

ESTUDIO DE INCLUSIONES FLUIDAS (IF) EN EL DISTRITO AURÍFERO EPITERMAL DE MANANTIAL ESPEJO, SANTA CRUZ, ARGENTINA

Francisco Javier Rios(*); James Vieira Alves(*); Kazuo Fuzikawa(*) & Isidoro B. Schalamuk (**)

(*) Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN)-CNEN, Rua Prof. Mario Werneck s/n. Cidade Universitaria, Pampulha. Cx. Ps. 941. Cep.30123-970. Belo Horizonte-MG, Brasil.
TEL: 55-31-4993331. E-mail: javier@urano.cdtm.br

(**) Instituto de Recursos Minerales (INREMI). Calle 47 n° 522, (1900) La Plata, Fax 021-225648

ABSTRACT

Fluid inclusion studies in the Manantial Espejo area (Macizo del Deseado, Patagonia) showed low salinity (0,35 / 6,54 wt% NaCl) and Th between 200 and 300°C epithermal aqueous fluids. They have precipitated banded and massive quartz which make the body of *Veta Maria* quartz vein. In this stage Au>>Ag mineralization is related to sulfides. An inversion in this mineralization style, with Ag prevailing over Au occurred toward the final stage of sulfide precipitation (spheralite), where an increase in salinity (12,28 wt% NaCl) coupled with decreasing Th (<200°C) is shown.

A comparison between the fluids detected and the low sulfidation model is presented.

INTRODUCCIÓN

La mineralización auroargentífera de Manantial Espejo se localiza dentro del Complejo efusivo-sedimentario Jurásico del Macizo del Deseado (De Giusto et al., 1980 & Fernandez y De Barrio, 1994). Afloran en este sector la Formación Bajo Pobre (Dogger inferior), formada por vulcanitas basandesíticas. Superpuestas a esta son encontradas las rocas de la Formación Chon Aike y Formación La Matilde, que forman parte del Grupo Bahía Laura (Figura 1). Las primeras compuestas por riolitas, ignimbritas, tobas y aglomerados volcánicos, con predominio de riolitas. La segunda esta compuesta, básicamente, por tobas y aglomerados volcánicos fuertemente silicificados.

Las mineralizaciones se presentan en forma de cuerpos vetiformes, stockworks y cuerpos de *silica-sinters*. Los primeros son de

potencia variable y extensiones de centenas de metros, entre los cuales el mas importante es la Veta María. Estos filones presentan estructuras bandeadas formadas por cuarzo, amatista, citrino, calcedonia y ópalo. También se encuentran estructuras coliformes, brechas geodas y drusas. Los *stockworks* siguen el sentido de rumbo de los filones, de espesor variable y están compuestos por cuarzo sacaroide. Finalmente, los cuerpos de sílice subhorizontales se localizan en el sector este del distrito, con características similares a *silica-sinters* o subsinters, posiblemente depositados por fumarolas, con contenidos anómalos de Ag y Au (Schalamuk et al., 1995; Etcheverry et al, 1997).

Resultados preliminares de IF indicaron que los fluidos de Manantial Espejo son característicos de ambiente epitermal de baja salinidad y con temperaturas de formación inferiores a 300°C (Rios et al., 1994).

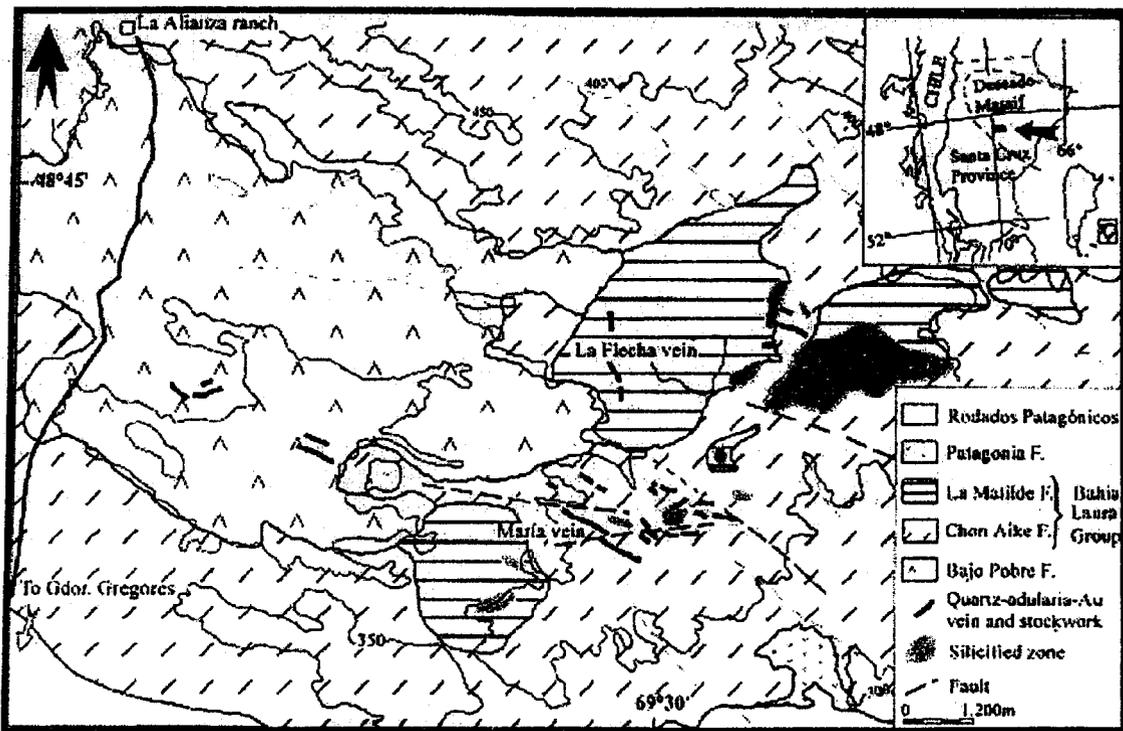


Figura 1. Bosquejo geológico del Distrito Manantial Espejo (extraído de Etcheverry et al. 1997)

Muestras estudiadas y metodologías Fueron analizadas muestras de superficie y de profundidad (obtenidas por sondeo), en los sectores de la Veta María y del *silica sinter*.

Para los estudios de IF fueron utilizadas dos platinas microtermométricas (Chaixmecca y Fluid Inc) del Laboratorio de Inclusiones Fluidas (LIF) del CDTN-CNEN, Belo Horizonte. Los estudios de microRaman fueron desarrollados en el Laboratorio de Óptica (DF, UFMG, Belo Horizonte).

PETROGRAFIA

En las muestras estudiadas (vetas de cuarzo en su mayoría) fue constatada la presencia de cuarzo (varias generaciones), carbonatos silicificados, adularia y minerales opacos (principalmente pirita, calcopirita, óxidos de hierro y esfalerita).

Minerales estudiados por IF: Cuarzo Los cristales de cuarzo de la primer generación

(denominados cuarzo 1) son poco frecuentes: presentan formas ligeramente redondeadas o con bordes corroídos, no muestran líneas de crecimiento ni IF primarias. En este mineral, al igual que en el cuarzo de las ignimbritas, fueron observadas *melt inclusions* (inclusiones de materiales fundidos). Esta presente en las paredes de la Veta María.

Los cristales de las otras generaciones de cuarzo forman la estructura principal del filón y, en conjunto, fueron denominados cuarzo 2. Generalmente están bien formados (euedrales o de bordes rectos), muestran líneas de crecimiento e inclusiones primarias. Este tipo de cuarzo también predomina en sectores brechados de los silica - sinters.

Esfalerita Junto a la calcopirita constituye el mineral opaco menos abundante. Forma cristales de hasta 1mm. La esfalerita ocupa espacios libres, generalmente entre cristales de cuarzo, y normalmente presenta formas irregulares. Dentro de este mineral fueron

encontradas inclusiones de calcopirita, piritita y cuarzo. La poca transparencia de la esfalerita dificultó mucho el estudio de IF.

Adularia Los cristales estudiados son tabulares, de dimensiones inferiores a $250\mu\text{m}$ y aparecen como inclusiones en el cuarzo 2. Presentan IF extremadamente pequeñas, no mayores de $2\mu\text{m}$, lo que tornó imposible su estudio petrográfico, aún con el uso de objetivos de 100X. Ametrano & Echeveste (1996) describen una generación precoz de adularia, variedad tabular, que esta presente en los hastiales de la Veta María. En los cristales estudiados de esta última generación fueron observadas inclusiones diminutas ($<2\mu\text{m}$). Estas pequeñas dimensiones impidieron el estudio petrográfico.

TIPOS DE INCLUSIONES FLUIDAS DE LOS SECTORES VETA MARIA Y SILICA SINTER

A. Inclusiones Tipo 1 Es el tipo de IF mas abundante encontrado en el sector de la Veta María. Fueron estudiadas en las dos generaciones de cuarzo. En el cuarzo 2 son de origen primario y forman las líneas de crecimiento de estos cristales. Estas inclusiones también aparecen en el cuarzo 1 (precoz) asociadas a planos de microfracturas suturadas que cortan los cristales en varias direcciones

Microscopia Son inclusiones de tamaño variable, entre 4 y $20\mu\text{m}$, con formas semi-redondas y semi-rectangulares. Predominan los tipos bifásicos y monofásicos, aunque también es posible encontrar IF trifásicas (raramente multifásicas). Las monofásicas están compuestas por una fase líquida acuosa, no obstante hayan sido encontradas algunas de composición gaseosa (vapor de agua). Las inclusiones bifásicas ($\text{LH}_2\text{O} + \text{VH}_2\text{O}$) muestran que el volumen de la fase vapor es variable. Inclusiones trifásicas y multifásicas son menos frecuentes y presentan una (o mas) fases

sólidas, poco representativas. Estos sólidos son de dos tipos: (i) poco birrefringente (generalmente amorfo), y (ii) muy birrefringente (amorfo, o casi rectangular): Probablemente no se trata de carbonatos, ya que los picos de Raman obtenidos a partir de estas fases sólidas (1159, 1078 cm^{-1}) no corresponden a estos minerales. Esto, sumado al hecho de que los sólidos no aparecen sistemáticamente en las IF primarias, llevó a descartar la posibilidad de que se traten de cristales de saturación. Fueron encontradas, en forma subordinada, algunas inclusiones formadas por una fase sólida birrefringente y una fase gaseosa.

El volumen de las fases gaseosas en las inclusiones del cuarzo 2 es muy variable, oscilando entre 10 y 50% del V_t (volumen total de las inclusiones). En cristales de esta generación, estudiados en las paredes de la Veta María (sector bandeado), fueron observadas IF donde la fase gaseosa llega a ocupar el 100% del V_t , indicando, probablemente, que hubo procesos de ebullición durante su formación. Sin embargo, esta característica no es frecuente en Manantial Espejo.

Microtermometria Durante la etapa de criometria, las inclusiones fueron congeladas hasta -120°C , procurando verificar cambios de fase que indiquen la presencia de compuestos carbónicos. No fue constatada ningún cambio de fase característico que lleve a considerar la presencia de CO_2 en las fases gaseosas de las IF tipo 1 estudiadas.

La primer temperatura de fusión de sólidos, obtenida después del congelamiento, fue registrada en torno de -23°C . Si esta temperatura corresponde a la del punto eutéctico del sistema salino del fluido acuoso estudiado, indicará que, en el mismo, están presentes los iones Cl^- , Na^+ y K^+ .

Tanto en las muestras de profundidad, como en las de superficie, fue posible obtener un número altamente representativo de temperaturas de fusión de hielo (T_{fh}). Estos valores se ubican

entre -4 y -0,0°C, indicando que la salinidad de la fase acuosa es equivalente a 0,35 / 6,54% en peso de NaCl (Figura 2). La salinidad se mantuvo constante en las IF primarias de todos los tipos de cuarzo estudiados.

No fue observada la presencia de clatratos y no fueron verificadas modificaciones en las fases sólidas de las IF durante el congelamiento. La microsonda Raman corroboró la ausencia de fases carbónicas en las inclusiones estudiadas.

Durante la etapa de calentamiento de las muestras de profundidad se verificó que las IF homogeneizaban (Th) principalmente a temperaturas entre 180 y 320°C (los picos principales de homogeneización están en torno de 200, 240 y 275°C, Figura 3). Estas temperaturas son levemente superiores a las registradas en las muestras de superficie, donde la mayor parte de los valores de homogeneización se ubican en el rango 200/270°C. Las IF de los cristales de cuarzo 2 (de las paredes de la veta) homogeneizan generalmente entre 260 y 320°C. Valores inferiores de Th (entre 180 y 230°C) fueron verificados en las IF de los cristales de cuarzo (tardíos) del sector central de la Veta María y del silica sinter.

B. Inclusiones Tipo 2

Bajo esta denominación fueron agrupadas las IF primarias encontradas en cristales de esfalerita. No fueron encontradas en ningún otro mineral del distrito Manantial Espejo.

Microscopia Las inclusiones de la esfalerita presentan dimensiones muy variables, algunas son inferiores a 4 µm y otras alcanzan hasta 30µm.

La mayor parte presenta formas que varían desde semi poligonales (incluyendo formas del tipo cristal negativo) hasta redondeadas. Las inclusiones son mayormente bifásicas, aunque se constató la presencia de monofásicas (líquidas) y trifásicas (con una fase sólida poco birrefringente).

Microtermometria Durante el estudio criométrico fue realizado un congelamiento hasta -130°C. No fueron verificados cambios de fases que indiquen la presencia de compuestos carbónicos en las inclusiones estudiadas.

La temperatura del punto eutéctico del sistema salino de los fluidos fue estimada entre -52 y -48°C. Estos valores indican que en las soluciones pueden estar presentes los iones Na⁺, Ca⁺⁺ y, tal vez, Mg⁺⁺.

Pese a que durante la criometría no fueron identificados hidratos de sales, fue observada recristalización de sólidos a -34°C.

La fusión final de hielo (T_{fh}) ocurrió entre -4,5 y -8,5°C, indicando que estos fluidos poseen salinidades intermedias a altas (valores máximos de 12,28% en peso de NaCl, Figura 2).

Durante la etapa de calentamiento, las inclusiones bifásicas homogeneizaron principalmente a temperaturas entre 140 y 197°C (en la fase líquida).

El análisis por microsonda laser Raman no detectó la presencia de fase carbónicas en las inclusiones de la esfalerita.

CONCLUSIONES

En una etapa posterior a la solidificación de las rocas extrusivas del sector Manantial Espejo hubo un evento de silicificación, a temperaturas oscilantes entre 200 y 300°C, que originó los filones de cuarzo (entre ellos la Veta María). El fluido responsable por este proceso es el encontrado en las inclusiones tipo 1 y, característicamente, muestra valores bajos de salinidad, inferiores a 6% en peso de NaCl, en todo el sector estudiado. Estos fluidos también circularon por fracturas abiertas en los cristales de cuarzo 1 (generación probablemente relacionada a las encajantes piroclásticas), originando IF tipo 1 secundarias.

Las paleotemperaturas obtenidas en el sector Veta María indicaron que los fluidos del tipo 1

se desplazaron desde el sector centro-oeste del filón hacia el sector este. De la misma forma, fue posible verificar que el gradiente termal de paleotemperaturas aumenta en profundidad, a razón de 50°C cada 100-150m.

Las observaciones petrográficas y microtermométricas indican que, durante la formación de la Veta María, hubo más de un pulso de silicificación, que originó las texturas bandeadas características del sector. Durante este proceso, la composición del fluido acuosalino permaneció constante, precipitando niveles sucesivos de cristales de cuarzo 2 a temperaturas progresivamente decrecientes.

La etapa de precipitación de sulfuros parece coincidir, en algún punto de la escala temporal, con la del cuarzo 2. Sin embargo, los primeros continuaron precipitando una vez de finalizada la etapa de silicificación. En la etapa tardía de sulfuración se formó la esfalerita, a partir de fluidos acuosos de media / alta salinidad y temperaturas próximas a 200°C. En estas soluciones estaban presentes los iones Ca⁺⁺, Na⁺ y, tal vez, Mg⁺⁺. Resulta difícil explicar el origen de ese aumento de salinidad. Altas salinidades relacionadas a esfalerita fueron reportadas por Henley (1985), quien relacionó estos fluidos a la interacción de soluciones epitermales con agua de mar. Los iones calcio, sodio y magnesio(?) del fluido que precipitó la esfalerita de Manatíal Espejo tal vez tengan origen semejante.

Es importante destacar que los valores de Th medidos en la esfalerita coinciden con la temperatura obtenida por termometría isotópica de S para el par esfalerita/galena de Cerro Vanguardia (202± 25°C, Schalamuck et al., 1995).

En ambientes epitermales de baja sulfuración, fluidos de alta salinidad (10-15% en peso de NaCl) son característicos de depósitos donde el ion Ag predomina sobre el Au, en proporciones Ag/Au > 100, con valores económicos de Zn y

Pb (O'Neil & Silberman, 1974; Hedenquist & Lowenstern, 1994). Estos fluidos serían similares a los que precipitaron la esfalerita de la Veta María. La suposición es reforzada por los resultados de análisis químicos del sector Manatíal Espejo, que reflejan una inversión en el estilo de mineralización, el cual pasa de Au > Ag en las etapas precoces, para Ag > Au en las etapas tardías. Debe remarcar también que algunos diagramas de concentración y solubilidad propuestos por Henley (1985) muestran que la solubilidad de Au aumenta con el incremento de salinidad y la disminución de la temperatura. Por lo tanto, no sería de esperar precipitación de oro durante la etapa de formación de la esfalerita.

De acuerdo con los resultados de análisis químicos en muestras de testigos de perforación, los mayores tenores de Au coinciden con la presencia de niveles sulfurados, que aparecen intercalados en el cuarzo 2. La etapa de precipitación de Au estaría, de ese modo, vinculada con la formación de los primeros sulfuros. De acuerdo a observaciones de Dong & Morrison (1995), corroboradas por Ametrano & Echeveste (1996), la formación de minerales auríferos también se relacionaría con la precipitación de la adularia rómbrica. Fue verificado que la misma aparece como inclusión en los cristales del cuarzo 2. Por lo tanto, entre los fluidos estudiados, aquellos que precipitaron este último mineral (probablemente acuosos sin CO₂) serían los que más se aproximarían a las soluciones que formaron el oro de Manatíal Espejo.

Entre los factores que pueden haber contribuido con la precipitación de oro deben destacarse la temperatura y la ebullición del fluido. La salinidad de las soluciones no influyó este proceso porque permaneció constante durante toda la etapa de silicificación. No fue determinado el papel que habrían desempeñado

otros factores tales como cambios en el pH y en las concentraciones de H₂S.

El tipo de mineralización, constituido por electrum + oro + tetraedrita (Etcheverry et al., 1997), sumado a las texturas, salinidades y temperaturas características de los fluidos, la presencia de adularia hidrotermal, la poca abundancia de sulfuros y algunas evidencias locales de ebullición de fluidos, permiten incluir el sector de Manatíal Espejo dentro a los depósitos epitermales de Baja Sulfuración (Hedenquist & Lowenstern, 1994; Hedenquist et al., 1997) y Adularia-Sericita (Heald et al., 1987; Marcoux, 1995; entre otros), tabla 1. Estos yacimientos están generalmente ubicados en zonas marginales de centros volcánicos, son

vetiformes, se formaron dentro de un limitado rango de pH (casi neutro) bajo presiones hidrostáticas y pueden estar asociados a manifestaciones geotermales (Hedenquist et al 1997). El cuerpo de sinter (brechoide) de Manantial Espejo debe ser un remanente de paleo-fumarolas. Por debajo de ese cuerpo fueron muestreadas microvetas formadas por fluidos de composición semejante a los que precipitaron la Veta María. El origen de estas brechas puede ser debido a aumentos locales de presión (valores superiores a los hidrostáticos), originados por taponamientos intermitentes de fracturas, que producirían rupturas tectónicas, fracturación y brechificación (Hedenquist et al., 1997).

Tabla 1. Comparación entre las características de depósitos epitermales del tipo Adularia-Sericita/ Baja Sulfuración y las correspondientes al depósito epitermal de Manantial Espejo.

MODELO ADULARIA SERICITA, BAJA SULFURACIÓN Heald et al. (1987); Marcoux (1995); Hedenquist et al. (1997)	MANANTIAL ESPEJO
Presencia de cuarzo, calcedonia y adularia	Idem
Presencia subordinada de sulfuros	Idem
Mineralización de oro, plata (electrum)	Mineralización de oro, electrum, tetraedrita
Presencia de vetas, filones, brechas	Idem
Presencia de <i>stockworks</i>	Idem
Baja salinidad de los fluidos acuosos	Idem
Temperatura de fluidos mineralizadores entre 190 y 250°C	Temperaturas entre 200 y 300°C para los fluidos probablemente mineralizadores
Ebullición del fluido mineralizador	Ebullición muy localizada
Encajante riolítica	Encajante riolítica
Rodocrosita	Carbonatos silicificados

Debe destacarse que hay una divergencia entre el modelo de Baja Sulfuración / Adularia Sericita y los fluidos estudiados en Manantial Espejo. Hedenquist & Lowenstern (1994) afirman que en estos fluidos están presentes gases, generalmente CO₂ y H₂S, en cantidades mayores a 4% en peso. Sin embargo, la presencia de estas fases gaseosas

no fue confirmada durante las determinaciones microtermométricas y de micro-Raman, tanto en la Veta María, como en el cuerpo de *silica-sinter*. No obstante esto, los estudios de aplastamiento (*crushing*), en cristales de cuarzo 2 sumergidos en glicerina, indicaron liberación baja de gases. Esta observación indica que hay otros gases (aparte

del vapor de agua) asociados a la etapa principal de silicificación. Los mismos parecen estar relacionados a inclusiones (monofásicas intercristalinas tardías), localizadas entre cristales contiguos de cuarzo. Factores tales como fluorescencia, alto relieve y opacidad impidieron que los estudios criométricos y de micro-Raman pudiesen confirmar, en estas inclusiones, la presencia de fases carbónicas y de H₂S. De cualquier manera, estos fluidos tardíos serían posteriores a las etapas de precipitación de oro y sulfuros (incluyendo esfalerita). Soluciones tardías (carbónicas?) fueron identificadas en algunos sectores del macizo (Dorado Monserrat; Echavarría, 1997; La Josefina y El Macanudo). Resultados de estudios de micro-Raman indicaron que los compuestos carbónicos son, probablemente, hidrocarburos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ametrano, S. & Echeveste, H., 1996. La adularia del distrito aurífero de Manantial Espejo, Provincia de Santa Cruz, Argentina. Su interpretación metalogenética. III Reunión de Mineralogía y Metalogénia. Pub. Nro. 5, La Plata, p.49-54.
- De Giusto, J.M.; Di Persia, C.; Pezzi, E., 1980. Nesocratón del Deseado. En: Geología Regional Argentina. Vol. II:1389-1430. Acad. Nac. de Ciencias. Córdoba.
- Dong, G. & Morrison, G.W., 1995. Adularia in epithermal veins, Queensland: morphology, structural state and origin. *Mineralium Deposita*, 30:11-19.
- Echavarría, L.E., 1997. Estudio geológico-minero, área El Dorado Monserrat. Informe preliminar, Beca de Doctorado, CONICET-UNLP.
- Etcheverry, R.; Echeveste, H.; Schalamuk; Ametrano, S., 1997. Manantial Espejo: A Jurassic epithermal gold mineralization, Santa Cruz, Argentine. In: *Mineral Deposits*, Papunen (ed), Balkema, Rotterdam. p.177-180.
- Fernandez, R.R.A., & De Barrio, R.E., 1994. Mineralizaciones de oro y plata del Macizo del Deseado, Santa Cruz, Argentina. *Revista Comunicaciones (Univ. Chile)*, 45:59-66.
- Heald, P.; Foley, N.K.; Hayba, D.O., 1987. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia-sericite type. *Economic Geology*, 82:1-26.
- Hedenquist, J.W. & Lowenstern., 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370:519-527.
- Hedenquist, J.W.; Izawa, E.; Arribas, A.Jr; White, N.C., 1997. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. The Society of Resource Geology, Japan, Special Publication No. 1.
- Henley, R.W., 1985. The geothermal framework of epithermal deposits. In: *Geology and geochemistry of epithermal systems*. Berger, B.R. & Bethke, P.M. (eds). *Reviews in Economic Geology*, vol.2:1-21.
- Marcoux, E., 1995. Gold and volcanoes: epithermal gold deposits, a review. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t.321, serie IIa, p.723-735.
- O'Neil, J.R. & Silberman, M.L., 1974. Stable isotope relations in epithermal Au-Ag deposits. --*Economic Geology*, 69:902-909
- Rios, F.J.; Fuzikawa, K.; Schalamuk, I.A.B.; Pimenta, M., 1994. Resultados preliminares del estudio de IF en cuarzo mineralizado del área Manantial Espejo, Macizo del Deseado, Santa Cruz. In: II Reunión Mineralogía y Metalogénia. Inst. Rec. Minerales. Publ. 3:345-351.
- Schalamuk, I.A.B.; Fernandez, R.R.; Etcheverry, R.O., 1995. Gold-silver epithermal veins in the Macizo del Deseado, Argentina. In: *Mineral Deposits*, Pasava, Kribek & Zak (eds). *Proceedings of the third biennial SGA meeting, Praga*. p: 385-388.

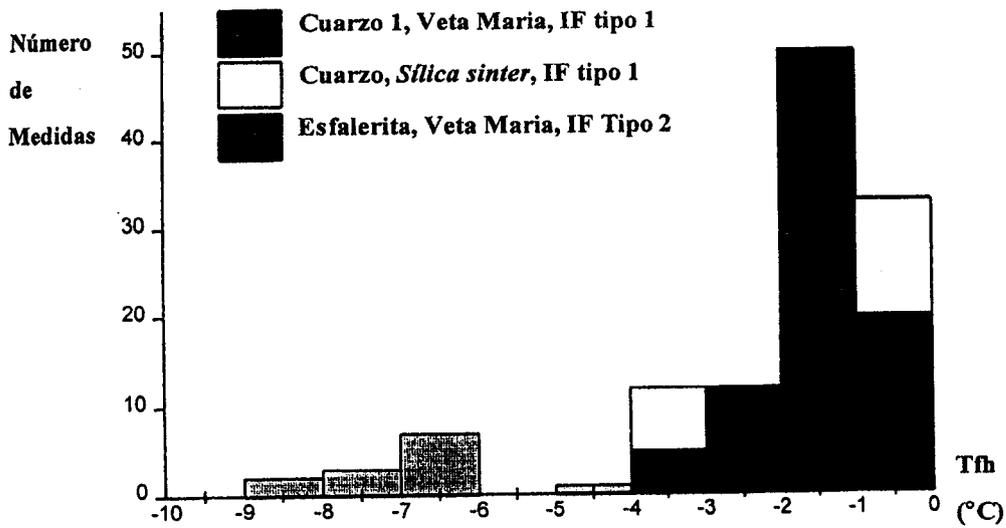


Figura 2. Histograma que muestra temperaturas de fusión del hielo (Tfh) de IF estudiadas en minerales de Manantial Espejo, Macizo del Deseado.

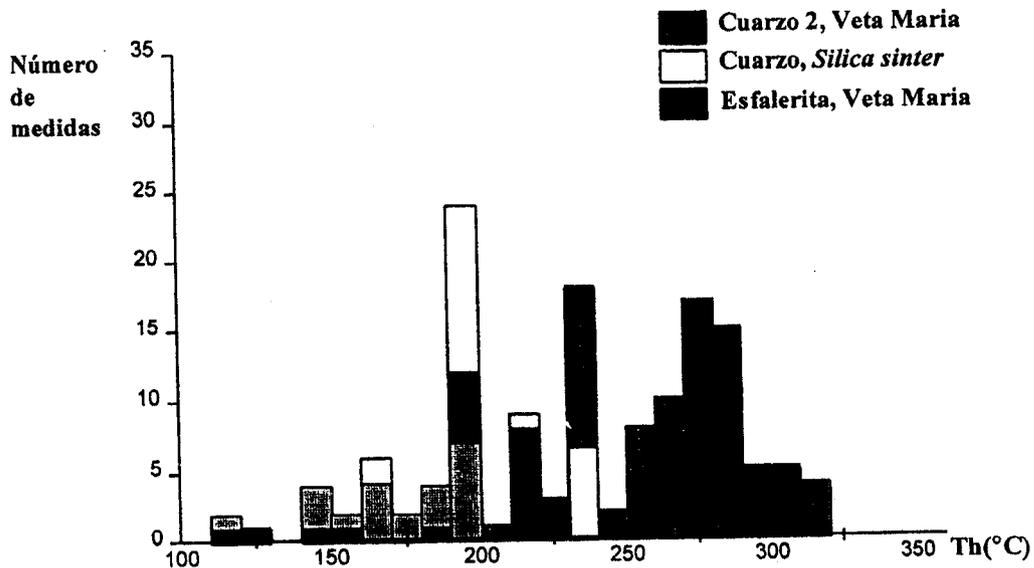


Figura 3. Histograma que muestra temperaturas de homogeneización (Th) de IF estudiadas en minerales del distrito Manantial Espejo, Macizo del Deseado.