

ORIGEN DE LA ZONACIÓN EN GRANATES DE LA CHIMENEA LAS ÁNIMAS, ZIMAPÁN, HIDALGO, MÉXICO

María Guadalupe Villaseñor-Cabral¹, José Arturo Gómez-Caballero¹, Erik Condcliffe² y José Luis Medina de la Paz³

¹ Instituto de Geología, UNAM

Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510, D.F., México

Correo electrónico: mgvc@servidor.unam.mx

² Department of Earth Sciences, Leeds University, LS2 9JT, U.K

³ Compañía Fresnillo, Grupo Peñoles, México

RESUMEN

Los granates de una zona de *skarn* de la chimenea *Las Ánimas*, en el distrito minero de Zimapán, Hidalgo, presentan una zonación compleja definida primordialmente por franjas y campos de andradita y grosularia. Se hicieron 79 análisis puntuales con microsonda en varias muestras de granate para estudiar la variación en el contenido de aluminio y hierro. Se considera que la sucesión alternada en el depósito de hierro y aluminio en las moléculas de los granates es producida por episodios de infiltración de fluidos con concentraciones diferentes, existiendo variaciones en el pH de éstos debidas a cambios en la velocidad de reacción con el medio calcáreo ocasionados por la composición heterogénea de las calizas.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de zonación en minerales es un tema que ha atraído la atención de numerosos investigadores. Shore y Fowler (1996) consignan una tabla de minerales con zonación oscilatoria, en la que se incluye al granate. La anisotropía comúnmente presente en cristales con zonación de andradita y grosularia ha sido mencionada desde el siglo pasado; es común en cristales relativamente grandes de granates cálcicos, propios de los depósitos de *skarn*. Los granates han sido objetivo de numerosas investigaciones, tanto para explicar la anomalía óptica como para obtener información de los fluidos que los originaron. Akizuki (1984) incluye un resumen de los estudios efectuados sobre esfuerzos cogenacionales (ocurridos en el momento de generarse), sustitución de Al y Fe en diferentes zonas, y modalidad de crecimiento de los cristales (maclas en varios planos) y Jamteviet *et al.* (1995) estudiaron el proceso de zonación de granates.

El término *skarn* es utilizado en varios sentidos. En el presente trabajo se adopta la definición de Einaudi y Burt (1982) para nombrar a una roca formada por silicatos de calcio en carbonatos relativamente puros, principalmente granate y piroxeno, cuyo tamaño varía de 1 mm a varios centímetros. El *skarn* se forma por la infiltración y difusión de fluidos metasomáticos, formando zonas de distribución mineralógica diferente.

En la zona minera *El Carrizal*, del distrito minero de Zimapán, la chimenea *Las Ánimas* es uno de los cuerpos mineralizados más importantes; se localiza en la parte occidental del estado de Hidalgo, con coordenadas geográficas en 20°47'40"N y 99°26'50"W (Figura 1). De las varias chimeneas que existen en el distrito minero, ésta se encuentra asociada a una zona de *skarn* de 80 m de espesor. Esta zona se carac-

teriza por la presencia de granates, parte de los cuales presenta, tanto zonación oscilatoria como irregular.

En *El Carrizal*, las zonas de *skarn* guardan una relación probable con, por lo menos, un tipo de mineralización. Por ello, para comprender mejor el vínculo entre mineralización y alteración es útil estudiar minerales característicos que ayuden a identificar blancos de exploración.

El objetivo del presente estudio, que es parte de un proyecto de investigación acerca de la metalogénesis de Zimapán, fue estudiar por microsonda electrónica, la composición química de diferentes tipos de granate, para comprender el origen de la zonación y obtener información acerca de los fluidos metasomáticos. En el intrusivo *El Carrizal*, así como en el resto del distrito, hay varios tipos de *skarn* pero, para los objetivos de este estudio, sólo se analizaron los granates del exoskarn asociados con lentes de sulfuros en la mina *Las Ánimas*. Con fines comparativos, también se analizaron granates sin asociación con sulfuros en el interior y fuera de la mina.

MARCO GEOLÓGICO

ESTRATIGRAFÍA

Las rocas más antiguas expuestas en el área corresponden a la Fm. Las Trancas del Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Segerstrom, 1962; Carrillo-Martínez y Suter, 1982). En el área, esta Formación consiste en una caliza arcillosa de estratificación delgada con intercalaciones escasas de lutita laminar.

En aparente concordancia, sobreyace una secuencia de capas de caliza de la Fm. Tamaulipas Superior que muestra, tanto una estratificación delgada, como masiva (Carrillo-Martínez y

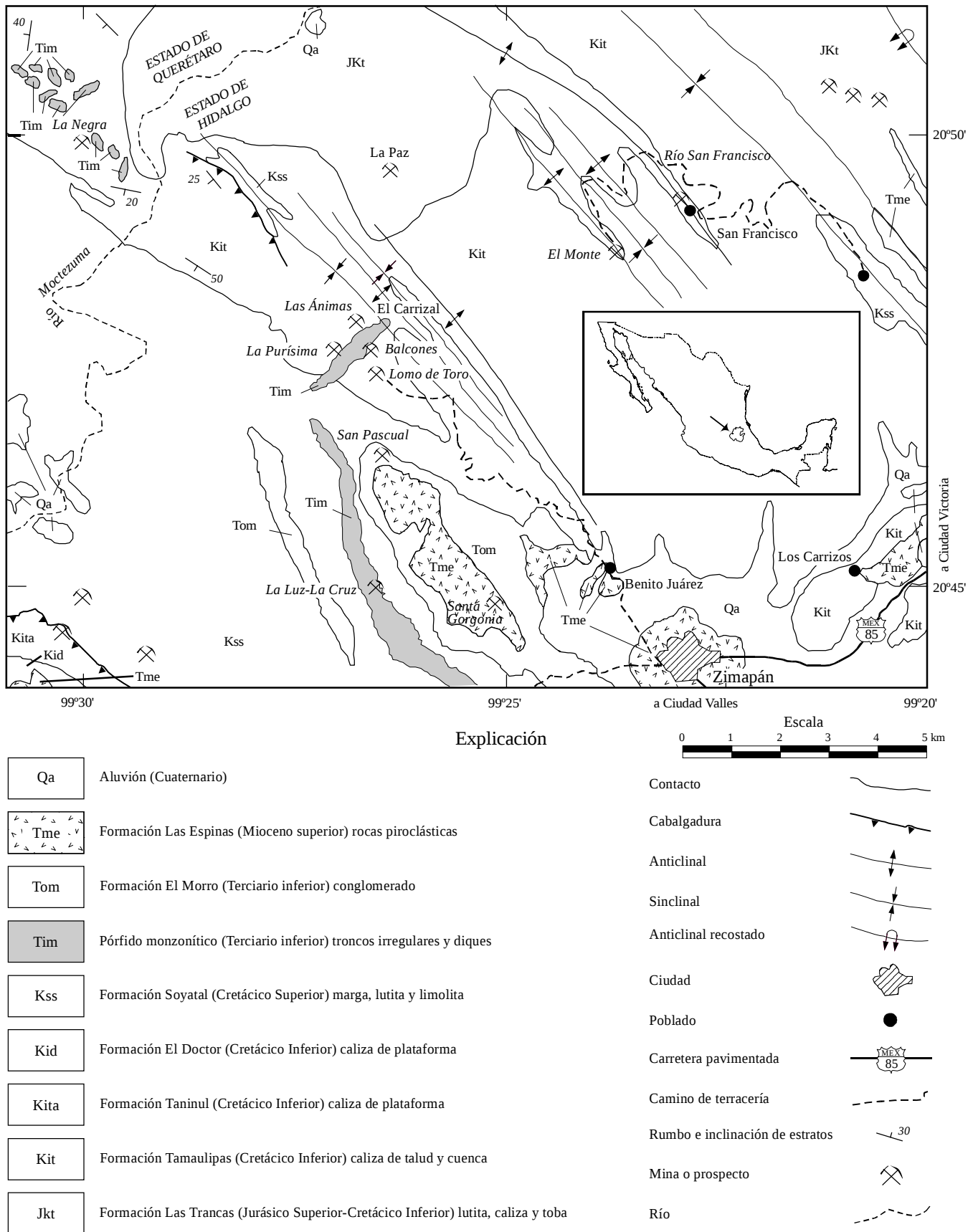


Figura 1. Mapa geológico regional del área de Zimapán, en el que se observa la localización de la mina Las Ánimas (tomado de Carrillo-Martínez, en prensa).

Suter, 1982). Esta Formación contiene capas, lentes y nódulos de pedernal negro, que en las inmediaciones de los cuerpos mineralizados cambia a gris claro y en ella están emplazados preferentemente los yacimientos minerales.

A la unidad anterior le sobreyace concordantemente una secuencia de capas de lutita interestratificada con estratos de caliza de la Fm. Soyatal del Cretácico Superior.

En la zona de estudio, las rocas cretácicas están cubiertas discordantemente por el conglomerado rojo del Grupo El Morro del Terciario inferior, al que, a su vez, en concordancia, le sobreyacen rocas volcánicas de la Formación Las Espinas del Mioceno (Simons y Mapes-Vázquez, 1956).

Tanto la secuencia mesozoica y, en menor medida, el Grupo El Morro, están intrusionados por troncos y diques de composición monzonítica con textura porfídica. En o cerca de los contactos con la caliza del Cretácico Inferior. La mayoría de los yacimientos minerales del distrito se localizan en o cerca de los contactos entre los intrusivos y las calizas de la Fm. Tamaulipas (Figuras 1 y 2).

ESTRUCTURA

El distrito se ubica en el flanco recostado del sinclinal La Paz-Vaquero que forma parte del anticlinorio El Piñón. El conjunto forma parte de los plegamientos de la Orogenia Laramide de la Sierra Madre Oriental, cuya vergencia es hacia el NE. Existe, al parecer, un control estructural de la mineralización, evidenciado por la asociación de los cuerpos mineralizados con diques, fallas y el plegamiento de los estratos de la caliza masiva.

YACIMIENTOS MINERALES

El distrito minero de Zimapán se encuentra en una franja mineralizada de yacimientos con características comunes. La franja incluye el cinturón de pliegues y cabalgaduras entre Zimapán y Chihuahua en México, hasta el distrito de Leadville, Colorado en E.U.A. (Megaw *et al.*, 1988; Titley, 1993). En el distrito se reconocen cuatro zonas mineralizadas: El Carrizal, El Monte, San Pascual-Santa Gorgonia y La Luz-La Cruz (Figura 1). En la zona El Carrizal existen varias minas, de las cuales, las más importantes son Las Ánimas y Lomo de Toro; esta última se conoce desde 1632. La primera está en las cercanías del intrusivo Carrizal; en ella se localiza la chimenea Las Ánimas, el cuerpo de mayor tonelaje en la zona, ya casi agotado. Este intrusivo es un tronco monzonítico de textura porfídica emplazado en calizas de la Fm. Tamaulipas Superior. Del tronco se desprenden numerosos diques de la misma composición predominantemente monzonítica. Además, en el área afloran varios diques cuyas composiciones varían de intermedia a félsica y su relación con el tronco no es clara.

Las estructuras mineralizadas de la zona El Carrizal consisten en vetas, mantos, depósitos de skarn y chimeneas. Las

vetas son cuerpos de reemplazamiento, así como de relleno de cavidades. Los mantos son generalmente de reemplazamiento y algunos de ellos contienen granates. Los depósitos de skarn son cuerpos mineralizados en la periferia de los intrusivos, y están asociados a la presencia de granate en la chimenea Las Ánimas. Las chimeneas son estructuras mineralizadas subverticales, de sección elíptica, cuya geometría está controlada por diques y fallas. En la mina Las Ánimas confluyen los cuatro tipos de depósitos.

La mineralogía de los sulfuros de la chimenea Las Ánimas es muy compleja. Los minerales más abundantes reportados son esfalerita, galena, pirita, pirrotita, arsenopirita, calcopirita, sulfosales de plomo y minerales del grupo de la tetrahedrita, así como numerosos minerales pequeños en cantidades muy escasas, como telururos y minerales de bismuto, así como estannita (Villaseñor-Cabral *et al.*, 1987; García-Sánchez y Querol-Suñé, 1988; Villaseñor-Cabral *et al.*, 1995).

Las muestras de granate estudiadas provienen de una zona de skarn que en el lado noroccidental limita a la chimenea (Figura 2). La forma de ésta es irregular entre la superficie y el nivel -22; de este último al nivel -140 evoluciona regularmente, tiene una sección elíptica elongada, cuyos ejes miden 100 y 25 m, y su altura aproximada es de 120 m. Se ubica en el límite entre un dique de pórfido monzonítico (*dique del Tiro*) y el tronco El Carrizal, de composición similar, en el extremo de una zona de skarn de hasta 80 m de espesor.

MÉTODO

La identificación de especies mineralógicas se realizó mediante análisis petrográficos de luz transmitida y luz reflejada, así como por difracción de rayos X en un difractómetro *Philips Pw1050*. El análisis de los granates se realizó con una microsonda electrónica *Jeol JXA-50*, con espectrómetro de energía dispersiva *Link 860-500*, en la Universidad de Leeds, Inglaterra, a 20 kV y 1 mA. Para el análisis se utilizó la línea espectral Ka de cada elemento. Los patrones utilizados fueron los siguientes: para Si y Ca, wolastonita; para Al, Al_2O_3 puro; para Ti, TiO_2 ; para Cr, cromo metálico; para Fe, hematita; para Mn, rodonita; para Mg, MgO; para Na, jadeita; para K, ortoclasa. El tiempo de conteo fue de 100 segundos.

Se eligieron siete muestras de granate para este estudio: cinco de ellas con mineralización colectadas en las zonas bajo minado (M58, M59, M61, M64 y M95); otra sin mineralización aparente en la misma mina (M62) y una más fuera de la mina, lejos de la mineralización, en la barranca del río Tolimán (M94). Las localidades de muestreo están indicadas en la Figura 2.

Se efectuaron 79 análisis puntuales cuyos resultados se presentan en la Tabla 1. En ella se presenta también el cálculo de la composición de los granates en función de minerales de composiciones extremas (*end-members*). La muestra M58 se analizó de manera aleatoria, con objeto de cubrir un mayor número

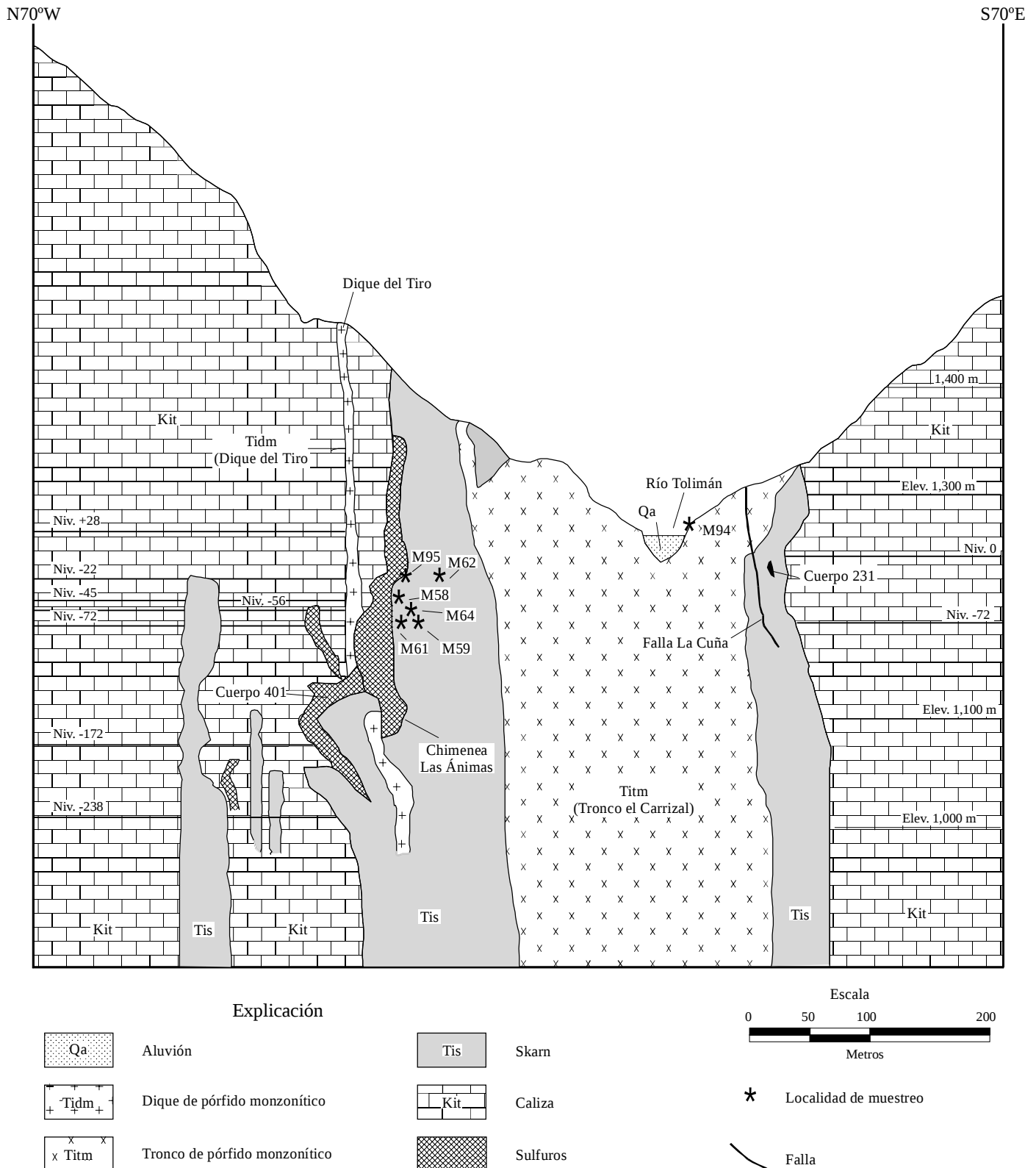


Figura 2. Sección geológica-estructural de parte del área El Carrizal con la ubicación de la mina Las Ánimas (tomado de la Compañía Fresnillo del Grupo Peñoles, Unidad El Monte).

de sitios de análisis. En la muestra M59 se hizo el análisis de centros y bordes en puntos de localización aleatoria. Las muestras M61 y M95 fueron estudiadas a lo largo de una línea en un cristal, analizando el centro y las capas sucesivas del borde. En

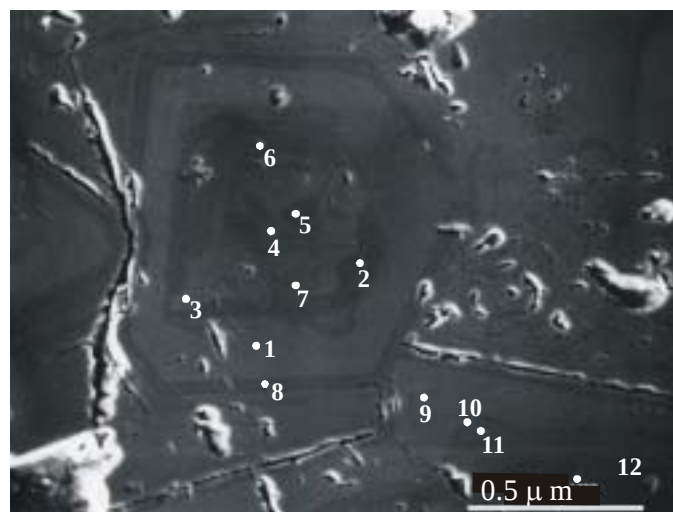
las muestras M62 y M94 (sin mineralización) también se hizo un análisis con distribución aleatoria y la M64 se analizó a lo largo de una línea.

MINERALOGÍA DEL SKARN

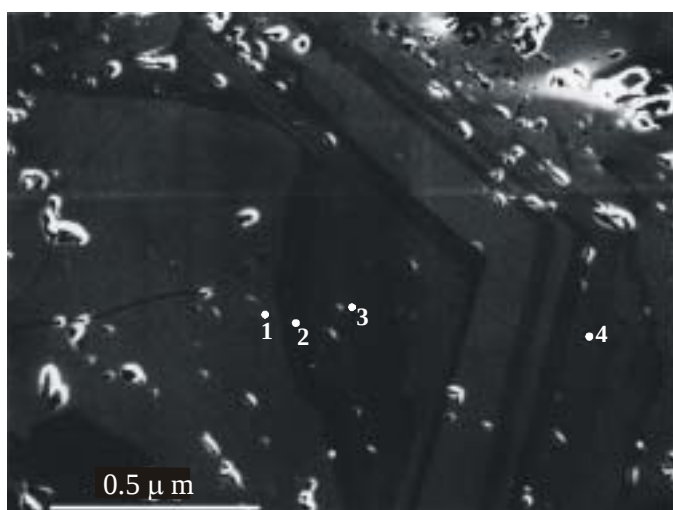
El skarn de Las Ánimas está compuesto principalmente por el granate *grandita* y piroxeno. Según estudios realizados por Zharikov (1970), quien establece una clasificación de skarns con base en la composición mineralógica, al de Las Ánimas le corresponde la facies cálcica. El skarn está constituido por un *endoskarn* y un *exoskarn*. El endoskarn de Las Ánimas, representado por el intrusivo alterado por metasomatismo, se caracteriza por una silicificación intensa representada por cuarzo sacaroides, granate y piroxeno. Hay alteración potásica intensa y plagioclasa abundante; ésta permite delimitar la zona de endoskarn. También se identificaron scheelita y algo de sulfuros y esfena en menor proporción.

El exoskarn está integrado por granate, que es el mineral más abundante del skarn y que consiste principalmente en andradita ($\text{Ca}_3\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]_3$) y grandita, ésta última formada por andradita y grosularia ($\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$), piroxeno (diópsido y un piroxeno de manganeso no identificado), vesubianita, escapolita, cuarzo, calcita, fluorita, damburita, sulfuros y sulfosales. Así mismo, se observan tremolita-actinolita y epidota (minerales característicos de skarn retrógrado), wolastonita principalmente reemplazando pedernal, talco escaso en algunas partes y caolinita en otras. Se desarrolla también una zona de mármol con escapolita. Este último mineral no se había reportado en otros estudios donde se presenta la relación entre los minerales (Simons y Mapes, 1956; García y Querol, 1988; Villaseñor-Cabral *et al.*, 1987).

Los granates aquí estudiados provienen del exoskarn (Figura 2). Pertenecen a dos generaciones claramente diferenciables entre sí. La primera generación corresponde a la etapa de skarn temprano y la segunda a la etapa de skarn tardío, predominando la segunda sobre la primera. Los granates de la etapa de skarn temprano son, en general, euedrales en forma de cristales dodecaedrales constituidos por un núcleo rodeado por un borde formado por un gran número de capas dodecaedrales concéntricas, que son zonas de crecimiento sucesivo notables a simple vista. Los granates de la etapa de skarn tardío constituyen masas anedrales. Su color oscila entre pardo amarillento y verde. En lámina delgada los granates anisotrópicos son birrefringentes, que es una anomalía óptica común en granates de zonas mineralizadas. Las zonas anisotrópicas muestran birrefringencia de 1° y 2° orden, corresponden a granates generalmente con más del 10% de la molécula de grosularia y forman las zonas oscuras de los granates con zonación. Los granates isotrópicos contienen más del 90% de la molécula de andradita, corresponden a las zonas claras de los núcleos y de los bordes de los granates con zonación a granates pequeños de la etapa de skarn tardío. La textura es porfidoblástica. Al microscopio electrónico destaca la zonación irregular en los centros de los cristales (Figuras 3a, b) y la oscilatoria en los bordes (Figura 3b).



a



b

Figura 3. Imágenes de electrones retrodispersados que muestran la zonación, irregular en los núcleos y oscilatoria en los bordes de granates, así como la localización de puntos analizados en la muestra M61 (los resultados están consignados en la Tabla 1). a) Análisis puntuales al azar, b) Análisis puntuales en línea.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el diagrama de distribución de frecuencias se observa que existen por lo menos tres poblaciones de grosularia (Figura 4). Dado que la composición dominante es de andradita y grosularia con cantidades poco significativas del resto de las especies del grupo del granate, la composición se expresará en porcentaje de andradita, mientras que el porcentaje de grosularia será el complemento a 100%. La población que predomina es la de aluminio de 0 a 2% (Adr_{100-88}) y está representada por parte del núcleo y por bandas dodecaedrales del borde. La población intermedia es de 2 a 4% de aluminio (Adr_{88-78}) y corresponde a las bandas oscuras del borde (Figura 3). La población alta en aluminio varía de 4 a 10% (Adr_{78-52}) y corresponde a los sectores oscuros irregulares del centro de los cristales (Figura 3).

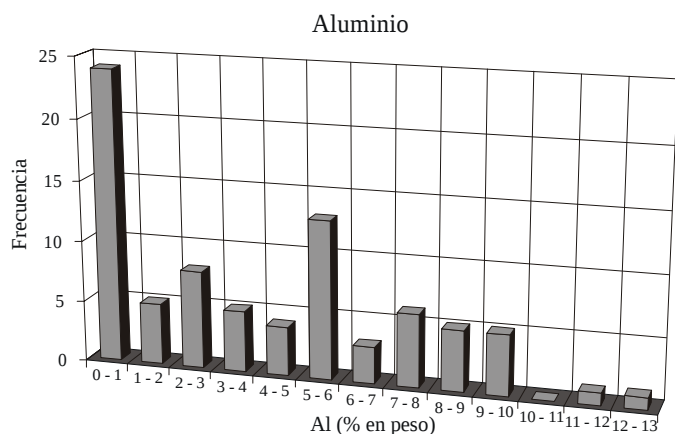


Figura 4. Histograma de la distribución de frecuencias del contenido de aluminio en granate de los 79 análisis puntuales.

De acuerdo con los 79 análisis puntuales efectuados mediante microsonda, en la Figura 5 se aprecia la variación en el contenido de hierro y aluminio en cada muestra. Se puede ver un predominio considerable de los campos de andradita, alternantes con algunos donde predomina la grosularia, excepto en la muestra M95, en la que la grosularia es poco significativa. Este hecho puede deberse a que, mientras que el resto de las muestras corresponde a las zonas de skarn, la muestra M95 está tomada en un pequeño lente de skarn, localizado dentro del cuerpo de sulfuros que constituye la chimenea Las Ánimas. De las relaciones texturales entre granates y sulfuros se deduce que la génesis del skarn es anterior a la mineralización económica (Figura 6). Por otra parte, en la muestra M94 se aprecia el comportamiento inverso; es decir, con predominio de la grosularia, lo que puede deberse a que esta muestra se tomó en la barranca del Río Tolimán, fuera de la mina, donde no hay presencia de sulfuros.

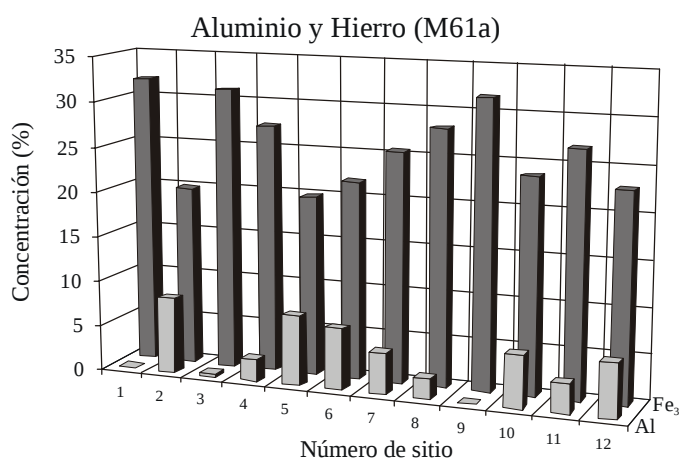


Figura 5. Diagramas de barras por muestra que representan la concentración de Fe y Al en los 79 sitios del análisis puntual.

Otro aspecto observado en los análisis de granate consignados en la Tabla 1, es que en la zona de sulfuros el granate dominante es la *grandita* con más de 98% de andradita (Figura

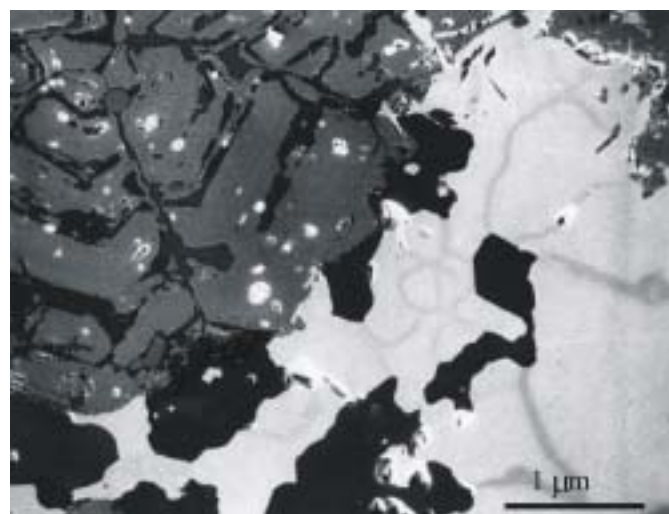


Figura 6. Imagen de electrones secundarios de una superficie pulida de un lente de sulfuros encajonado en el skarn de granate. Se aprecia que los sulfuros (áreas claras) son posteriores al granate (áreas grises). Las áreas más oscuras corresponden a cuarzo y calcita. El sulfuro predominante es esfalerita.

5, muestra 95). En otras zonas hay una gran variedad en la composición del granate, que varía desde andradita 97% hasta grosularia 52%. Estos datos se expresan como moléculas extremas de tales composiciones. La mayoría de los granates analizados contienen además un núcleo de andradita, aunque en ocasiones también el borde es de andradita y más raramente la grosularia es dominante.

Numerosos investigadores han emprendido el estudio de minerales de zonación oscilatoria, sobre todo como criterio para determinar características del fluido que les dio origen. Yardley *et al.* (1991) suponen que tal zonación constituye un criterio de identificación de procesos de infiltración y, por lo tanto, de metasomatismo. Jamtveit *et al.* (1993) opinan que el estudio de la zonación mediante perfiles de contenido de elementos mayoritarios y *traza* por microsonda electrónica permite coleccionar la evolución de sistemas hidrotermales. Jamtveit y Hervig (1994) infieren un proceso de infiltración debido principalmente a deformación frágil. Por medio de ecuaciones de equilibrio y estudios cinéticos, Jamtveit *et al.* (1995) deducen que el proceso principal en la génesis de esos granates con zonación es un proceso de infiltración. Para explicar esa zonación hacen consideraciones termodinámicas y cinéticas. Respecto a la fluctuación en el depósito de hierro o aluminio en el granate a partir de los fluidos que dieron origen al skarn, los mismos autores establecen que se debe a que la partición de Al-Fe entre granate y el líquido es muy sensible a variaciones en la temperatura, fugacidad de oxígeno, pH y salinidad. También mencionan que la ebullición del fluido produce un incremento en las condiciones de oxidación y en el pH al pasar el CO₂ y las especies en estado reducido, como H₂ y H₂S, a la fase de vapor.

Con referencia a la zonación de los granates, la oscilatoria es semejante a la reportada por numerosos investigadores para granates de zonas mineralizadas generadas por metamorfismo

Tabla 1. Composición química (porcentaje en peso de óxidos) y mineralógica (porcentaje de los miembros finales de la serie del granate) de los 79 sitios del análisis puntual por microsonda electrónica. Abreviaturas: Uvr, uvarovita; Adr, andradita; Prp, piropo; Sps, espesartita; Grs, grosularia; Alm, almandino.

Muestra/Comp.		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Total	Uvr	Adr	Prp	Sps	Grs	Alm
Muestra 58	1	35.86	0.01	4.60	0.04	25.02	0.06	0.28	0.03	34.29	100.19	0.1	78.7	0.1	0.7	20.4	0.0
	2	36.92	0.01	8.41	0.07	19.52	0.03	0.35	0.00	35.29	100.60	0.2	59.6	0.0	0.8	39.3	0.0
	3	36.10	0.00	4.87	0.06	24.66	0.02	0.19	0.00	34.25	100.15	0.2	77.1	0.0	0.5	22.2	0.0
	4	36.11	0.05	5.87	0.03	22.88	0.04	0.11	0.00	34.36	99.45	0.1	71.3	0.0	0.3	28.2	0.0
	5	35.82	0.00	5.00	0.00	24.59	0.00	0.26	0.09	34.33	100.09	0.0	77.5	0.4	0.6	21.5	0.0
	6	36.12	0.00	6.48	0.05	21.80	0.05	0.25	0.00	34.41	99.16	0.2	68.1	0.0	0.6	31.1	0.0
	7	36.36	0.08	5.86	0.02	23.16	0.01	0.24	0.00	34.94	100.67	0.1	71.6	0.0	0.6	27.6	0.0
	8	34.60	0.00	0.14	0.12	30.74	0.05	0.18	0.32	33.15	99.30	0.4	99.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Muestra 59	1	34.91	0.00	0.19	0.02	31.31	0.31	0.26	0.19	32.31	99.50	0.1	99.1	0.8	0.0	0.0	0.0
	2	35.60	0.00	2.67	0.03	27.52	0.20	0.67	0.00	32.66	99.35	0.1	87.3	0.0	1.6	11.0	0.0
	3	35.33	0.00	0.19	0.00	31.03	0.27	0.51	0.02	32.33	99.68	0.0	99.0	0.1	0.9	0.0	0.0
	4	35.46	0.00	0.11	0.00	31.24	0.01	0.52	0.04	32.94	100.32	0.0	99.5	0.2	0.4	0.0	0.0
	5	35.66	0.05	1.91	0.03	28.52	0.05	0.82	0.24	32.90	100.18	0.1	90.4	1.0	2.0	6.5	0.0
	6	35.93	0.00	0.41	0.05	30.88	0.02	0.27	0.10	32.33	99.99	0.2	98.7	0.4	0.7	0.0	0.0
	7	35.73	0.00	0.47	0.08	30.81	0.25	0.63	0.00	32.37	100.34	0.3	97.7	0.0	1.5	0.0	0.6
	8	35.96	0.00	1.65	0.07	28.95	0.04	0.63	0.00	32.65	99.95	0.2	91.9	0.0	1.5	6.2	0.1
	9	35.50	0.00	0.13	0.00	31.24	0.03	0.26	0.00	32.97	100.13	0.0	99.3	0.0	0.6	0.0	0.0
	10	37.11	0.00	9.44	0.08	18.44	0.45	0.51	0.00	34.17	100.20	0.2	56.1	0.0	1.2	42.3	0.2
	11	34.75	0.02	0.23	0.00	31.24	0.04	1.20	0.09	31.87	99.44	0.0	98.8	0.4	0.8	0.0	0.0
	12	36.57	0.24	9.46	0.07	18.30	0.03	0.44	0.16	34.28	99.55	0.2	55.7	0.6	1.0	41.9	0.0
	13	35.30	0.00	0.07	0.00	31.03	0.05	0.41	0.30	32.19	99.35	0.0	99.7	0.3	0.0	0.0	0.0
	14	34.93	0.00	0.24	0.00	31.24	0.03	1.01	0.19	31.91	99.55	0.0	98.8	0.8	0.4	0.0	0.0
	15	37.24	0.07	12.10	0.04	15.08	0.36	0.35	0.18	34.66	100.08	0.1	45.5	0.7	0.8	52.7	0.0
	16	37.23	0.37	11.31	0.04	15.01	0.06	1.00	0.00	34.17	99.19	0.1	45.8	0.0	2.3	51.8	0.0
	17	36.45	0.02	5.81	0.01	23.45	0.70	0.12	0.11	33.40	100.07	0.0	72.5	0.4	0.3	25.5	1.1
Muestra 61A	1	35.22	0.01	0.00	0.04	31.95	0.46	0.28	0.00	32.81	100.77	0.1	99.9	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	36.74	0.23	8.46	0.10	19.94	0.06	0.48	0.10	34.22	100.33	0.3	60.5	0.4	1.1	35.2	0.0
	3	35.44	0.00	0.34	0.13	31.17	0.51	0.44	0.03	32.55	100.61	0.4	97.9	0.1	1.1	0.0	0.4
	4	35.35	0.09	2.48	0.08	27.45	0.00	0.69	0.28	33.14	99.56	0.0	87.4	1.2	1.6	9.6	0.0
	5	36.30	1.10	7.76	0.00	19.87	0.06	0.98	0.00	33.25	99.32	0.0	62.1	0.0	2.3	35.6	0.0
	6	36.85	0.03	6.82	0.10	21.87	0.47	0.19	0.00	33.83	100.16	0.3	67.1	0.0	0.4	31.1	1.1
	7	36.50	0.09	4.62	0.10	25.38	0.76	0.26	0.14	33.33	101.18	0.3	78.2	0.6	0.6	19.0	1.2
	8	35.78	0.05	2.27	0.02	28.17	0.20	0.27	0.00	33.05	99.81	0.1	88.7	0.0	0.6	10.1	0.5
	9	34.47	0.01	0.00	0.12	31.67	0.17	0.31	0.00	32.55	99.30	0.4	99.6	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	36.39	0.12	5.86	0.01	23.66	0.75	0.26	0.04	33.56	100.65	0.0	73.0	0.2	0.6	25.3	0.7
	11	36.16	0.02	3.35	0.13	26.81	0.63	0.27	0.00	33.11	100.48	0.4	83.6	0.0	0.6	14.0	1.3
	12	36.62	0.15	5.95	0.18	22.80	0.33	0.04	0.00	33.84	99.91	0.6	70.6	0.0	0.1	28.3	0.5
Muestra 61B	1	35.23	0.00	0.00	0.15	31.53	0.27	0.52	0.12	32.41	100.23	0.5	99.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	36.61	0.10	7.69	0.00	20.87	0.36	0.57	0.00	33.80	100.00	0.0	64.0	0.0	1.3	34.5	0.0
	3	36.35	0.00	5.29	0.00	24.31	0.34	0.28	0.00	33.68	100.25	0.0	75.5	0.0	0.6	23.8	0.1
	4	35.44	0.06	2.02	0.09	28.67	0.39	0.41	0.03	32.70	99.81	0.0	91.0	0.1	1.0	7.2	0.2
Muestra 62	1	35.59	0.00	0.56	0.00	30.24	0.05	0.12	0.35	32.96	99.87	0.0	97.2	1.5	0.3	1.0	0.0
	2	36.23	0.00	5.09	0.05	24.09	0.08	0.02	0.11	33.60	99.27	0.1	75.0	0.5	0.0	24.2	0.1
	3	35.52	0.00	0.61	0.07	30.24	0.00	0.14	0.55	32.79	99.92	0.2	96.7	2.3	0.3	0.40	0.0
	4	36.72	0.00	6.40	0.02	23.09	0.14	0.21	0.29	33.92	100.79	0.1	71.0	1.2	0.5	27.3	0.0
	5	35.86	0.03	3.48	0.10	26.31	0.05	0.11	0.20	33.23	99.37	0.3	82.7	0.8	0.3	15.8	0.0
	6	36.90	0.49	8.20	0.04	19.87	0.01	0.25	0.21	34.12	100.09	0.1	60.4	0.9	0.6	37.8	0.0
	7	37.24	0.56	9.58	0.00	18.16	0.26	0.24	0.16	34.37	100.57	0.0	54.2	0.6	0.5	43.6	0.5
	8	35.75	0.00	2.65	0.00	27.24	0.02	0.13	0.01	33.57	99.37	0.0	86.8	0.0	0.3	12.9	0.0
	9	36.89	0.12	8.69	0.01	19.73	0.55	0.35	0.10	33.98	100.42	0.0	60.0	0.4	0.8	38.2	0.3
	10	36.19	0.00	3.60	0.03	25.95	0.01	0.34	0.00	33.54	99.66	0.1	82.1	0.0	0.8	17.0	0.0
	11	37.69	0.31	9.98	0.03	17.37	0.08	0.31	0.00	34.64	100.41	0.1	52.6	0.0	0.7	46.6	0.0
	12	36.54	0.00	5.08	0.06	24.38	0.18	0.26	0.11	33.58	100.19	0.2	75.4	0.5	0.6	23.0	0.4
Muestra 64	1	36.87	0.00	8.06	0.00	20.02	0.03	0.32	0.23	34.36	99.89	0.0	61.3	0.9	0.7	37.0	0.0
	2	36.93	0.05	9.04	0.06	19.02	0.15	0.18	0.28	34.19	99.90	0.2	57.9	1.1	0.4	40.2	0.0
	3	37.08	0.14	7.84	0.06	20.44	0.17	0.21	0.05	34.21	100.20	0.2	62.4	0.2	0.5	36.5	0.2
	4	37.10	0.14	7.40	0.00	21.23	0.21	0.15	0.00	34.30	100.53	0.0	64.7	0.0	0.4	34.5	0.4
	5	37.12	0.03	7.19	0.03	20.95	0.03	0.17	0.21	34.17	99.90	0.1	65.0	0.9	0.4	33.7	0.0
	6	35.81	0.00	1.44	0.03	29.74	0.20	0.78	0.28	32.44	100.72	0.1	93.7	1.2	1.9	3.2	0.0
	7	36.22	0.00	7.93	0.00	20.37	0.06	0.15	0.01	34.27	99.01	0.0	63.5	0.1	0.4	36.1	0.0
	8	36.03	0.03	2.80	0.02	27.67	0.04	0.24	0.00	33.57	100.40	0.1	86.5	0.0	0.6	12.8	0.0
	9	35.28	0.00	0.16	0.04	31.24	0.04	0.41	0.09	32.73	99.99	0.1	99.3	0.4	0.2	0.0	0.0
	10	35.11	0.02	0.23	0.08	31.10	0.05	0.51	0.22	32.99	100.31	0.3	99.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Muestra 94	1	38.43	0.34	16.51	0.17	7.72	0.01	0.23	0.14	36.77	100.32	0.5	22.9	0.5	0.5	75.6	0.0
	2	38.13	0.56	16.05	0.07	8.22	0.04	0.16	0.04	37.03	100.30	0.2	24.6	0.2	0.4	74.7	0.0
	3	37.67	0.45	14.32	0.00	10.79	0.03	0.26	0.12	36.59	100.23	0.0	32.5	0.5	0.6	66.4	0.0
	4	37.84	0.43	15.21	0.04	8.94	0.05	0.44	0.03	36.44	99.42	0.1	27.2	0.1	1.0	71.5	0.0
	5	38.29	0.24	16.37	0.01	7.93	0.05	0.38	0.04	36.78	100.09	0.0	23.6	0.2	0.8	75.3	0.0
	6	38.27	0.26	16.28	0.01	8.51	0.03	0.17	0.15	36.65	100.33	0.0	24.7	0.6	0.4	74.0	0.0
Muestra 95	1	34.21															

de contacto y metasomatismo. La irregular es sumamente compleja. Para una mejor interpretación de las imágenes de la Figura 3 serían necesarias técnicas más sofisticadas, como el método de fractales, aplicado por Holten *et al.* (1997) para estudiar la zonación en minerales diversos.

CONCLUSIÓN

En el skarn de Las Ánimas, la zonación en los granates es producida por cambios en el contenido de hierro (andradita) y de aluminio (grosularia) que originan zonas con predominio alternado de andradita y de andradita-grosularia (grandita). Esta zonación se debe a cambios en las condiciones fisicoquímicas de los fluidos metasomáticos, quizá debidos a un proceso de evolución compleja que propicia cambios en las condiciones de fugacidad de oxígeno y de dióxido de carbono. En la chimenea de Las Ánimas, la alta fugacidad de oxígeno ocasionó la formación de andradita, mientras que el piroxeno, que requiere condiciones menos oxidantes, es escaso, en un régimen principalmente de infiltración (Yardley, 1991). Se considera que la zonación en los granates es producida por variaciones oscilatorias en el pH de los fluidos debido a cambios en la velocidad de reacción con la caliza, ocasionados por la heterogeneidad en la composición de la misma.

AGRADECIMIENTOS

Se reconoce profundamente al personal de la Unidad El Monte, de la Compañía Fresnillo, S.A. de C.V., del Grupo Peñoles, por la generosa ayuda brindada y por permitir el acceso a la mina y la publicación del presente estudio; en particular al Ing. Fernando Nieto, por el apoyo logístico, y al Sr. Miguel Trejo, por su auxilio en el trabajo de campo.

Se agradece al Dr. George Hornung, por permitir el trabajo analítico en la Universidad de Leeds, Inglaterra, y a la Sra. Ann Westbrook, por la preparación de las láminas delgadas pulidas.

Los autores están en deuda con los árbitros, Héctor Romero Espejel y un anónimo, por la detallada revisión hecha al manuscrito, lo que contribuyó sustancialmente a mejorar el artículo.

REFERENCIAS

- Akizuki, M., 1984, Origin of optical variations in grossular-andradite garnet: *American Mineralogist*, v. 69, p.328–338.
- Carrillo-Martínez, M., y Suter, M., 1982, Tectónica de los alrededores de Zimapán, Hidalgo y Querétaro, En: *in* Alcayde, Magdalena, y de Cserna, Zoltan, eds., Libro guía de la excursión geológica a la región de Zimapán y áreas circundantes, estados de Hidalgo y Querétaro: Sociedad Geológica Mexicana, Sexta Convención Geológica Nacional, p. 1–20.
- Carrillo-Martínez, M., en prensa, Hoja Zimapán, con Resumen de la geología de la hoja Zimapán, estado de Hidalgo: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, escala 1:100,000, mapa con texto explicativo.
- Einaudi, M.T., and Burt, D.M., 1982, Introduction—terminology, classification, and composition of skarn deposits, *Economic Geology*, v. 77, núm. 4, p. 745–754.
- Einaudi, M.T., Meinert, M.D., and Newberry, R.J., 1981, Skarn deposits: *Economic Geology*, 75 Anniversary volume, p. 317–391.
- García-Sánchez, G., y Querol-Suñé, F., 1988, Descripción de algunos yacimientos del distrito de Zimapán, Hgo., En: G.P. Salas, editor, *Geología Económica de México: México, D.F., Fondo de Cultura Económica*, p. 383–400.
- Holten, T., Jamteveit, B., Meakin, P., Cortini, M., Blunfy, J., and Austrheim, H., 1997, Statistical characteristics and origin of oscillatory zoning in crystals: *American Mineralogist*, v. 82, p. 596–606.
- Jamteveit, B., and Hervig, R.L., 1994, Constraints on transport and kinetics in hydrothermal systems from zoned garnet crystals: *Science*, v. 263, p. 505–508.
- Jamteveit, B., Ragnarsdottir, K.V., and Wood, B.J., 1995, On the origin of zoned grossular-andradite garnets in hydrothermal systems: *European Journal of Mineralogy*, p. 1399–1410.
- Jamteveit, B., Wogelius, R.A., and Fraser, D.G., 1993, Zonation patterns of skarn garnets—records of hydrothermal system evolution: *Geology*, v. 21, p. 113–116.
- Megaw, P.K., Ruiz, J. and Titley, S.R., 1988, High temperature, carbonate hosted Ag-Pb-Zn (Cu) deposits of northern Mexico: *Economic Geology*, v. 83, p. 1856–1885.
- Segerstrom, K., 1962, Geology of south-central Hidalgo and northeastern Mexico, Mexico: U.S. Geological Survey Bulletin 1104-C, p. 87–162.
- Shore, M., and Fowler, A.D., Oscillatory zoning in minerals—a common phenomenon, En R. Mason and R.F., Eds., *Origin and significance of zoning in minerals: Canadian Mineralogist*, v. 34, pte. 6, p. 1111–1126.
- Simons, F.S. and Mapes-Vázquez, E., 1956, Geology and ore deposits of the Zimapán mining district, State of Hidalgo, Mexico: U.S. Geological Survey Professional Paper 284, 128 p.
- Titley, S.R., 1993, Characteristics of high temperature, carbonate hosted massive sulfide ores in the United States, Mexico and Peru, En R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.Y. Thorpe and J.M. Duke, Eds., *Mineral deposit modeling: Geological Association of Canada Special Paper 40*, p. 585–614.
- Villaseñor-Cabral, M.G., Gómez-Caballero, J.A., Medina de la Paz, J.L., y Lozano-Santa Cruz, R., 1987, Boulangerita de la chimenea Las Ánimas, Zimapán, Hidalgo—mineralogía y metalogenia: *Boletín de Mineralogía*, v. 3, n. 1, p. 1–30.

- Villaseñor-Cabral, M.G., Gómez-Caballero, J.A., Avendaño, S., Reyes-Salas, A.M. e Islas-Cortez, V.M., 1995, Minerales argentíferos de Zimapán, Hidalgo: Actas INAGEQ, v. 1, p. 123–127.
- Yardley, B.W.D., Rochelle, B. and Lloyd, G.E., 1991, Oscillatory zoning in minerals—an indicator of infiltration metasomatism: Mineralogical Magazine, v. 55, p. 357–365.
- Yta, M., 1995, Contribución al modelo metalogenético Zimapán, Hidalgo: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Vigésima Convención Nacional, Memoria (sin págs.).
- Zharikov, V.A., 1970, Skarns, parts 1, 2, 3: International Geological Review, v. 12, nos. 5, 6, 7, p. 541–559, 619–647, 760–775.