009	0.018	--	0.1	--	0.28	0.10	0.82	0.79	--	--	0.02		
Yb	--	0.53	0.013	14.7	1.36	1.19	0.016	0.025	--	0.016	--	--	--	--	0.011	0.080	0.018	0.23	0.04	0.53	0.52	0.02	0.01	0.01		
Lu	--	0.08	--	2.83	0.22	0.17	0.003	0.004	--	--	--	--	--	0.003	0.004	0.013	0.003	0.03	0.01	0.09	0.07	0.001	0.004	0.002		
Hf	--	0.05	--	2.08	0.87	1.08	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.13	--	--	--	--	--	--		
Ta	--	0.01	--	0.28	0.23	0.14	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.02	--	--	--	--	--	--		
Pb	0.03	0.04	0.07	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.03	--	0.06	0.05	0.04	0.07	0.07	0.08	0.05	0.05	0.05	0.04	0.09	--	--		
Th	--	0.079	0.011	--	0.234	0.568	--	0.027	0.072	0.021	0.013	--	--	0.001	0.056	0.207	0.022	0.019	0.3	0.713	0.461	0.155	0.018	0.024		
U	1.01	0.132	0.841	0.138	0.346	0.668	0.502	1.52	2.06	2.01	1.17	2.47	1.56	1.36	1.21	1.20	1.37	0.110	0.474	0.630	0.370	2.75	0.703	2.94		

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--" : Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

Anexo 6. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates de skarns

	DR01									SC01												SC02			
	G3 (B1)	G3 (B-C1)	G3 (B-C2)	G3 (C1)	G3 (C2)	G3 (C3)	G3 (B-C3)	G3 (B-C)	G3 (B2)	G1 (B1)	G1 (B-CG1)	(B-CG1)	(B-C3 G1 (C1)	G2 (B1)	G2 (B-CG2 (C)	G2 (B2)	G3 (B1)	G3 (B-CG3)	(B-C G3 (C1)	G3 (B-C3 G3 (B2)	Gm (1)				
(% peso)*																									
SiO ₂	35.1	33.9	33.8	34.1	33.6	33.9	33.4	33.5	33.9	34.3	34.8	34.0	34.6	34.3	34.7	34.6	34.3	34.2	34.3	34.0	33.9	34.2	34.3	34.7	34.0
Al ₂ O ₃	8.10	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	4.35	4.72	5.31	5.87	3.64	4.53	4.06	4.10	3.09	5.11	5.29	3.83	4.51	4.41	3.95	2.32
CaO	35.4	34.8	35.0	34.6	35.0	34.5	35.2	34.8	34.7	35.0	34.1	35.0	34.6	34.8	35.9	35.2	35.1	35.3	35.1	35.0	35.2	34.9	35.2	35.3	35.9
MgO	0.018	0.033	0.034	0.037	0.036	0.038	0.040	0.038	0.035	0.094	0.437	0.108	0.097	0.078	0.122	0.102	0.107	0.102	0.082	0.096	0.074	0.074	0.074	0.083	0.091
FeO	20.0	30.4	30.3	30.4	30.5	30.7	30.5	30.8	30.5	25.6	24.8	24.5	23.8	26.5	24.3	25.4	25.7	26.8	24.8	24.6	26.4	25.6	25.3	25.4	27.2
MnO	1.29	0.66	0.67	0.68	0.67	0.68	0.66	0.68	0.66	0.59	0.72	0.72	0.73	0.57	0.43	0.53	0.61	0.51	0.68	0.74	0.63	0.68	0.67	0.59	0.35
TiO ₂	0.01	0.001	0.0003	0.001	0.001	0.001	0.0004	0.0002	--	0.01	0.38	0.30	0.20	0.04	0.05	0.02	0.04	0.02	0.05	0.34	0.04	0.08	0.07	0.02	0.045
(ppm)**																									
Li	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1.0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Sc	7.34	8.73	9.1	8.68	9.1	9.5	9.1	9.3	9.2	7.70	7.15	6.85	6.97	7.18	7.40	7.32	7.02	7.69	6.85	6.84	6.92	6.60	6.37	6.74	7.47
Ti	122	6.70	3.40	9.2	5.23	5.10	4.60	1.74	--	131	3386	2570	1725	368	425	164	373	228	387	2830	302	696	582	166	415
V	221	5.46	4.65	7.58	4.61	3.70	3.30	2.27	1.47	260	506	456	512	324	86.6	273	72.7	208	419	487	382	487	421	306	119
Cr	--	--	--	--	--	--	0.9	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	2.26	--	--	--	--
Co	--	--	0.1	--	0.2	--	0.2	0.2	0.1	1.68	6.17	2.83	2.91	2.02	1.17	1.85	2.15	1.70	1.87	2.70	1.85	2.24	2.08	1.78	0.9
Zn	1.0	1.86	2.18	1.69	2.02	1.92	1.88	2.53	2.02	5.54	17.5	6.56	7.78	4.71	4.09	4.89	5.29	4.23	5.68	7.45	4.97	5.00	4.95	4.39	4.30
Ga	17.3	37.4	29.7	33.4	32.7	35.3	34.7	32.2	28.6	27.4	28.9	28.6	29.4	29.1	18.1	23.6	19.5	25.1	28.6	29.5	29.8	30.9	28.9	26.0	27.2
Ge	11.8	8.46	7.35	6.84	7.29	7.26	7.21	7.44	6.74	11.1	15.2	12.7	13.0	11.4	8.72	7.52	8.38	7.44	12.9	11.5	11.3	12.4	11.9	11.9	8.14
Y	18.4	0.01	--	0.01	0.01	0.01	--	--	--	0.56	185	88.2	57.1	4.25	36.4	50.3	30.0	114	10.4	89.5	4.04	11.5	10.2	4.95	32.9
Nb	1.56	--	--	0.002	--	--	0.002	--	--	5.75	93.5	168	153	28.8	32.9	11.3	57.6	5.63	45.8	149	11.7	52.8	67.4	24.7	1.64
Zr	26.9	6.58	7.30	6.37	8.10	9.20	6.20	8.20	6.30	5.90	26.0	13.7	9.30	8.70	10.4	8.90	10.2	39.8	6.30	20.2	8.00	7.00	6.10	6.10	27.2
La	--	0.02	0.05	0.04	0.04	0.17	0.13	0.12	0.04	20.5	11.4	11.8	13.8	21.8	13.6	20.0	12.5	18.7	16.0	10.6	18.2	16.0	17.5	21.6	4.76
Ce	0.004	0.208	0.181	0.285	0.265	0.382	0.379	0.338	0.194	126	75.6	80.0	91.2	132	74.9	130	85.9	122	103	72.6	117	104	110	128	36.1
Pr	--	0.02	0.02	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	22.5	15.3	15.5	17.4	23.3	12.2	24.5	14.4	22.2	19.6	14.3	22.0	20.0	20.8	23.2	9.95
Nd	0.03	0.08	0.05	0.19	0.12	0.09	0.12	0.05	0.06	89.5	74.3	73.7	87.4	94.2	45.3	98.1	47.7	79.6	89.9	72.2	98.7	99.60	96.6	100	59.9
Sm	0.05	--	--	--	--	--	--	--	0.01	8.61	18.5	18.3	21.5	10.9	4.63	9.07	3.79	6.24	16.0	19.0	12.9	19.7	15.8	13.1	9.65
Eu	0.19	0.015	0.008	0.020	0.019	0.015	0.016	0.015	0.009	8.27	9.2	8.66	10.2	8.56	2.34	6.01	2.12	4.72	9.5	8.67	9.9	11.1	10.4	9.5	6.22
Gd	0.54	--	--	--	--	--	--	--	--	2.85	23.8	19.8	21.6	4.65	4.11	5.19	3.18	6.16	11.1	20.1	5.21	11.9	8.90	5.48	5.24
Tb	0.2	--	--	--	--	--	--	--	--	0.13	4.47	3.12	2.83	0.3	0.6	0.7	0.4	1.20	1.02	3.06	0.3	1.14	0.8	0.3	0.7
Dy	2.23	--	--	--	--	--	--	--	--	0.16	27.9	16.2	13.4	0.7	3.53	4.51	2.80	8.88	3.82	17.0	0.9	3.91	2.79	1.0	4.00
Ho	0.638	--	--	--	--	--	--	--	--	0.02	6.33	3.34	2.19	0.1	0.8	1.19	0.7	2.53	0.4	3.34	0.1	0.4	0.4	0.2	0.9
Er	2.32	--	--	--	--	--	--	--	--	0.1	18.7	7.88	4.58	0.3	2.32	3.30	1.92	7.69	0.6	7.99	0.3	0.8	0.8	0.3	2.73
Yb	2.78	--	--	--	--	--	--	--	--	0.02	18.8	6.28	3.28	0.2	1.59	2.11	1.27	5.18	0.3	6.72	0.2	0.4	0.4	0.2	3.02
Lu	0.51	--	--	--	--	--	--	--	--	0.003	2.76	0.88	0.38	0.02	0.21	0.26	0.17	0.63	0.03	0.90	0.02	0.04	0.05	0.02	0.51
Hf	0.54	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.11	--	0.04	0.06	0.12	0.20	0.05	1.07	--	0.10	0.06	--	--	0.08	0.39
Ta	0.01	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1.18	0.33	0.16	0.04	0.72	0.27	0.56	0.61	0.01	0.59	0.06	0.03	0.07	0.07	0.14
Pb	--	--	--	0.05	0.07	0.06	--	0.03	--	1.35	0.18	0.10	0.07	0.06	0.28	0.09	0.10	0.24	0.23	0.09	0.07	0.06	0.07	0.11	0.09
Th	0.015	--	--	0.006	--	--	--	--	--	16.3	15.3	26.0	34.4	13.5	11.5	27.9	16.7	11.8	15.2	15.2	13.6	25.3	21.1	23.4	3.56
U	0.092	0.744	0.407	0.647	0.724	0.829	0.783	0.779	0.573	62.9	46.1	48.3	50.7	67.6	44.3	53.5	43.3	55.3	59.4	47.5	59.3	55.5	73.5	70.7	18.9

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--": Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

Anexo 6. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates de skarns

	SC02										GG-PC01												GV01			
	Gm (2)	Gm (3)	Gm (4)	Gm (5)	Gm (6)	Gm (7)	Gm (8)	Gm (9)	Gm (10)	G1 (B1)	G1 (B2)	G1 (B3)	G1 (B4)	G1 (B5)	G1 (B6)	G1 (B7)	G1 (B8)	G1 (B9)	G1 (B10)	G1 (B-C1)	G1 (C1)	G1 (C2)	G1 (C3)	G1 (C4)	G1 (B1)	G1 (B2)
(% peso)*																										
SiO ₂	33.9	33.8	33.5	33.4	33.3	34.0	33.6	33.5	33.7	35.1	35.0	34.4	34.0	35.3	35.4	35.5	35.5	34.5	35.1	34.4	34.8	35.0	35.0	35.1	36.6	37.2
Al ₂ O ₃	2.84	3.07	3.14	2.79	2.33	2.77	2.40	2.54	2.69	8.90	7.78	3.88	2.34	6.86	6.03	7.53	6.28	3.16	6.70	4.38	4.26	5.15	4.72	4.55	15.3	15.0
CaO	35.8	36.5	35.9	36.1	35.4	35.7	36.3	35.7	36.0	38.6	37.6	37.1	36.6	37.2	37.0	37.2	36.7	36.6	37.4	37.2	36.7	37.0	36.6	36.5	39.7	39.5
MgO	0.076	0.092	0.107	0.082	0.071	0.048	0.083	0.081	0.040	0.108	0.127	0.051	0.014	0.206	0.158	0.231	0.066	0.044	0.121	0.173	0.136	0.107	0.092	0.089	3.26	3.59
FeO	26.9	26.1	26.7	27.0	28.2	27.0	27.2	27.7	27.0	16.3	18.8	24.3	26.9	19.8	20.9	18.8	21.0	25.4	20.2	23.4	23.8	22.6	23.5	23.5	3.61	4.17
MnO	0.48	0.35	0.55	0.51	0.51	0.46	0.41	0.49	0.50	0.31	0.26	0.18	0.20	0.17	0.18	0.17	0.31	0.23	0.24	0.15	0.15	0.16	0.15	0.14	0.04	0.06
TiO ₂	0.0008	0.08	0.10	0.10	0.06	0.04	0.04	0.03	0.04	0.64	0.38	0.10	0.03	0.45	0.25	0.54	0.19	0.13	0.27	0.28	0.14	0.04	0.03	0.03	1.47	0.49
(ppm)**																										
Li	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.7	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1.50	0.9
Sc	6.91	8.94	7.83	7.44	6.65	6.32	6.82	6.38	6.49	8.29	9.1	6.55	6.91	15.4	14.9	20.3	7.16	6.96	12.0	11.4	7.62	7.46	7.39	7.26	13.2	9.5
Ti	6.50	662	823	866	529	343	335	252	339	4560	2961	852	263	3737	2246	4717	1666	1227	2320	2458	1319	381	294	286	11010	3395
V	385	168	288	332	395	200	428	225	185	90.2	86.6	54.3	61.9	162	141	141	50.8	61.7	79.9	71.8	75.7	135	158	162	354	242
Cr	--	7.01	2.35	3.58	27.3	--	2.19	3.13	3.74	3.65	2.60	--	--	21.0	15.6	20.6	--	--	14.1	4.41	--	--	--	--	64.5	8.62
Co	1.29	1.13	1.60	1.48	1.18	1.18	1.21	1.28	0.9	1.13	0.7	0.6	1.13	0.7	0.5	0.8	1.16	1.97	0.7	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	4.88	3.56
Zn	3.53	3.51	6.88	4.71	3.92	2.67	3.54	12.6	2.57	16.0	3.39	2.27	1.46	9.4	8.08	12.0	3.52	2.57	3.38	6.33	5.00	5.35	5.24	4.72	101	40.1
Ga	24.8	22.5	25.1	26.0	31.1	26.4	30.1	24.1	28.4	14.5	17.0	14.7	15.2	18.1	18.5	19.2	14.4	15.2	17.1	13.0	12.9	19.0	20.1	20.8	16.8	15.8
Ge	10.8	7.59	10.0	10.4	12.0	7.96	10	7.59	8.98	1	1.24	1.50	1.52	1.51	1.76	1.90	1.34	1.84	1.74	1.41	1.31	1.53	1.96	1.98	1.82	1.40
Y	0.18	39.1	50.2	41.9	32.7	15.4	40.6	12.6	21.9	21.2	14.3	3.03	3.07	15.5	9.39	15.9	5.07	7.28	9.37	7.66	2.71	0.60	0.44	0.48	118	62.0
Nb	0.9	1.68	2.04	2.67	6.49	1.33	1.76	0.8	3.72	2.87	1.70	0.9	1.97	3.64	1.40	6.95	2.70	3.23	2.42	1.36	0.5	2.05	2.68	2.68	2.03	2.93
Zr	6.00	32.8	38.2	29.9	10.4	9.80	14.6	11.2	10.7	79.2	57.9	10.1	5.60	71.4	52.8	88.7	19.3	27.7	45.5	40.4	6.00	4.27	4.40	6.00	115	63.7
La	24.3	5.69	8.58	10.2	15.5	8.36	10.6	12.0	5.67	0.75	2.26	5.56	4.57	6.62	7.22	5.65	1.51	3.14	2.77	12.4	11.0	10.3	10.0	10.5	486	342
Ce	138	40.0	53.6	65.9	97.5	63.2	70.7	77.7	44.2	10.9	25.4	42.6	41.0	55.0	44.1	47.6	16.4	28.8	28.0	62.9	46.5	74.0	79.7	84.3	504	350
Pr	23.9	8.59	10.8	12.4	17.4	13.4	14.4	14.8	10.1	3.39	6.17	8.05	8.68	10.8	8.80	9.17	3.97	6.31	6.28	7.69	6.87	13.9	15.4	16.3	64.4	42.2
Nd	102	40.9	51.3	52.3	65.8	57.6	60.8	61.3	47.4	18.9	28.6	29.5	33.6	40.5	32.8	35.6	17.1	25.4	25.3	25.4	27.1	49.4	53.5	57.9	212	131
Sm	9.93	5.90	8.11	7.92	6.96	6.36	8.84	6.26	6.71	4.19	4.76	3.28	3.58	5.09	3.47	4.83	2.39	2.60	3.55	3.04	3.66	3.29	3.12	3.13	29.6	16.3
Eu	10.1	3.50	5.31	4.97	4.95	4.77	5.03	5.17	4.47	1.35	2.07	1.60	2.18	2.58	2.05	2.09	1.05	1.42	1.74	1.43	1.54	2.95	3.19	3.29	9.3	5.14
Gd	2.83	4.44	5.59	6.86	4.80	4.23	5.91	3.55	4.58	4.36	3.78	2.08	2.00	4.21	2.71	3.78	2.05	2.17	2.76	2.50	1.99	1.34	1.21	1.24	26.0	13.3
Tb	0.115	0.6	0.9	0.9	0.6	0.4	0.8	0.4	0.5	0.67	0.47	0.18	0.22	0.54	0.32	0.50	0.24	0.26	0.30	0.25	0.16	0.07	0.06	0.06	3.10	1.60
Dy	0.123	4.03	5.38	5.59	3.75	2.31	4.87	1.81	2.75	3.57	2.51	0.6	0.8	2.70	1.86	2.67	1.10	1.29	1.75	1.29	0.59	0.16	0.13	0.13	16.3	8.00
Ho	0.016	1.0	1.31	1.25	0.9	0.5	1.22	0.3	0.6	0.81	0.52	0.10	0.13	0.52	0.34	0.55	0.17	0.26	0.34	0.25	0.10	0.02	0.01	0.02	2.90	1.54
Er	0.028	2.95	4.06	3.52	3.17	1.35	3.98	1.08	1.81	2.09	1.45	0.27	0.29	1.62	0.9	1.64	0.57	0.69	0.91	0.72	0.19	0.06	0.05	0.05	7.92	4.43
Yb	--	2.97	4.28	3.82	3.89	1.29	4.88	0.9	1.84	2.15	1.26	0.21	0.18	1.49	0.9	1.57	0.4	0.7	0.8	0.7	0.2	0.03	0.01	0.02	6.24	4.09
Lu	0.005	0.48	0.59	0.58	0.63	0.20	0.79	0.15	0.34	0.32	0.19	0.03	0.02	0.22	0.13	0.21	0.04	0.09	0.12	0.11	0.01	0.002	--	0.001	0.84	0.60
Hf	--	0.91	0.55	0.58	--	--	--	0.18	0.18	2.18	1.20	0.09	--	1.76	1.60	2.59	0.12	0.07	0.94	0.85	--	--	--	--	2.98	1.60
Ta	--	0.20	0.13	0.16	0.12	0.13	0.14	0.04	0.14	0.58	0.17	0.19	0.07	0.20	0.18	0.58	0.33	0.09	0.20	0.24	0.12	0.06	0.07	0.06	0.24	0.28
Pb	--	0.07	1.06	0.06	--	--	0.34	0.07	0.07	0.04	--	--	0.02	0.05	--	--	0.03	--	--	0.04	0.05	--	--	--	1.03	0.38
Th	9.780	5.43	6.95	6.18	7.21	5.67	7.75	5.85	5.12	0.193	0.399	0.993	1.38	1.27	1.24	1.20	0.557	2.74	0.562	2.42	1.88	1.75	1.84	2.05	16.4	0.84
U	68.9	14.7	22.6	28.9	38.7	11.6	21.0	29.1	11.6	1.30	1.69	2.28	1.67	4.10	2.90	4.73	0.913	1.68	2.68	8.52	5.36	4.08	4.66	4.92	44.1	16.6

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--": Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo

Anexo 6. Resultados de elementos mayores y traza por LA-ICPMS en granates de skarns

GV01							
	G1 (B3)	G1 (B4)	G1 (B-C1)	G2 (B)	G2 (B1)	G2 (B2)	G2 (B-C)
(% peso)*							
SiO ₂	37.1	37.0	37.5	37.6	37.4	37.3	37.7
Al ₂ O ₃	14.8	15.0	15.2	15.3	15.4	15.2	16.3
CaO	39.9	39.8	39.2	39.4	39.4	39.6	39.1
MgO	3.69	3.73	3.68	3.17	3.50	3.39	3.45
FeO	4.06	4.13	3.73	4.07	3.84	3.68	2.79
MnO	0.05	0.05	0.02	0.04	0.04	0.05	0.01
TiO ₂	0.44	0.32	0.67	0.41	0.42	0.70	0.66
(ppm)**							
Li	0.6	--	0.7	0.6	0.6	1.00	--
Sc	8.89	11.2	18.0	9.3	9.5	12.1	9.4
Ti	3018	2183	4540	2968	2908	4990	4393
V	255	246	87.4	142	208	306	26.8
Cr	3.32	9.1	50.7	7.20	5.11	8.30	25.3
Co	2.85	2.77	3.01	1.81	2.19	2.60	3.78
Zn	38.1	46.1	78.8	30.2	28.4	39.3	133
Ga	18.1	16.3	24.9	22.1	17.0	16.4	32.1
Ge	1.44	1.64	1.87	1.61	1.11	1.39	1.22
Y	72.0	77.0	51.4	60.2	53.4	90.8	8.93
Nb	3.99	5.02	2.09	1.89	3.55	3.74	0.6
Zr	52.4	101	117	33.8	52.6	89.4	69.8
La	312	257	151	169	164	406	5.23
Ce	303	260	181	212	162	403	5.79
Pr	37.3	35.1	25.7	30.3	19.9	50.1	0.81
Nd	116	115	93.3	105	64.2	159	3.39
Sm	14.6	14.6	13.0	15.3	8.59	20.6	0.77
Eu	5.04	4.98	3.68	4.48	3.15	6.72	0.3
Gd	13.0	12.9	10.9	12.9	7.91	18.0	0.94
Tb	1.51	1.60	1.32	1.54	1.04	2.15	0.2
Dy	8.49	8.49	7.00	8.38	6.17	11.7	1.12
Ho	1.63	1.72	1.27	1.54	1.22	2.11	0.2
Er	5.06	5.49	3.63	4.55	3.92	6.42	0.8
Yb	5.04	5.32	3.80	3.76	4.13	5.33	0.8
Lu	0.76	0.76	0.46	0.48	0.52	0.78	0.13
Hf	1.65	2.71	5.10	0.63	1.22	2.38	1.71
Ta	0.35	0.48	0.41	0.13	0.30	0.41	0.12
Pb	0.34	0.38	0.85	0.22	0.22	0.29	0.72
Th	0.55	0.59	0.79	0.172	0.106	1.29	0.207
U	14.0	13.7	5.59	13.2	11.3	26.5	0.393

* Elementos mayores normalizados a 100%

** Elementos con "--" : Debajo del límite de detección

B: Borde; N: Núcleo; B-C: Punto intermedio entre borde y núcleo