

ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA DE LA CIRCULACIÓN HIDROTERMAL EN GRANITOS MINERALIZADOS DEL ÁREA DE SAN RAFAEL (SISTEMA CENTRAL ESPAÑOL)

E. García García, E. Vindel Catena, J. A. López García

Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España. (e-mail: eugarcia@eucmax.sim.ucm.es; evindel@eucmax.sim.ucm.es; jangel@eucmax.sim.ucm.es)

Resumen: Se describe la puesta a punto de una nueva metodología que permite describir la geometría de la migración de los fluidos a través de granitos a partir del estudio estadístico de los planos de inclusiones fluidas (FIP). Así mismo, se ha realizado el análisis fisicoquímico de los fluidos atrapados en los diferentes FIP. Para llevarlo a cabo se ha seleccionado un macizo granítico con filones mineralizados con wolframita (San Rafael, Segovia), que se considera representativo. Se han identificado los siguientes tipos de fluidos: (i) fluidos acuosos hipersalinos, localizados exclusivamente en la zona de greisen que rodea a los filones mineralizados. Se orientan preferentemente $N50^\circ \pm 15^\circ E$; (ii) fluidos acuosos-carbónicos de probable origen metamórfico que están ligados a la mineralización. Se encuentran atrapados en FIP con direcciones de baja salinidad ($H_2O-NaCl$). Los FIP que contienen a tales fluidos afectan a las estructuras previas mostrando direcciones complejas, preferentemente N-S. Se han observado cambios importantes en la distribución de determinados fluidos a lo largo del macizo granítico y en las direcciones preferentes tanto locales como regionales. Los cambios regionales indicarían una rotación de la dirección de máximo esfuerzo. Finalmente se propone una relación entre las direcciones de los ejes de esfuerzos y las determinadas a partir de macroestructuras por otros autores en este sector del Sistema Central.

Palabras clave: Mineralización W-Sn, microfracturación, FIP (planos de inclusiones fluidas), ejes de esfuerzos.

Abstract: A new methodology that allows to describe the geometry of fluid migration through granitic rocks is presented in this paper. Systematic measurements of the orientation of the fluid inclusion planes (FIP) have been carried out, as well as the P-V-T-X characterization of the fluids trapped in the healed cracks. The granitic massif selected for this study is located in San Rafael (Segovia province) and contains wolframite mineralized veins. Three main types of fluids have been identified: (i) hypersaline aqueous fluids, restricted to the greisen area that enclose the mineralized veins. These planes have a predominant orientation $N50^\circ \pm 15^\circ E$; (ii) aqueous-carbonic fluids of possible metamorphic origin, they are associated with the ore process and are aligned in planes along $N50^\circ E \pm 15^\circ E$; and (iii) aqueous low salinity fluids ($H_2O-NaCl$). The latest FIP crosscut all the previous structures and display several patterns, mainly N-S. Important changes in the distribution of some types of fluids along the granitic massif have been observed and also in the preferential directions at local as well as regional scale. Finally, a relationship between the stress axes directions and those proposed by others authors derived from the macrostructures in this section of the Central System is proposed.

Key words: W-Sn ore deposits, microfracturation, FIP (fluid inclusion planes), stress axes.

García García, E., Vindel Catena, E. y López García, J.A. (1999): Análisis de la geometría de la circulación hidrotermal en granitos mineralizados del área de San Rafael (Sistema Central Español). *Rev.Soc.Geol.España*, 12 (3-4): 369-376

Los fluidos han jugado y juegan un importante papel en los diferentes procesos geológicos que suceden en la corteza superior, tanto en el transporte de energía como de elementos. Sobre la circulación hidrotermal en la litosfera se conoce poco, porque se supone que la capacidad de percolación de las rocas a escala mineral es insignificante en comparación con la permeabilidad a escala de macrofracturas. Sin embargo, los paleofluidos se conservan en general mejor en los minerales de la roca encajante que en los propios filones,

donde las reactivaciones tectónicas afectan a los fluidos ya atrapados, y donde además los registros son incompletos y discontinuos.

El objetivo de este trabajo ha sido analizar la geometría de la circulación hidrotermal de un macizo granítico del centro peninsular que se considera representativo, mediante el estudio de la microfracturación asociada a los fluidos hidrotermales. Se ha pretendido determinar la evolución de las redes de microfracturas, lo que permite definir el elipsoide de esfuerzos durante

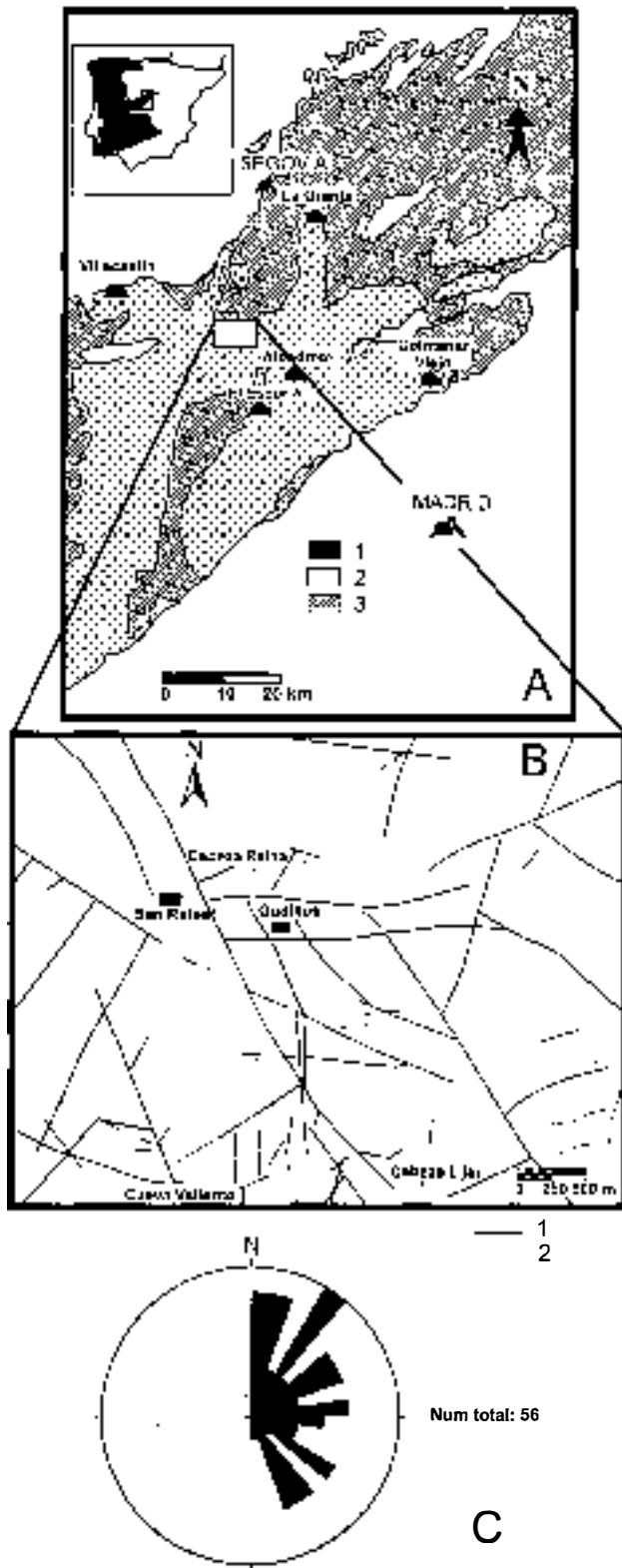


Figura 1.- Localización y esquema geológico del área de estudio. A) Situación general de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central Español). 1: Macizo hespérico, 2: Rocas ígneas, 3: Rocas metamórficas; B) Mapa de la fracturación del área de estudio. 1: Fracturas, 2: Contactos entre las facies graníticas y C) Rosa de direcciones que muestra la orientación de las fracturas representadas en B).

el tiempo en el que actuaron los fluidos hidrotermales en la zona.

Para ello se han escogido los planos de inclusiones fluidas (FIP) como los marcadores microestructurales

más representativos.

Contexto geológico

En el dominio central del Sistema Central Español (Sierra de Guadarrama), se encuentran numerosos filones de cuarzo con W-Sn y sulfuros, acompañados de alteraciones tipo greisen (Fig. 1). Las rocas encajantes son granitos peraluminados, ricos en SiO_2 , W, Sn, con una relación $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$ y con bajos contenidos en Rb y Sr (Villaseca *et al.*, 1991). Los filones se caracterizan por una deposición sucesiva de los minerales con W (Sn-Mo) y de sulfuros de Cu-Zn-(Pb) (Vindel, 1980; Quílez *et al.*, 1990; Quílez, 1994; Vindel *et al.*, 1995; García, 1997).

La mineralización de San Rafael (Segovia) se puede considerar representativa de este tipo de filones asociados a granitos hercínicos (Fig. 1B). Los filones de cuarzo con W (Sn) y sulfuros encajan en un leucogranito peraluminado de grano medio (Villaseca *et al.*, 1993) y muestran un claro control estructural con direcciones $\text{N}45^\circ\text{-}60^\circ\text{E}/65^\circ\text{NO}$ a sub-vertical, produciéndose en sus proximidades la greisenización del granito. Esta greisenización consiste en la alteración de los feldspatos con formación de micas ricas en potasio tipo fengita, cuarzo y fluorita. Un segundo tipo de filones subverticales de dirección $\text{N}20\text{-}30^\circ\text{E}$ desplazan dextralmente a los filones asociados a la mineralización. Además se han identificado una serie de fracturas posteriores con direcciones: $\text{N}20^\circ\text{-}30^\circ\text{E}$, $65^\circ\text{-}85^\circ\text{E}$, N-S y E-O, todas ellas subverticales.

Se han distinguido cuatro etapas hidrotermales principales: (i) greisenización, con precipitación de cuarzo, fengita y fluorita; (ii) etapa W-Sn caracterizada por filones de cuarzo (QI) con wolframita (\pm casiterita); (iii) etapa de sulfuros, principalmente calcopirita, pirrotina y pirita con cuarzo (QII) y clorita rellenando microfracturas que afectan a los cuarzos tempranos (QI); (iv) etapa estéril, en la que se produce una oxidación de los minerales metálicos de etapas precedentes.

Metodología

El área de estudio comprende 20 km^2 alrededor de la mineralización de San Rafael (Fig. 1B), donde se han analizado dos muestras: una de un filón de cuarzo con wolframita de dirección $\text{N}55^\circ\text{E}$ (muestra SR-0) y otra del granito encajante (SR-26 a 300 m del filón). Las muestras regionales se han tomado alejadas de discontinuidades estructurales cartografiadas, pues se pretende observar si la circulación se realizó a través de las redes de microfracturas. Las muestras se tomaron por parejas (a una distancia de 100 m aproximadamente) para verificar que la geometría de la microfracturación no fuera fruto de alguna heterogeneidad local.

La metodología seguida para relacionar los fluidos con las etapas de microfracturación presentes ha sido la descrita por Lespinasse y Cathelineau (1990) y Cathelineau *et al.* (1994). Para ello es preciso tomar las

TIPOS DE I.F.	Lw-h	Vc-w	Lw-c	Lw-m	Lw1	Lw2
Componentes	H ₂ O - NaCl	H ₂ O - CO ₂ - (CH ₄)	H ₂ O - CO ₂ - CH ₄	H ₂ O - CH ₄	H ₂ O - NaCl	H ₂ O - NaCl
Disposición	Cuarzo del grisca	Aisladas en QI	Aisladas en QII Secundarias en QI	Aisladas en QII Secundarias en QI	Secundarias	Secundarias
Hábito a T ambiente	3 fases S+L+V	3 fases L+L+V	2 fases L+V	2 fases L+V	2 fases L+V	2 fases L+V
% fase vapor	0.05-0.15	0.3-0.8	0.4-0.75	0.3-0.5	0.1-0.35	0-0.15
Tf CO ₂ (°C)	--	-56.7/ -60	-59/ -60 o nd	--	--	--
Tf hielo (°C)	--	--	-2/ -7	-0.9/ -6	-2.3/ -5.8	-1.5/ -3.2
Tf clatrato (°C)	--	6.5/ 9.3	7.6/11.2	7/ 16	--	--
ThCO ₂ (°C)	--	14.5/ 29 (V) o (L)	3.5/ 12 o nd	--	--	--
TH (°C)	75/ 350 Bb 200/ 475 So	290/ 420 (V) o (L)	150/410 (L) o (V)	180/ 370 (L)	120/ 380 (L)	90/ 150 (-)
Salinidad (% eq. NaCl)	29-53	--	0.2-2.2	0.1-2.0	3.9-8.9	2.6-5.3
H ₂ O moles %	71-47	65-90	52-95.5	87-94	91.1-96.1	94.7-97.4
CO ₂ moles %	--	8-28	1.3-36	nd	--	--
CH ₄ moles %	--	0.1-2.5	0.3-10	4.9-12.6	--	--
N ₂ moles %	--	nd-3.5	nd-1.3	nd	--	--
Densidad (g/cc)	--	0.53-0.81	0.41-0.65	0.63-0.71	0.7-0.81	0.87-0.95

Tabla I.- Resumen de los datos microtermométricos, composición y volumen de los diferentes tipos de inclusiones fluidas: Tf CO₂: temperatura de fusión de CO₂; Tf hielo: temperatura de fusión de hielo; Tf cl: temperatura de fusión del clatrato; Th CO₂: temperatura de homogeneización de CO₂; Th: temperatura de homogeneización. L: líquido, V: vapor, S: sólido, nv: no visible, nd: no detectado. Todas las temperaturas se dan en °C.

muestras orientadas en el campo con las que se realizan láminas gruesas para el estudio de la pendiente de los planos de inclusiones fluidas. Los planos de inclusiones fluidas (FIP) permiten relacionar las etapas hidrotermales identificadas en las microfracturas con las diferentes etapas de circulación de fluidos en las rocas.

El estudio de los planos de inclusiones fluidas como marcadores de la deformación se basa en que estos planos representan fracturas extensionales selladas por los fluidos hidrotermales que circulan a través de ellas. El cuarzo es el mineral más adecuado para realizar este tipo de estudio dada su transparencia y su comportamiento isótropo frente a los esfuerzos, al carecer de planos de exfoliación. Este tipo de fracturas extensionales se propagan en el plano σ_1 - σ_2 y su proyección en el plano horizontal de la lámina puede representar la dirección de máxima compresión del elipsoide de esfuerzos (σ_1). La caracterización físico-química de los fluidos atrapados en los FIP permite definir una evolución de la geometría de las redes de microfracturación a lo largo del proceso hidrotermal.

En los últimos quince años se han llevado a cabo algunos estudios sobre el análisis de fluidos y su rela-

ción con los eventos deformacionales a escala regional sobre todo en el Macizo Central Francés (Pêcher *et al.*, 1985; Lespinasse y Pêcher, 1986; Kowallis *et al.*, 1982; Laubach, 1989; Lespinasse y Cathelineau, 1990; Schild *et al.*, 1998). Las buenas correlaciones entre orientaciones de paleofluidos y deformaciones regionales permiten considerar a los FIP como buenos marcadores estructurales. No obstante, hay que tener en cuenta que discontinuidades importantes, ya sean filones, fracturas o fallas pueden provocar reorientaciones de los FIP.

Para este trabajo se ha realizado un estudio sistemático de las direcciones de los FIP en un microscopio de luz transmitida con una platina graduada y se han representado los resultados en diagramas direccionales. El análisis tridimensional se realizó con un analizador videográfico interactivo (100-150 medidas en cada sección) adaptado para este tipo de estudios (Lapique *et al.*, 1988). Este método permite conocer la dirección y buzamiento de cada FIP. Sin embargo, no es posible distinguir el tipo de fluido asociado. Por esta razón se ha hecho además una serie de medidas manuales teniendo en cuenta la tipología de las inclusiones después de ser caracterizadas microtermométricamente. La distinción

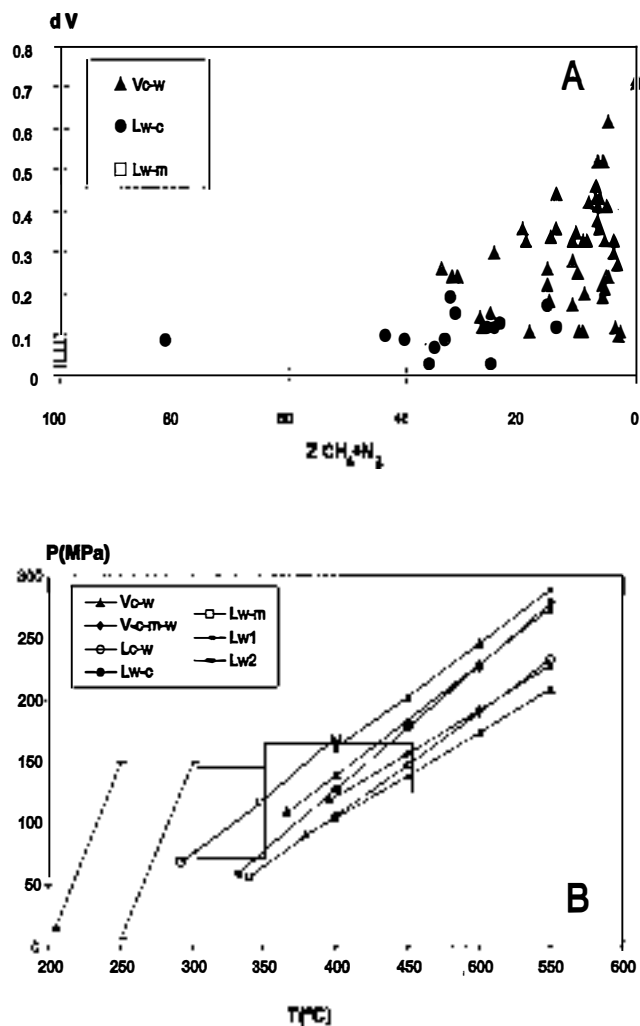


Figura 2.- Propiedades físico-químicas de los fluidos: A) Densidad de la fase volátil (dv) versus $CH_4 + N_2$ de inclusiones de tipo $Vc-w$, $Lw-c$ y $Lw-m$. B) Isocoras seleccionadas de los diferentes tipos de inclusiones fluidas.

entre los tipos de FIP se hizo en función de los aspectos ópticos de las inclusiones a temperatura ambiente.

Para los estudios microtermométricos se ha utilizado una platina refrigeradora-calentadora Linkham THG 600. La platina se calibró a alta temperatura con los puntos de fusión de distintos patrones, y a baja temperatura con el punto triple ($-56.6^{\circ}C$) del CO_2 en inclusiones sintéticas, la temperatura de fusión del tolueno ($-95^{\circ}C$) y la temperatura de fusión del hielo ($0^{\circ}C$) utilizando inclusiones fluidas sintéticas de agua pura. La densidad de la fase volátil del fluido se ha calculado a partir de la temperatura final de fusión del hielo (T_f hielo) usando ecuaciones de Bodnar (1993) y el programa MACFLINCOR de Brown y Hagemann (1994).

Para la determinación de la composición de la fracción no acuosa de las distintas inclusiones se ha utilizado un espectrómetro Raman multicanal modular, Dilor X-Y (CREGU, Nancy). La composición global y el volumen molar se determinaron a partir de las propiedades P-V-T-X de inclusiones individuales en el sistema C-O-H-(N-S) (Dubessy *et al.*, 1989, 1992; Thièry *et al.*,

1994a,b; Bakker *et al.*, 1996). Las propiedades P-T de las inclusiones acuoso-carbónicas se modelizaron para el sistema $H_2O-CO_2-CH_4$ usando los datos V-X y la ecuación de estado de Kerrick y Jacobs (1981) y Jacobs y Kerrick (1981), y los datos de Zhang y Frantz (1987) para el sistema $H_2O-NaCl$.

Caracterización de los fluidos

Las características de los fluidos asociados a las mineralizaciones de W-Sn-sulfuros de la Sierra de Guadarrama han sido descritas en los trabajos de García *et al.* (1995), Vindel *et al.* (1996) y García (1997). Se han podido reconocer tres tipos principales de fluidos (Tabla I):

Fluidos acuosos hipersalinos

Estos fluidos están representados por las inclusiones de tipo $Lw-h$. Son inclusiones acuosas hipersalinas que contienen sólidos "hijo" de halita. Este tipo de fluidos se asocia exclusivamente a los cuarzos de la zona de greisen, alteración desarrollada en las proximidades del contacto filoniano, hasta una distancia de 50 cm. Las inclusiones $Lw-h$ no se han encontrado en los cuarzos del filón ni tampoco en los granitos.

Fluidos acuosos-carbónicos

Están representados por tres tipos diferentes de inclusiones fluidas:

i) Inclusiones tipo ($Vc-w$) tri o bifásicas a temperatura ambiente, de composición: $H_2O-CO_2-(CH_4)$. Es el fluido responsable del transporte del wolframio (Vindel *et al.*, 1995) por lo que son inclusiones muy abundantes en los filones mineralizados de San Rafael.

ii) Inclusiones ($Lw-c$) de composición: $H_2O-CO_2-CH_4$; bifásicas a temperatura ambiente. Predominan en el cuarzo de la muestra del granito encajante de la mineralización.

iii) Inclusiones ($Lw-m$) pertenecientes al sistema H_2O-CH_4 y con características ópticas muy similares al tipo anterior. Se han asociado a la precipitación de sulfuros (Vindel *et al.*, 1995).

Fluidos acuosos

Las inclusiones de tipo $Lw1$ y $Lw2$ son bifásicas a temperatura ambiente; son secundarias y siguen planos con direcciones variadas que se superponen a los de fluidos anteriores. Es el tipo de fluidos más representado, no sólo en los cuarzos mineralizados sino en toda la red de planos de inclusiones en los granitos.

Evolución de los fluidos y condiciones P-T

La evolución de los fluidos está caracterizada por la presencia de un fluido hipersalino que precede a la mineralización de W y que debe tener un origen magmático.

Los fluidos acuoso-carbónicos resultan de la circulación de agua a través de rocas metamórficas de las que adquieren en parte sus características químicas du-

rante la interacción fluido-roca (Vindel *et al.*, 1995). Evolucionan hacia una disminución de la relación CO_2/CH_4 y un aumento de H_2O desde inclusiones Vc-w y Lw-c hasta Lw-m. Así mismo, se observa un descenso en la densidad de la fase volátil en relación al aumento progresivo de la proporción de CH_4+N_2 (Fig. 2A).

Las condiciones mínimas de atrapamiento para los fluidos Vc-w están delimitadas por el par P-T que es 350 a 400°C y 150 a 75 Mpa (Fig. 2B). La trayectoria P-T se caracteriza por una evolución prácticamente isobárica. El par P-T de atrapamiento para los fluidos tipo Lw-c se estima que puede situarse alrededor de $325 \pm 25^\circ\text{C}$ y 100 ± 25 Mpa. La precipitación del wolframio está ligada a este fluido (Boiron *et al.*, 1996). Un descenso en la $f\text{O}_2$ (fluido Lw-m) a temperaturas entre 350-300°C y presiones de 75-150 Mpa habría favorecido la precipitación de sulfuros (Vindel *et al.*, 1995). Finalmente, los fluidos acuosos (Lw1 y Lw2) de alta densidad, característicos de los últimos estadios, se han podido atrapar a temperaturas entre 300° y 200°C y presiones mínimas de 40 ± 10 MPa.

Geometría de la circulación hidrotermal

La mayoría de los FIP medidos tiene buzamientos subverticales ($> 75^\circ$), lo que justifica el uso de los diagramas de direcciones para su representación. No obstante, también se han representado los datos de dirección-pendiente en estereogramas, aunque en este caso no es posible hacerlo para cada tipo de fluidos.

Orientación de los fluidos hipersalinos

Este tipo de fluidos se observa exclusivamente en el granito encajante de los filones de San Rafael, en FIP regularmente distribuidos y mostrando una orientación preferente N40-50°E. Los fluidos hipersalinos no se encuentran en las muestras del estudio regional, lo que corrobora la relación de los mismos con los cuarzos del greisen y su probable origen magmático (Edmunds *et al.*, 1984).

Orientación de los fluidos acuosos-carbónicos

Los FIP con fluidos acuosos-carbónicos (Fig. 3A) muestran dos orientaciones preferentes, NE-SO, similar a la de los filones mineralizados de San Rafael, y N100-120°E. En la parte suroccidental de la zona, en el granito de Peguerinos y en el encajante de la mineralización de San Rafael, aparece otra dirección representativa N70-90°E. Hay que resaltar la ausencia de este tipo de fluidos en varias de las facies graníticas estudiadas; únicamente se han localizado en granitos con mineralizaciones de W-Sn (San Rafael y El Estepar) o en granitos fuertemente evolucionados (Peguerinos y Cabeza Reina).

Orientación de los fluidos acuosos

Los FIP que contienen inclusiones fluidas acuosas Lw1 se pueden agrupar en: (i) FIP con direcciones similares a las anteriormente descritas para los fluidos Lw-h y Vc-w (N100-120°E y NE-SO, esta última menos frecuente, y (ii) FIP orientados según direcciones

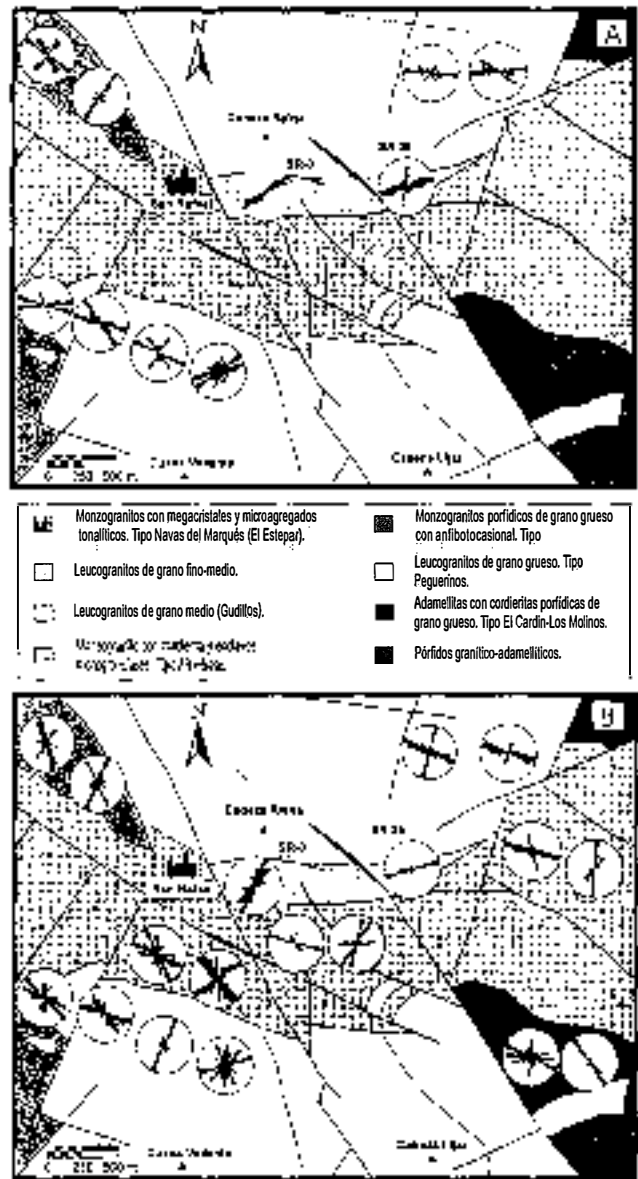


Figura 3.- Rosas de direcciones en la cartografía mostrando las direcciones de los FIP de: A) los fluidos acuosos-carbónicos y B) los fluidos acuosos de alta TH (Lw1).

distintas a las anteriores: la más generalizada (N-S $\pm 10^\circ$) y localmente, por ejemplo al oeste de la zona, en conjuntos menores tales como N140-150°E (Fig. 3B).

Los FIP que contienen los fluidos más tardíos (Lw2) cortan al resto de planos de inclusiones y se distribuyen preferentemente según dos direcciones N100-120°E y N-S $\pm 10^\circ$ (Fig. 4A).

Es importante hacer notar la ubicuidad de los fluidos acuosos a lo largo de todo el macizo granítico independientemente del tipo de granito. La complejidad de las orientaciones durante esta etapa fue muy superior a la anterior, en parte por la reapertura de anteriores FIP. Son frecuentes las muestras con dos o más conjuntos de fracturas, lo que implica una red con mayor probabilidad de conexión; de esta forma se puede explicar la presencia constante de estos fluidos tardíos en el proceso hidrotermal.

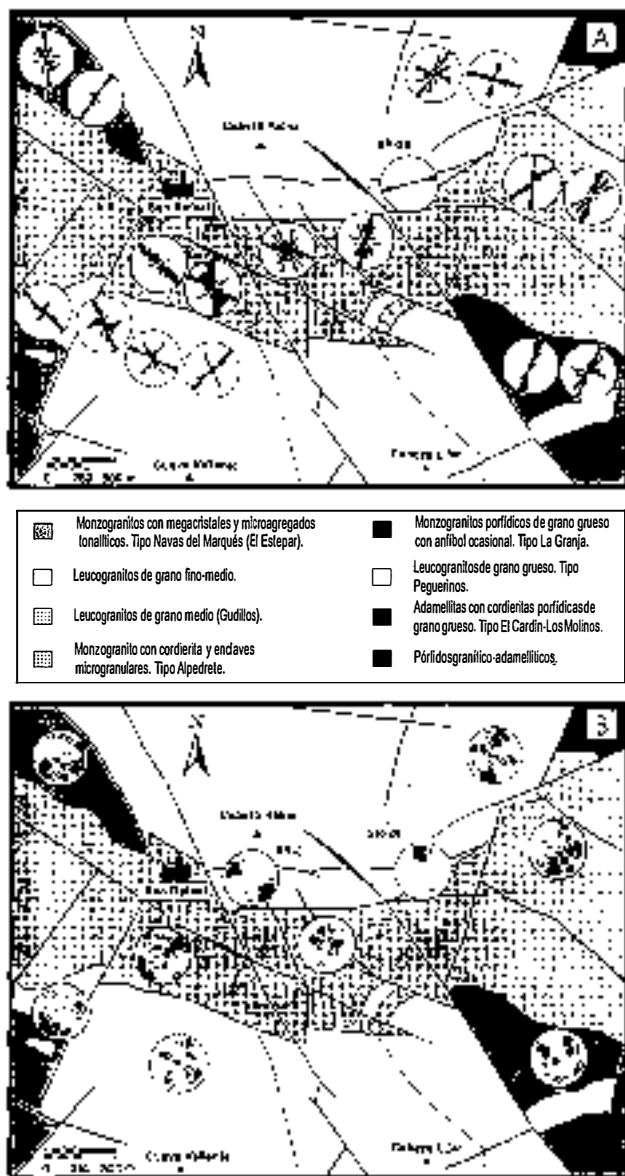


Figura 4.- A) Rosas de direcciones en la cartografía mostrando las direcciones de los FIP de los fluidos acuosos de baja TH (Lw2). B) Estereogramas en la cartografía mostrando las direcciones y pendientes de todos los FIP analizados.

Los resultados del análisis tridimensional de los FIP (Fig.4B) revelan la existencia de, al menos, dos conjuntos de microfrazuras que se cortan perpendicularmente. Este hecho, unido a la variación del buzamiento dentro de cada conjunto, implica una importante interconexión entre las microfrazuras.

Discusión

La correlación entre las etapas de microfrazuración de los granitos del área de San Rafael y la fracturación regional es complicada debido a la ausencia de dataciones precisas tanto de los procesos mineralizadores como de las alteraciones.

La cronología relativa de los fluidos se puede obtener en virtud de las relaciones texturales entre FIP. Así,

se han distinguido cinco tipos de fluidos relacionados con tres etapas hidrotermales:

a) *Estadio de Greisen*: La alteración tipo greisen precede a la formación de los cuarzos filonianos a lo largo de las fracturas N50°E. Estas microfrazuras muestran una dirección preferente N50°E y son precursoras de las etapas posteriores, aunque no estén ligadas genéticamente a éstas. A escala regional no se han reconocido inclusiones hipersalinas (Lw-h), por lo que se puede suponer que la circulación de dichos fluidos se restringió al inmediato contacto con los filones.

b) *Filonos de cuarzo con W*: Son “filones extensionales” subverticales de dirección N50°E, probablemente formados bajo el mismo régimen de esfuerzos que la etapa anterior.

La evolución más importante de los fluidos asociados a esta etapa queda registrada en los FIP con fluidos Lw-c y Lw-m, que muestran una disminución en la densidad de la fase volátil y un aumento del metano y sobre todo del agua frente al CO₂, lo que define una megasecuencia de percolación de fluidos desde fluidos ricos en volátiles hasta fluidos prácticamente acuosos. Se puede interpretar como una evolución continua con enfriamiento y dilución progresivos desde fluidos tempranos (Vc-w), que estarían relacionados con la deposición del W, hasta tardíos (Lw-m) asociados con la precipitación de los sulfuros.

El desarrollo de filones de Q y greisenes en la Sierra de Guadarrama ha sido datado entre 300-290 Ma (Caballero *et al.*, 1992), lo que sitúa a estos yacimientos de W-Sn en un ambiente tardío a postorogénico de desgares extensionales. El registro de estos fluidos acuosocarbónicos está restringido a las cercanías a los filones de W-Sn y/o a granitos muy evolucionados.

La dirección de los FIP a escala de yacimiento indica que durante las etapas de greisen y mineralización de W la dirección compresiva principal (σ_1) se orienta en la horizontal según N50°E, paralelamente a las estructuras filonianas. La fracturación NE-SW relacionada con los filones de W-Sn tiene un carácter marcadamente local, aunque estas direcciones de fracturación se han citado en áreas cercanas a la zona de trabajo (Capote, 1985) y concuerda con la dirección predominante en las fracturas del área de estudio (Fig.1B y C).

A escala regional la orientación N100-120°E concuerda con la disposición de σ_1 definida en la mineralización de W de Cabeza Lijar localizada dentro del área de estudio (Quílez, 1994). La orientación N70-90°E puede considerarse como una heterogeneidad local.

c) *Etapa tardía*: La cronología relativa de los FIP con fluidos acuosos que aparecen de una manera ubicua en todo el macizo, es difícil de establecer ya que presentan direcciones variadas para composiciones semejantes. Esto permite suponer una importante conectividad entre las microfrazuras que facilita la circulación a través del macizo granítico de estos fluidos independientemente de las macrofracturas.

Las orientaciones de los FIP acuosos son en parte heredadas de etapas anteriores y en parte nuevas, fundamentalmente la dirección N-S generalizada a lo largo de todo el macizo (Fig. 4A). Los FIP con inclusiones acuosas orientados WSW-ENE están, así mismo, bien representados, lo que concuerda con la dirección de máxima extensión NNE-SSW determinada por González-Casado *et al.* (1996) a partir del análisis de fallas relacionadas con cuerpos episieníticos de la Sierra de Guadarrama con una edad de unos 277 M.a.

Como la percolación de los fluidos acuosos se ha desarrollado en los granitos durante un extenso periodo de tiempo, no se pueden establecer correlaciones precisas entre la fracturación regional y las diferentes etapas de circulación de estos fluidos. No obstante en los fluidos más tardíos (Lw2) se puede apreciar una dirección preferente N-S que correspondería con la dirección de máximo esfuerzo en la horizontal (ya sea σ_1 ó σ_2).

Conclusiones

La consideración e interpretación de todos los datos obtenidos permite llegar a las siguientes conclusiones:

1) Desde un punto de vista metodológico, este estudio muestra que las medidas de los planos de inclusiones fluidas no pueden hacerse sin un control de la naturaleza del fluido que contienen, ya que puede haber una superposición de diferentes eventos y deformaciones. Además, determinadas orientaciones de FIP pueden ser fruto de la existencia previa de microfracturas o discontinuidades. La repetición de ciertas direcciones para un tipo de fluido confirma la orientación preferencial del mismo y puede aportar una estimación de la dirección local de tensión.

2) Los fluidos magmáticos y metamórficos relacionados con la formación del greisen y de los filones de W sólo han circulado por el granito encajante. Esto indica que los fluidos han percolado en un volumen relativamente pequeño del granito durante las etapas de mineralización. Por el contrario, los fluidos tardíos son ubicuos, y su circulación ha afectado a un volumen mucho mayor de las rocas encajantes.

3) La circulación de fluidos acuosos fue generalizada a través de todo el macizo granítico debido a una mayor permeabilidad durante esta etapa hidrotermal y a que la cantidad de fluido involucrada fue importante.

4) El fluido hipersalino y el acuoso-carbónico se orientan NE-SO al igual que los filones mineralizados. Esa dirección representa la de máximo esfuerzo compresivo (σ_1) para las dos primeras etapas hidrotermales. La dirección N100-120°E, menos generalizada que la anterior, caracteriza también la segunda etapa hidrotermal. Los FIP con inclusiones acuosas muestran una orientación preferente N-S que podría interpretarse como una nueva dirección de tensión de los últimos estadios hidrotermales.

5) Se han observado ciertas orientaciones no generalizadas probablemente debidas a heterogeneidades locales: en la parte occidental de la zona, la N70-90°E

asociada a fluidos Vc-w y la orientación N140-150°E característica de los fluidos acuosos.

6) Existe una buena correlación entre las dos muestras de cada pareja. En algunos casos se han observado ligeras diferencias asociadas a orientaciones heredadas por los fluidos más tardíos.

7) En general se puede concluir que en este segmento del Sistema Central Español la migración de fluidos hidrotermales asociados a mineralizaciones de W-Sn-sulfuros fue generalizada y se realizó a través de una red compleja de microfracturas interconectadas e independientes de las grandes discontinuidades estructurales.

Este trabajo ha sido financiado por el programa de la Unión Europea: (Joule Program, JOU-CT93-0318) «Fluid behaviour in the upper crystalline crust: A multidisciplinary approach». Queremos agradecer a la Dra. M.C. Boiron y al Dr. M.Cathelineau su inestimable ayuda en la interpretación de la espectroscopía Raman, así como las ideas y sugerencias aportadas a este trabajo.

Bibliografía

- Bakker, R.J., Dubessy, J. y Cathelineau, M. (1996): Improvements in the clathrate modelling: I. The H₂O-CO₂ system with various salts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 1657-1681.
- Bodnar, R.J. (1993): Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57: 683-684.
- Boiron, M.C., Cathelineau, M., Noronha, F., Banks, D., Vindal, E. y López, J.A. (1996): From retrograde hercynian metamorphism to granite related to geothermal fields: a fluid chemistry and P-T-Depth reconstruction based on fluid inclusions. En: *VI PACROFI Conference, Brown and Hagemann Eds., Dpt of Geology (University of Wisconsin, USA) Eds:* 18-20.
- Brown, P.E. y Hagemann, S.G. (1994): MacFlinCor: A computer program for fluid inclusion data reduction and manipulation. En: Short course of the working group (IMA) Inclusions in minerals (Pontignano- Siena), *B. De Vivo y M.L. Frezzotti Eds., Virginia Tech. Ed., Blacksburg (USA):* 231-250.
- Caballero, J.M., Casquet, C., Galindo, C., González-Casado, J.M., Snelling, N. y Tornos, F. (1992): Dating of hydrothermal events in the Sierra de Guadarrama, Iberian Hercynian Belt, Spain. *Geogaceta*, 11: 18-22.
- Capote, R. (1985): Historia deformativa en el Sistema Central. Tectónica prehercínica y hercínica. *R. Acad. Ci. Ex. Fis. Nat., Madrid*, 79: 511-522.
- Cathelineau, M., Lespinasse, M. y Boiron, M.C. (1994): Fluid inclusions planes: a geochemical and structural tool for the reconstruction of paleofluid migration. En: Short course of the working group (IMA) Inclusions in minerals (Pontignano- Siena), *B. De Vivo y M.L. Frezzotti Eds., Virginia Tech. Ed., Blacksburg (USA):* 271-282.
- Dubessy, J., Poty, B. y Ramboz, C. (1989): Advances in the C-O-H-N-S fluid geochemistry based on micro-Raman spectroscopic analysis of fluid inclusions. *Eur. Jour. Mineral.*, 1: 517-534.
- Dubessy, J., Boiron, M.C., Moissette, A., Monnin, C. y Sretenskaya, N. (1992): Determinations of water, hydrates and pH in fluid inclusions by micro-Raman spectrometry.

- Eur. Jour. Mineral.*, 4: 885-894.
- Edmunds, W.M., Andrews, J.N., Burgess, W.G., Kay, R.L.F. y Lee, D.J. (1984): The evolution of saline and thermal groundwaters in the Carnmenellis granite. *Mineral. Mag.*, 48: 407-424.
- García, E. (1997): *Análisis de la circulación hidrotermal en granitos mineralizados con W-Sn (Sierra de Guadarrama)*. Tesis doctoral, Univ. Complutense, Madrid. 259 p. (inédita).
- García, E., López-García, J. A., Vindel, E. y Boiron, M. C. (1995): Fluid migration in microfissured granites: A fluid inclusion study of W-Sn veins in the Spanish Central System. *Bol. Soc. Esp. Min. XIII ECROFI Conference*, 18(1): 84-85.
- González-Casado, J.M., Caballero, J.M., Casquet, C., Galindo, C. y Tornos, F. (1996): Paleostress and geotectonic interpretation of the Alpine Cycle onset in the Sierra del Guadarrama (eastern Iberian Central System), based on evidence from episyenites. *Tectonophysics*, 262: 213-229.
- Jacobs, G.K. y Kerrick, D.M. (1981): Methane: an equation of state with application to the ternary system H₂O-CO₂-CH₄. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45: 607-614.
- Kerrick, D.M. y Jacobs, G.K. (1981): A modified Redlich-Kwong equation for H₂O, CO₂ and H₂O-CO₂ mixtures at elevated pressures and temperatures. *Amer. Jour. Sci.*, 281: 735-767.
- Kowallis, B.J., Roeloffs, E.A. y Wang, H.F. (1982): Microcrack studies of basalts from the Iceland Research Drilling Project. *Jour. Geophys. Res.*, 87: 6650-6656.
- Lapique, F., Champenois, M. y Cheilletz, A., (1988): Un analyseur vidéographique interactif description et applications. *Bull. Minéral.*, 6: 258-263.
- Laubach, S.E. (1989): Paleostress directions from the preferred orientation of closed microfractures (fluid-inclusions planes) in sandstone, East Texas basin, U.S.A. *Jour. Struct. Geol.*, 11 (5): 603-611.
- Lespinasse, M. y Pêcher, A. (1986): Microfracturing and regional stress field: a study of the preferred orientations of fluid-inclusion planes in a granite from the Massif Central, France. *Jour. Struct. Geol.*, 8 (2): 169-180.
- Lespinasse, M. y Cathelineau, M. (1990): Fluid percolations in a fault zone: a study of fluid inclusion planes in the Sylvestre granite, northwest Massif Central, France. *Tectonophysics*, 184: 173-187.
- Pêcher, A., Lespinasse, M. y Leroy, J. (1985): Relations between fluid inclusion trails and regional stress field: a tool for fluid chronology - an example of an intragranitic uranium ore deposits (northwest Massif Central, France). *Lithos*, 18: 229-237.
- Quílez, E. (1994): *Mineralizaciones filonianas de wolframio de la Sierra de Guadarrama: modelo y caracterización del proceso hidrotermal*. Tesis doctoral, Univ. Complutense, Madrid, 277 p. (inédita).
- Quílez, E., Vindel, E. y Sierra, J. (1990): A fluid inclusion study and genetic model of wolframite-bearing quartz veins, Garganta de los Montes, Spanish Central System. *Mineral. Mag.*, 54: 267-278.
- Schild, M., Vollbrecht, A., Siegesmund, S. y Reutel, Chr. (1998): Microcracks in granite cores from the EPS-1 geothermal drill hole, Soultz-sous-Fôrets (France): paleostress directions, paleofluids and crack-related Vp-anisotropies. *Geol. Rundschau*, 86: 775-785.
- Thiery, R., Van den Kerkhof, A.M. y Dubessy, J. (1994a): V-X properties of CH₄-CO₂ and CO₂-N₂ fluid inclusions: modelling for T<31°C and P<400 bars. *Eur. Jour. Mineral.*, 6: 753-771.
- Thiery, R., Vidal, J. y Dubessy, J. (1994b): Phase equilibria modelling applied to fluid inclusions: liquid - vapour equilibria and calculation of the molar volume in the CO₂-CH₄-N₂ system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58: 1073-1082.
- Villaseca, C., Brändle, J.L., Casillas, R. y Pérez-Soba, C. (1991): Características geoquímicas de los granitos ricos en sílice de la Sierra de Guadarrama y su papel en la génesis de mineralizaciones de metales raros. *Bol. Soc. Esp. Min.*, 14: 249-260.
- Villaseca, C., Barbero, L., Huertas, M.J., Andonaegui, P. y Bellido, F. (1993): A cross-section through hercynian granites of Central Iberian Zone. Excursion Guide. *Servicio de Publicaciones del C.S.I.C. Madrid*, 122 p.
- Vindel, E. (1980): *Estudio mineralógico y metalogénico de las mineralizaciones de la Sierra de Guadarrama*. Tesis doctoral, Univ. Complutense, Madrid, 249 p. (inédita).
- Vindel, E., López, J. A., Boiron, M. C., Cathelineau, M. y Prieto, A. C. (1995): P-V-T-X-fO₂ evolution from wolframite to sulphide depositional stages in intragranitic W-veins. An example from the Spanish Central System. *Eur. Jour. Mineral.*, 7: 655-673.
- Vindel, E., López, J. A., García, E., Boiron, M. C. y Cathelineau, M. (1996): Estudio de inclusiones fluidas en granitos microfisurados: mineralizaciones del Sistema Central Español. *Geogaceta*, 20 (7): 1558-1560.
- Zhang, Y.G. y Frantz, J.D. (1987): Determination of the homogenization temperature and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O using synthetic fluid inclusions. *Chem. Geol.*

Manuscrito recibido el 1 de Febrero de 1999

Aceptado el manuscrito revisado el 17 de Junio de 1999