



Características Mineralógicas y Petroológicas de la Euclasa del Distrito Minero de Chivor, Colombia.

T. CHAVEZ-GIL.

Instituto de Química, Bloco 2.T. CP: 26077. CEP: 05599-979. USP. Sao Paulo, Brasil.

F.H. ROMERO-ORDOÑEZ

M. RUBIANO L.

Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Apartado Aéreo 14490, Santafé de Bogotá.

R.A. SCHULTZ-GUTTNER

Geociencias. D.M.P. CP: 11348. CEP: 05422-970. USP. Sao Paulo. Brasil.

E-mail: fromero@ciencias.Unal.edu.co.

CHAVEZ-GIL, T.; ROMERO-ORDOÑEZ, F.H.; RUBIANO L., M. & SCHULTZ-GUTTNER, R.A. (1997): Características Mineralógicas y Petroológicas de la Euclasa del Distrito Minero de Chivor, Colombia.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 22, pgs. 171-187, 15 Figs., 2 Fotos, 6 Microfotografías, Santafé de Bogotá.

Resumen: En la parte central de la cordillera Oriental de Colombia, en la denominada región del Guavio, se encuentra el distrito minero de Chivor; allí ocurren mineralizaciones de euclasa, posiblemente de edad terciaria, en vetas dentro de rocas sedimentarias marinas de edad Cretáceo Inferior, pertenecientes a la unidad estratigráfica Calizas del Guavio.

Las características de emplazamiento de esas mineralizaciones sugiere un control tectónico asociado a los sistemas de fallas presentes en el área. La euclasa se presenta en bolsones y vetas frecuentemente asociados a venas de calcita y brechas de falla, en shales negros, argillitas y calizas.

Con el deseo de contribuir al estudio de esas mineralizaciones se realizaron estudios petrográficos de las vetas y minerales asociados. La euclasa se caracterizó mineralógicamente a través de análisis de microscopía electrónica de barrido, absorción y difracción de rayos-X. Los estudios microtermométricos en inclusiones fluidas permitieron definir sus condiciones termobarométricas de formación.

Los resultados de los estudios permitieron concluir que la euclasa del distrito minero de Chivor presenta características mineralógicas similares a las de otras localidades del mundo. Tales análisis definieron el fluido mineralizante como una solución caliente (mayor de 360°C), con salinidad entre 40-50%, en peso, que contiene CO₂ (0,75 mol %) y pequeñas cantidades de N₂. Con relación a las máximas condiciones de presión, estas están entre 900 y 1100 bares. Las condiciones termobarométricas de formación de la euclasa son similares a las de todos los minerales asociados, incluyendo la esmeralda.

Palabras claves: Euclasa, Distrito minero de Chivor, Mineralogía, Colombia.

Abstract: The euclase mines of Colombia are situated in the Central part of the Eastern Cordillera, specifically in the Guavio region. These Be-mineralizations of Tertiary age (?) are found in lower Cretaceous marine sedimentary rocks and belong to the stratigraphic unit "Calizas del Guavio". The field occurrence and geology of these mines imply a tectonic influence of large fault systems. The euclase occurs in voids and nodules, very often accompanied by veins of calcite and fault breccia in carbonaceous argillites and carbonates. To unravel the conditions of formation, fluid and solid inclusions have been investigated by microthermometric studies, IR and micro-Raman spectroscopy, X-ray diffraction and electron microscopy. The fluids were defined as hot solutions (>360°C), of relative high density and salinity (40-50 weigh % NaCl equiv.). The CO₂ content is 0,75 mole % and nitrogen content is even lower.

Key words: Euclase, Chivor Mining District, Mineralogy, Colombia.

INTRODUCCION

El término euclasa se origina de las raíces griegas, *eu*, bueno y *klasis*, rotura (HAUY 1792, en DUD'A & LOBUS, 1989). Con excepción de las zonas esmeraldíferas colombianas, los minerales de berilio [Euclasa, BeAlSiO₄(OH); Bertrandita, Be₂Si₂O₇(OH)₂; Behoita

Be(OH)₂; Berilo, Be₃Al₂Si₆O₁₈; Bromelita, BeO; Crisoberilo, BeAl₂O₄; Fenakita, Be₂SiO₄ y Berilita, Be₃SiO₄(OH)₂·H₂O] se hallan en rocas ígneas félsicas alcalinas junto con rocas de origen metasomático.

La ocurrencia de la asociación mineralógica berilo-euclasa-cuarzo, ha sido relacionada a pegmatitas y greisens' (GALLAGHER & HAWKES 1966; STRAND 1953, entre otros).

Sin embargo, dicha asociación se encuentra en el distrito minero de Chivor, en donde hasta el momento no se ha reportado la presencia de esos tipos de roca. Por lo anterior, se puede afirmar que los minerales berilíferos del área en estudio, se presentan dentro de un contexto geológico único en el mundo.

En Brasil la euclasa se encuentra dentro de esquistos cloríticos, asociada a topacio, corindón y cianita; también se encuentra en cavidades miarolíticas de granitos y pegmatitas, asociada con feldespatos, cuarzo, fluorita, apatito y moscovita (ESCHWEGE 1822; BANK 1980; CHAVES & KARFUNKEL 1996). En Rusia la euclasa se presenta dentro de esquistos moscovíticos asociados a pegmatitas; el mineral se encuentra junto a topacio, corindón, cianita y amatista (KOKSCHAROW 1858, en: VLASOV 1966); en el Perú la euclasa fue hallada dentro de granitos, en conjunto con cuarzo, amatista y rutilo (HAUY 1792, en: VLASOV 1966). De manera general, la euclasa se presenta en cavidades de venas alpinas asociadas con feldespatos, cuarzo, rutilo, carbonatos (calcita y ankerita), clorita y micas.

En Colombia se ha reportado la presencia de euclasa sólo en el distrito minero de Chivor, localizado aproximadamente a 80 km al sudeste de Bogotá. Dicho distrito es importante por la presencia de esmeraldas. Algunas minas de esmeralda de ese sector han sido explotadas desde hace siglos, otras periódicamente. Aún así, la euclasa nunca ha sido explotada con fines comerciales y en la mayoría de los casos se coloca junto con los materiales de desecho en los trabajos de minería.

Los especímenes para este estudio fueron recolectados en las minas de Mundo Nuevo y El Diamante. Otros cristales procedían de las minas de Buenavista y Chivor, todas ellas pertenecientes al mismo distrito minero de Chivor, en la región del Guavio.

Existe varios problemas relacionados con el origen del mineral, principalmente en lo que se refiere a su edad, origen, composición, relación con el Grupo Quetame, localización exacta dentro de la columna estratigráfica, así como mecanismos de transporte y depósito del berilio.

Este trabajo tuvo como objetivo contribuir al conocimiento del origen de la euclasa. Se procuró, durante las fases de la investigación, obtener datos detallados de las inclusiones fluidas y el comportamiento espectrométrico del material, a partir de los cuales tipificamos la euclasa colombiana.

MUESTREO Y METODOS ANALITICOS

Durante el curso de la investigación, se usaron varios métodos analíticos para documentar las características físicas y químicas de las inclusiones fluidas y cristalinas, minerales de saturación presentes en las inclusiones fluidas de la euclasa, así como algunas características de las rocas encajantes. Estas técnicas incluyeron microtermometría,

difracción de rayos-X, espectroscopía micro-Raman, absorción en el infrarrojo y microscopía electrónica de barrido.

Se estudiaron cuatro muestras de mano con pesos de 37, 98, 117 y 250 gramos; en dos de ellas se presentó la asociación esmeralda-euclasa-cuarzo-hematita; en las otras, esmeralda-cuarzo-euclasa (Fotografías 1 y 2). Así mismo, se analizaron 11 cristales de euclasa con longitudes entre 0,7 y 3,4 cm, 4 de ellos tallados; algunos cristales fueron donados por los mineros del área, así como por la firma Gemtec Ltda, la cual cedió algunas muestras de interés gemológico.

Se determinó la densidad de los minerales usando una balanza hidrostática marca Ohaus. Se midió el peso en el aire del material, dividido por la diferencia entre ese mismo peso y el del material dentro del agua.

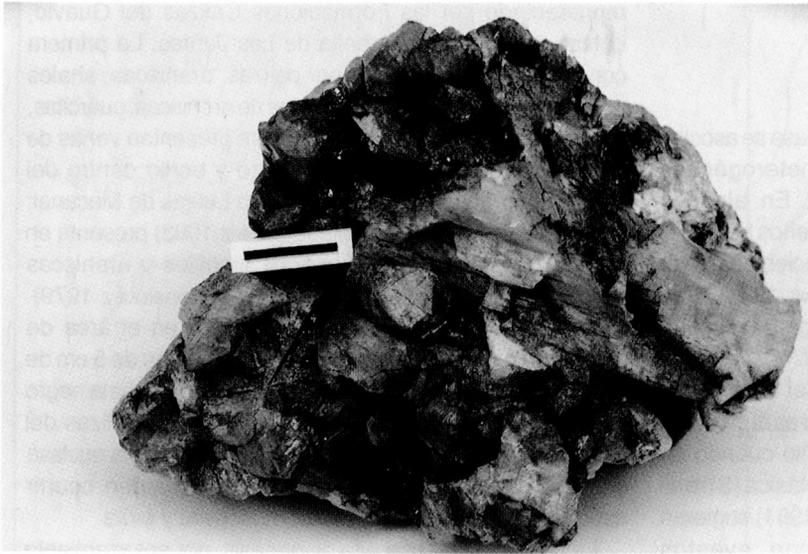
El espectro de absorción de la euclasa se obtuvo mediante reflexión perpendicular de la luz incidente al plano de la muestra, a través de un espectrofotómetro Guide Wave, modelo 260, equipado con un sistema de luz monocromática conducida a través de fibra óptica; este equipo permite realizar un levantamiento electrónico tanto por transmisión como por reflexión.

En el trabajo se usaron diversos métodos ópticos. Los cristales obtenidos, incluyendo esmeralda, euclasa, cuarzo, calcita y fluorita, fueron examinados y seleccionados en el laboratorio. En esta fase fueron escogidos los especímenes que contenían el mayor número de inclusiones fluidas y cristalinas.

Inicialmente todos los minerales fueron examinados bajo una lupa binocular para el estudio de los diversos tipos de inclusiones. Esa técnica permitió definir la morfología y orientación cristalográfica, tamaño, presencia de minerales de saturación, número de fases existentes en las inclusiones fluidas y proporciones entre las diversas fases y tipos de fracturas. La información obtenida permitió establecer la secuencia genética de las inclusiones fluidas y cristalinas (primarias, secundarias y pseudo-secundarias).

Las rocas encajantes y las venas mineralizadas fueron estudiadas en secciones delgadas y pulidas, usando un microscopio Carl Zeiss, modelo MC63A, con el cual se tomaron las microfotografías de las láminas petrográficas y de las inclusiones presentes en los cristales. Para el estudio de las inclusiones fluidas, los cristales seleccionados fueron cortados en forma de láminas y posteriormente pulidos en ambas caras, lo que terminó por reducir las láminas a 3 mm de espesor.

La microtermometría fue la técnica analítica más usada en el estudio de las inclusiones fluidas, permitiendo la observación y registro simultáneo de las modificaciones sufridas por las fases presentes en las inclusiones fluidas sobre congelamiento y calentamiento (POTY *et al.* 1976; HOLLISTER & CRAWFORD 1981).



Fotografía 1. Muestra de mano de la asociación euclasa-esmeralda-cuarzo, encontrada en el Distrito Minero de Chivor. Los cristales azules son euclasa y los verdes esmeralda. Escala = 1 cm.



Fotografía 2. Detalle de la fotografía anterior. Es clara la asociación mineralógica entre los minerales euclasa y esmeralda.

Los estudios microtermométricos usan platinas especiales las cuales se adaptan al microscopio petrográfico común, permitiendo que las muestras puedan ser congeladas o calentadas. Los datos microtermométricos fueron

obtenidos a través de una platina Chaix-meca, modelo MTM 85. En este equipo se registraron cambios de temperatura entre -180°C y 500°C . Esa variación de temperatura provoca cambios de las fases presentes en las inclusiones,

siendo posible su observación y registro simultáneo en un termómetro digital.

Las variaciones de fase y temperatura registradas, se comparan con las establecidas previamente y reportadas en la literatura (HOLLISTER & CRAWFORD 1981; WOPENGA *et al.* 1990). Esos datos microtermométricos permiten caracterizar la salinidad, presión, temperatura, composición y densidad de los fluidos mineralizantes en la época de aprisionamiento de la inclusión. Consecuentemente, es posible establecer relaciones entre la mineralización y los fluidos responsables de su formación.

En algunas inclusiones fluidas en cristales de cuarzo y berilo (esmeralda y euclasa), no fue posible identificar gases, por estar en poca cantidad, siendo necesaria su identificación mediante espectroscopía micro-Raman. El efecto Raman es la modificación de la amplitud de onda de una radiación electromagnética que es difundida por una superficie. El fenómeno se usa en los espectrógrafos Raman donde se mide la amplitud de onda de la radiación reflejada, obteniéndose así información respecto a la estructura molecular de la sustancia reflectora.

Para el estudio de espectroscopía micro-Raman, las muestras de cuarzo y berilo fueron preparadas siguiendo la metodología empleada por WOPENGA & PASTERIS (1986). A través de ella se determinó la presencia de N_2 y se confirmó la existencia de CO_2 en las inclusiones. Los estudios fueron realizados en un espectroscopio micro-Raman Dilor, modelo XY.

Para el análisis por difracción de rayos-X, las muestras fueron fragmentadas en un mortero Albich y luego pulverizadas en un almofariz de acero, para eliminar posibles contaminaciones. Se usó un difractorómetro Carl Zeiss, modelo URD6.

La microscopía electrónica de barrido (MEB) se usó con el objeto de identificar fases minerales presentes dentro de la euclasa, así como para

confirmar la presencia de dicho mineral. Para tal estudio se usó un sistema compuesto por un MEB, marca Jeol-T330A y un EDS serie II de Noran Instruments.

CONTEXTO GEOLOGICO

La mayoría de las mineralizaciones de euclasa se asocian a rocas metamórficas o pegmatitas heterogéneas relacionadas con una fase magmática. En algunas localidades el mineral se encuentra en pequeños bolsones ricos en micas, cerca del contacto con el núcleo cuarzoso de la pegmatita (CASSEDANNE & CASSEDANNE 1974). Ese clásico ambiente geológico ha permitido sugerir un origen pegmatítico para la formación de la euclasa.

Entre las teorías referidas al origen del mineral se destacan aquellas que sugieren que la euclasa es el producto tardío de la alteración hidrotermal del berilo cuando se encuentra asociado con bertrandita y mica potásica (STRAND 1953, *en*: VLASOV 1966). FRANZ & MORTEANI (1981) sugieren que ese mineral está relacionado con eventos pospegmatíticos de alta presión o una cristalización metamórfica de alta temperatura. Recientemente CHAVES & KARFUNKEL (1996) han reportado la presencia de euclasa en el distrito minero de Ouro Preto (Brasil), dentro de una marga oscura, asociada a topacio imperial; su origen es controvertido y no se ha explicado su presencia y asociación mineralógica.

La euclasa del distrito minero de Chivor se ha formado dentro de un ambiente geológico único, hasta hoy no reportado en la literatura especializada. Debido a ese hecho, no ha sido posible asociarla con depósitos de otras localidades.

En el flanco oriental de la Cordillera Oriental de Colombia, en el Departamento de Cundinamarca, específicamente en el denominado "Distrito Minero de Chivor", afloran rocas sedimentarias paleozoicas pertenecientes al Grupo Farallones y cretáceas del Grupo Cáqueza (Fig. 1). Al Grupo Farallones se le han asignado edades entre el Carbonífero Inferior (ROYO & GÓMEZ 1945), Devoniano-Pensilvaniano (BÜRGL; DE PORTA; HUERTA, *en*: SEGOVIA 1967), Desmoinesiano Inferior-Pensilvaniano Medio (FORERO, *en*: CANO 1986) y Carboniano (GUTIÉRREZ, *en*: ESCOBAR 1975). Para las rocas del Grupo Cáqueza se han asignado edades entre el Titoniano-Berrasiano Superior, Titoniano-Valangiano y Hauteriviano (ULLOA & RODRÍGUEZ 1979).

Dentro de las rocas paleozoicas presentes en el área de estudio, encontramos areniscas cuarzosas, arcillolitas, limolitas, calizas, dolomitas, argilitas con intercalaciones de calcita y cuarzo, calizas con intercalaciones de argilita y calcita, conglomerados con fragmentos de caliza, argilita y cuarcita, calizas con pirita y cuarcitas con intercalaciones de argilita (SEGOVIA 1967; ESCOBAR 1975; GARNICA &

PARRADO 1987; GUERRERO 1988, entre otros).

En la zona de trabajo afloran rocas del Grupo Cáqueza, representado por las Formaciones Calizas del Guavio, Lutitas de Macanal y Arenita de Las Juntas. La primera constituida principalmente por calizas, areniscas, shales negros y conglomerados con cantos de areniscas, cuarcitas, limolitas y arcillolitas; en ocasiones se presentan venas de oligoclasa, calcita, dolomita, cuarzo y berilo dentro del shale negro y/o caliza. La Formación Lutitas de Macanal, de edad Valangiano-Berriasiano (FABRE 1983) presenta en el área de estudio lutitas negras, limolitas y areniscas (ESCOBAR 1975; GUERRA 1972; ULLOA & RODRÍGUEZ 1979).

La presencia de cristales de euclasa en el área de estudio se restringe a pequeñas vetas menores de 5 cm de espesor. Las rocas encajantes son argilita gris, shale negro y areniscas amarillas-grises de la Formación Calizas del Guavio. Comúnmente los minerales asociados a la euclasa son esmeralda y cuarzo; sin embargo, pueden ocurrir asociaciones con fluorita, albita, muscovita y pirita.

La presencia de una alta diagénesis, por enterramiento y compactación, en la secuencia paleozoica, generó el desarrollo incipiente de esquistosidad en algunos materiales, así como la formación de otros (clorita, muscovita y epidota) que podrían sugerir un cierto grado de metamorfismo, lo que permite explicar la presencia de minerales berilíferos. Aun así, como se comentará más adelante, la euclasa, esmeralda y minerales asociados, no presentan evidencias mineralógicas y/o termobarométricas que permitan sugerir un origen a partir de fluidos metamórficos o de una asociación con tales fenómenos.

MINERALOGIA

La euclasa, $\text{BeAlSiO}_4(\text{OH})$, es un mineral bastante raro en la naturaleza. Químicamente se define como un ortosilicato de berilio y aluminio con un radical (OH). Teóricamente presenta una composición química, con porcentajes en peso de SiO_2 : 41,34%; Al_2O_3 : 35,18%; BeO : 17,28% y H_2O : 6,20% (VLASOV 1966).

Cristaliza en el sistema monoclinico, simetría monoclinica-prismática. Grupo espacial $C_2^5h - P2_1/c$; $a_0 = 4,63$; $b_0 = 14,27$; $c_0 = 4,76 \text{ \AA}$; $a_0:b_0:c_0 = 0,324:1:0,334$; $\angle B = 100^\circ 16'$; $z = 4$ (GOSSNER & MUSSGUG 1929; BISCOE & WARREN 1933, *en*: VLASOV 1966). El diseño de la estructura de la euclasa presenta forma de cubo con un enrejado de aniones. Por el hecho de presentar tetraedros aislados de SiO_4 , es definida como un ortosilicato; sin embargo, por la presencia de canales de tetraedros de berilio $[\text{Be}(\text{O},\text{OH})_3]$, puede considerarse como una "estructura modelo" de los metasilicatos (Fig. 2).

La euclasa presenta cristales prismáticos con formas cristalinas variadas (Fig. 3); sus formas cristalográficas fueron estudiadas por DANA en 1892 (VLASOV 1966) y sus

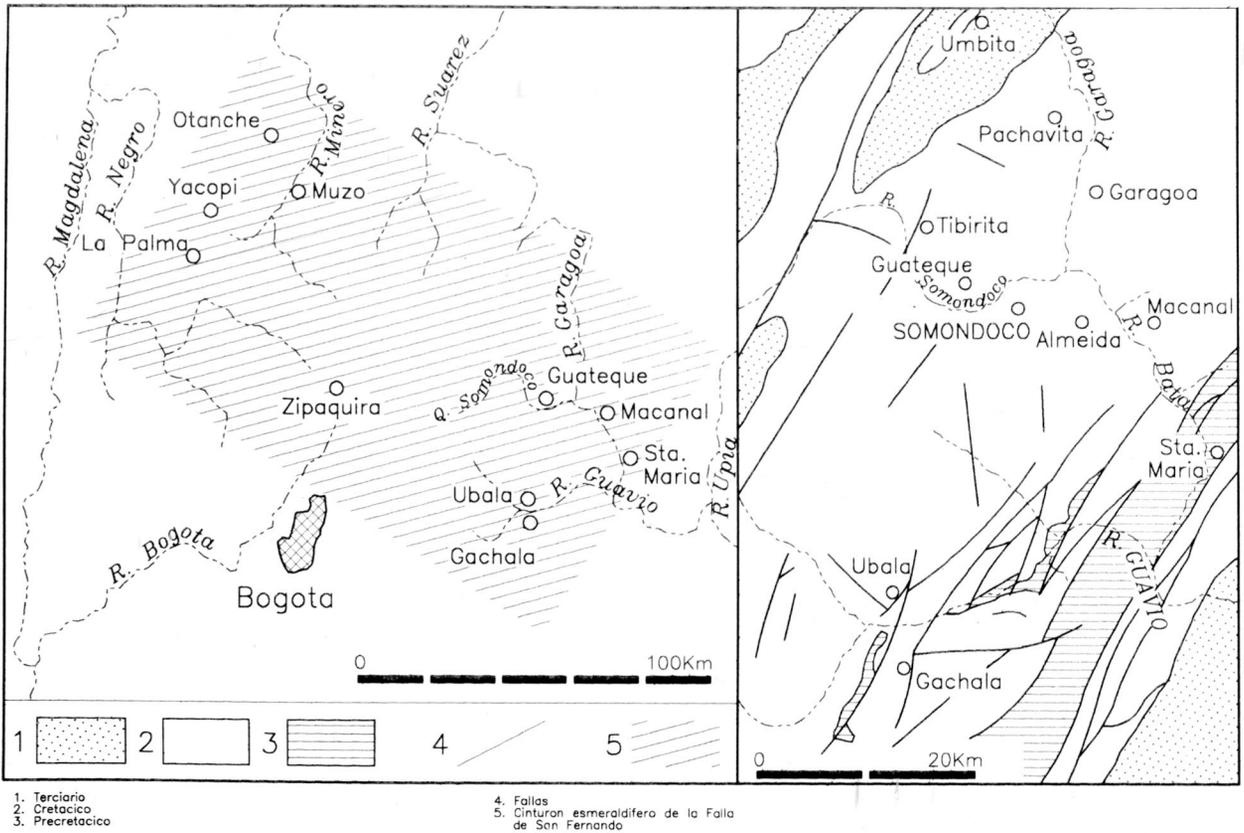


Fig. 1. Contexto geológico del Distrito Minero de Chivor, con las poblaciones de Gachalá, Guateque, Macanal, Santa María y Ubalá (modificado de ULLOA & RODRÍGUEZ 1979 y KOZLOWSKI *et al.* 1988).

fases detalladamente descritas por HINTZE en 1897 (en VLASOV *op cit.*).

Los cristales de euclasa del área de Chivor (Fotografías 1 y 2) presentan una densidad de 3,0 - 3,10, valores similares a los exhibidos por la euclasa de otras partes del mundo: 3,05 - 3,10 (Urales); 3,089 - 3,097 (Brasil); 2,987 - 2,992 (Colorado).

En la región de Chivor, se encuentran frecuentemente cristales con coloraciones verde-azulada, verde oliva, verde "cebolla" y verde sauce; algunos de estos minerales son: euclasa (dureza 7,5), apatita verde (dureza 5), calcita verde (dureza 3, 5), fluorita verde (dureza 4), aguamarina (dureza 7,5) y esmeralda; en ocasiones alguno de ellos se confunde con cianita, ankerita y turmalina verde. Los estudios de difracción de rayos X (Fig. 4) y microscopía electrónica de barrido (Microfotografía 1 y Fig. 5) permitieron identificar uno de esos cristales de color azul-verdoso como euclasa.

Los cristales de euclasa presentan coloraciones verde azulada, verde clara, azul clara, azul verdosa, verde pálido y azul pálido. Lustre vítreo, ocasionalmente grasoso al tacto. Al ser observado al microscopio petrográfico el mineral es casi transparente y presenta pleocroismo azulado-verdoso y amarillento-azulado; es biáxico positivo con 2v

de 49°27'.

ANÁLISIS DE ABSORCIÓN

El espectro de la euclasa se obtuvo mediante reflexión perpendicular de la luz incidente al plano de la muestra. La Fig. 6 muestra su espectro con cinco bandas de absorción.

En $\lambda_{\text{máx}} = 412 (\pm 2\text{nm})$, se encuentra una banda fuerte atribuida a la absorción del cobre (Cu). Una segunda y amplia banda con absorción máxima en $\lambda_{\text{máx}} = 570 \text{ nm} (\pm 2\text{nm})$, corresponde a la presencia de cromo (Cr). En la región del infrarrojo próximo, se presenta una aguda banda de absorción media localizada en $\lambda_{\text{máx}} = 980 \text{ nm} (\pm 2\text{nm})$ atribuida a la presencia de hierro (Fe). En longitudes de onda de menor energía, se presentan dos bandas de absorción, una en $\lambda_{\text{máx}} = 1394 \text{ nm} (\pm 2\text{nm})$, con baja absorción atribuida a la presencia de aluminio (Al) y otra bien estructurada con alta energía de absorción localizada en $\lambda_{\text{máx}} = 1430 \text{ nm} (\pm 2\text{nm})$ asignada al silicio (Si).

Las dos primeras bandas en la región del visible, fueron caracterizadas por DUROC-DANNER (1996) en un trabajo realizado sobre inclusiones trifásicas en euclasa. Las tres bandas en la región del infrarrojo, corresponden al análisis

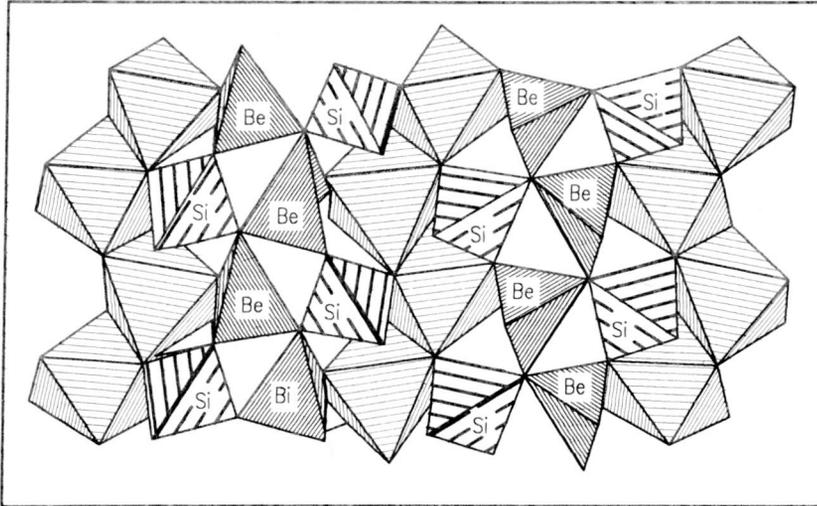


Fig. 2. Estructura de la euclasa (BELOV 1950).

puede contener una o más fases sólidas (minerales de saturación). La mayoría de las inclusiones contiene proporciones volumétricas de 75% de una solución acuosa salina, aproximadamente 10-15% de $CO_{2(g)}$, menos del 3% de $CO_{2(l)}$ y aproximadamente 12-20% de halita como mineral de saturación.

Es interesante mencionar cómo las características morfológicas y físico-químicas de las IF de la euclasa son similares a las de las IF en algunos minerales asociados: calcita (Microfotografía 3), esmeralda (Microfotografía 4), cuarzo (Microfotografía 5) y fluorita (Microfotografía 6), lo que sugiere que tales minerales fueron originados a partir del mismo fluido mineralizante y bajo condiciones termodinámicas similares.

Antes de discutir los datos microtermométricos de la euclasa de Chivor, deben resaltarse las dificultades en la observación de los fenómenos de cambios de fase debido a la alta salinidad en las IF; caso semejante se presenta en las esmeraldas y el cuarzo (ORDÓÑEZ *et al.* 1992).

La salinidad es tan elevada que, muchas veces al enfriar rápidamente la IF, los fluidos permanecen en estado metaestable, no llegando a sufrir congelamiento, aun cuando la muestra se someta a $-180^{\circ}C$. Otro fenómeno observado en algunos enfriamientos rápidos, es la formación de nuevas fases sólidas, tales como hidratos de sal u otros sólidos provenientes de iones disueltos en altas concentra-

químico cualitativo realizado por ese mismo autor en muestras de aguamarina de Tongafeno, Madagascar (1989). Debido a la presencia de Fe, Al y Si, la euclasa puede ser confundida con aguamarina, puesto que el contenido de hierro, en forma de Fe_2O_3 (WEBSTER 1987), da a las gemas la tenue coloración azul-verdosa. Sin embargo la presencia de otros iones metálicos que absorben la luz monocromática en el visible, caso del Cu y Cr, es característica en el espectro de la euclasa.

Igualmente se observa en la Fig. 6, que a partir de 700 nm hacia la región del infrarrojo, el espectro presenta un conjunto de franjas. Ellas son producidas por la interferencia de radiación reflejada internamente entre placas de una celda, con la radiación transmitida directamente a través de la misma celda (STINE 1970).

2) con orientaciones y formas variables. Las IF se presentan paralelas, perpendiculares e inclinadas con relación al eje cristalográfico c del mineral; algunas de ellas constituyen grupos aislados; otras cicatrizan fracturas a lo largo de las líneas de crecimiento del cristal.

Las IF estudiadas presentan dimensiones que varían de pocas micras hasta más de 0,2 mm, pudiendo presentar formas regulares, constituyendo cristales negativos (canales, formatos regulares, etc.) o formas irregulares con fenómenos de escape. Petrográficamente fueron reconocidas algunas inclusiones cristalinas presentes en la euclasa; entre ellas podemos mencionar calcita, cuarzo, dolomita y apatito.

La euclasa presenta, a temperatura ambiente, IF trifásicas, compuestas por cantidades variables de $CO_{2(l)}$, $CO_{2(v)}$, $N_{2(v)}$ y una solución salina que

INCLUSIONES FLUIDAS (IF)

Datos geológicos, combinados con estudios microtermométricos en IF, permiten obtener importante información acerca de las características del fluido mineralizante y su posible origen.

El estudio de los cristales de euclasa y sus láminas pulidas en las dos caras, revelaron la presencia de un alto número de IF trifásicas (Microfotografía

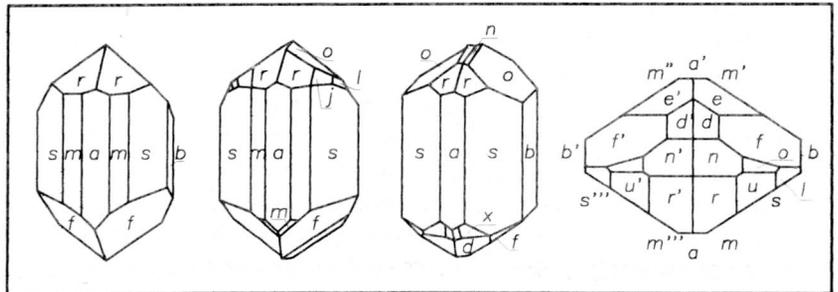


Fig. 3. Cristales de euclasa (DANA 1892).

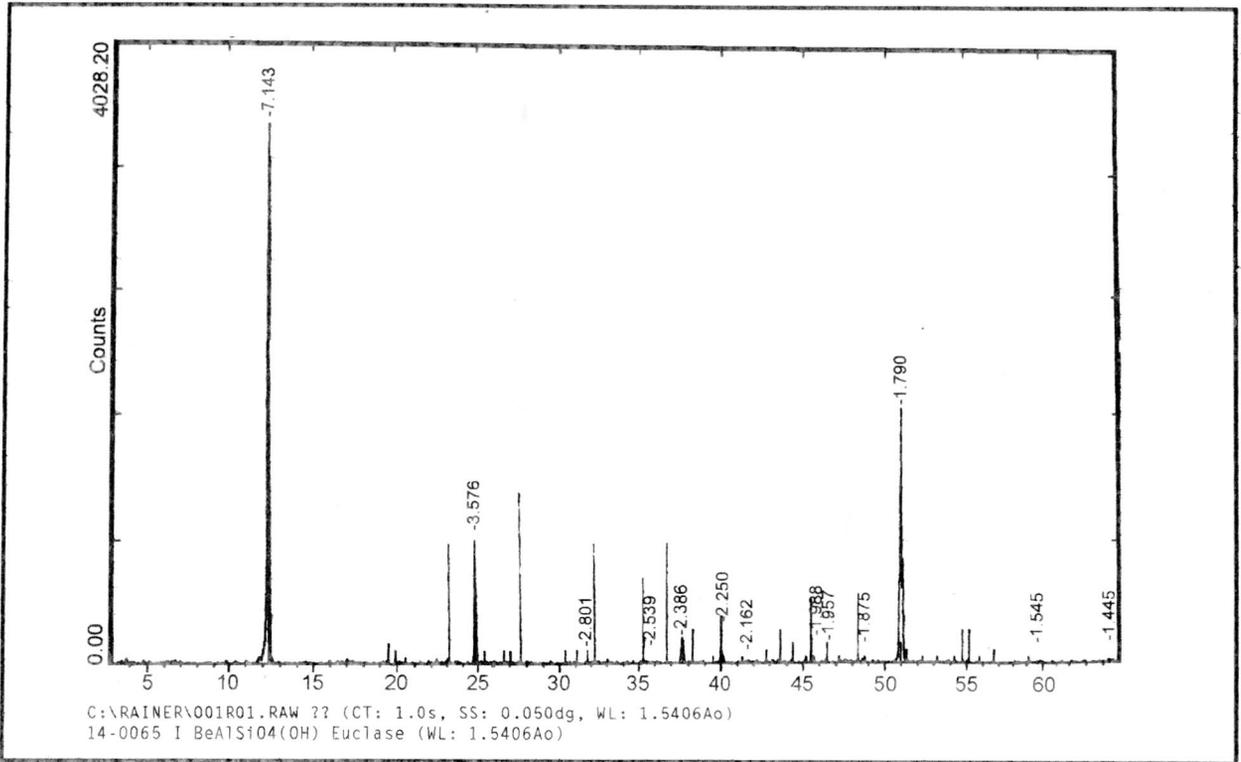


Fig. 4. Difractograma de la euclasa del Distrito Minero de Chivor.

ciones dentro de la fase acuosa de la IF, acentuando de esta manera la dificultad de observación de ciertas transformaciones en las fases de la inclusión. Por tal motivo, hubo necesidad, en la mayoría de las ocasiones, de congelar lentamente cada inclusión,

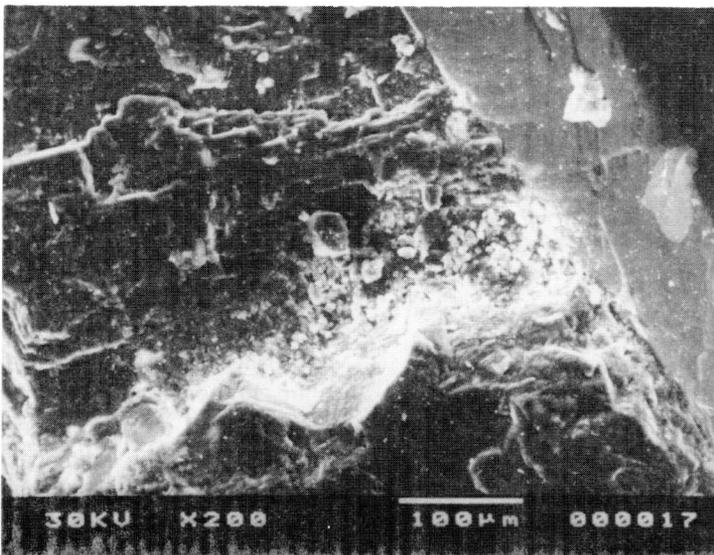
lo que aumentó las dificultades del estudio.

Varias IF presentaron la fase gaseosa bastante oscura, sugiriendo la posible existencia de otros componentes volátiles además del CO_2 , los cuales no pudieron ser

determinados por la microtermometría. En tales circunstancias, las muestras se analizaron por espectroscopía micro-Raman, identificándose en algunas muestras la presencia de N_2 junto a la fase carbónica, como se discute más adelante.

Muchas veces, el propio CO_2 fue difícil de observar debido a la presencia de bordes oscuros alrededor de la bola de gas, los cuales pueden ser el resultado de reflexiones internas debido al espesor de la IF, baja densidad del vapor y diferencia entre los índices de refracción del gas y la salmuera.

Se analizaron 80 IF en la euclasa y el cuarzo asociado; los cristales de esos minerales fueron cortados en forma paralela y perpendicular al eje cristalográfico c . Las temperaturas de fusión del CO_2 presentaron una distribución regular entre los $-57,4$ hasta los $-56,6^\circ\text{C}$ (Fig. 7); las temperaturas inferiores a los $-56,6^\circ\text{C}$ (punto triple del CO_2 puro) sugieren la presencia de otros compuestos



Microfotografía 1. Registro de microscopía electrónica de barrido de la parte superficial de un cristal de euclasa del Distrito Minero de Chivor.

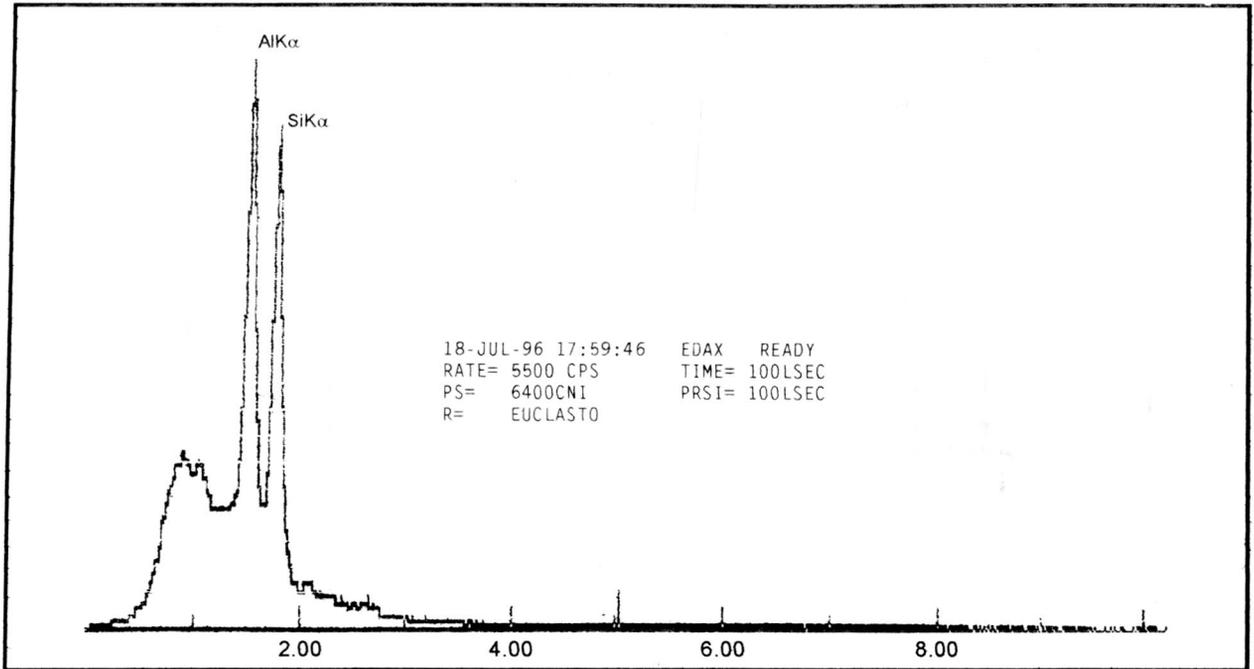


Fig. 5. Espectro de la euclasa estudiada, identificada por microscopía electrónica de barrido. El elemento químico Be no aparece, pues la ventana del detector está construida de Berilio.

volátiles disueltos en la fase carbónica de la inclusión; dichos elementos no pudieron ser determinados por la microtermometría.

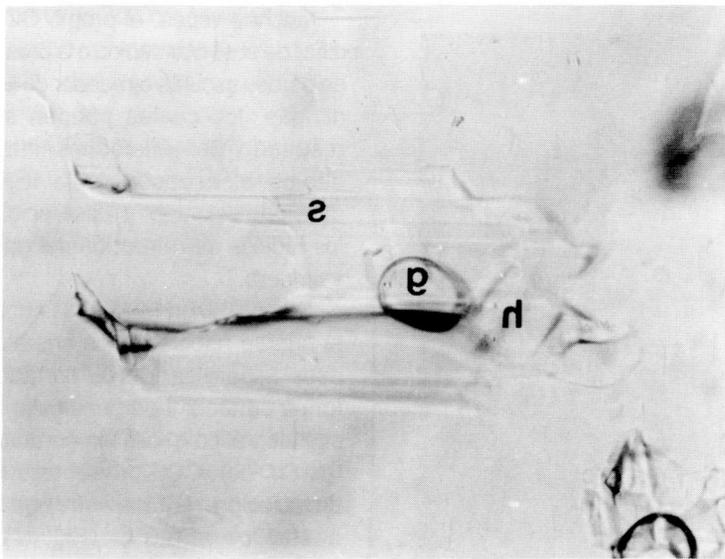
Las fases volátiles de esas IF fueron determinadas por espectroscopía

micro-Raman. En general, los resultados cualitativos revelaron la presencia de N_2 y confirmaron la existencia de CO_2 ; se descartó la presencia de H_2S y CH_4 en todas las muestras estudiadas. El CO_2 y el N_2 ,

fueron identificados en todas las IF, presentando en el espectro los picos 1385,9; 1283,2; 1281,6 y 1383,5 cm^{-1} , correspondientes al CO_2 (WOPENGA *et al.* 1990). Los picos que definen el N_2 dentro del espectro, son 2325,8 y 2326,5. La Fig. 8 muestra los espectros para tres IF, dentro del cuarzo y la esmeralda, asociados con la euclasa.

La temperatura de homogeneización del CO_2 en IF de los minerales estudiados, donde fue posible observar el fenómeno, varía entre 19 y 25,5°C (Fig. 9), con homogeneización para la fase líquida. Esos valores confirmaron la densidad del CO_2 (0,76 g/cc) sugeridos por ORDÓÑEZ *et al.*, 1992. Las IF presentaron temperaturas de desaparición de la fase gaseosa global entre 170 y 250°C (Fig. 10). Las temperaturas de homogeneización total de la inclusión, marcadas por la desaparición de los cristales de sal, estuvieron entre 330 y 357°C (Fig. 11).

Para la presentación de los análisis y datos microtermométricos, es necesario recurrir a una serie de



Microfotografía 2. Inclusión fluida trifásica presente en un cristal de euclasa estudiado. Tal IF presenta una salmuera que corresponde a la fase líquida (s), una fase gaseosa (g), constituida por $CO_2 - N_2$, y una fase sólida representada por un cristal de halita (h).

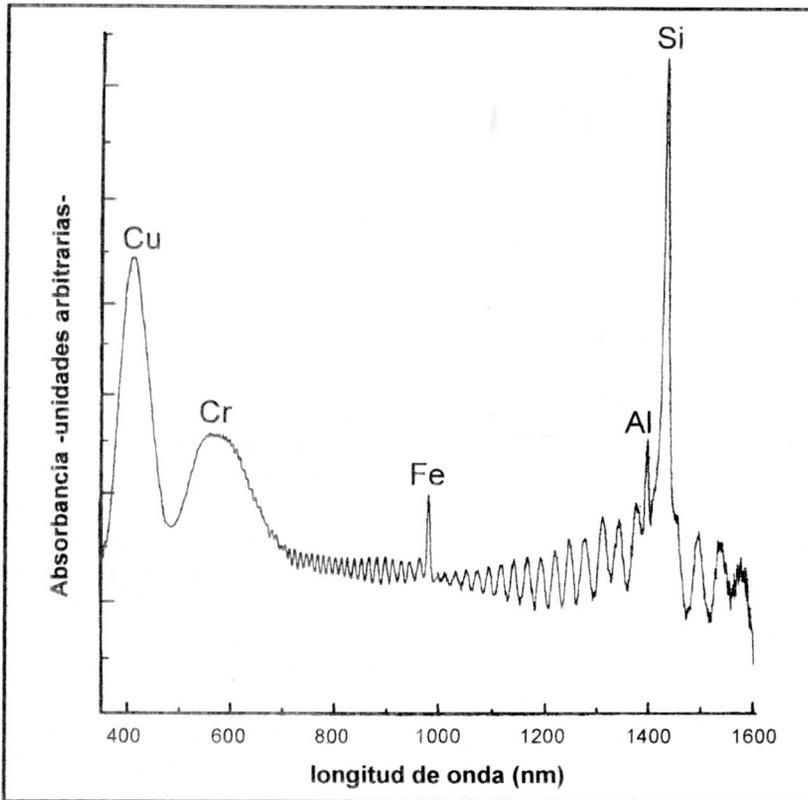


Fig. 6. Espectro de absorción a temperatura ambiente (290°K) de un cristal de euclasa del Distrito Minero de Chivor.

simplificaciones que permiten delimitar, tanto los valores mínimos de salinidad de las IF, como la representación conjunta de los iones de comportamiento semejante (halita y silvita, cloruros de calcio, magnesio, manganeso y aluminio). De esa manera, un sistema complejo puede ser estudiado y representado en sistemas más simples, como el sistema $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$, investigado por VANKO *et al.* (1988).

En la determinación de la salinidad y composición química de las salmueras incluidas, se estudiaron las IF de mayor tamaño, que no presentaron fenómenos de escape y estrangulamiento. El congelamiento fue ejecutado lentamente; de esa manera se determinaron las temperaturas de fusión del hielo (entre -26 a -33°C) y del punto eutéctico (-59 a -61°C).

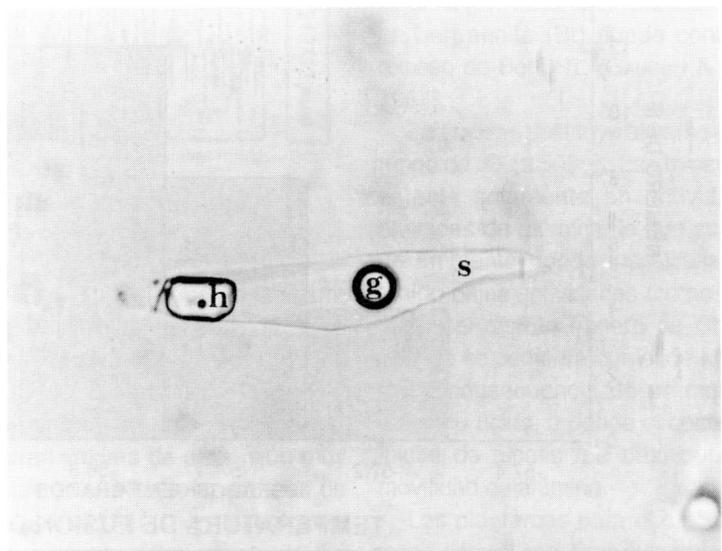
La Fig. 12 muestra el diagrama composicional $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$, para las IF de la euclasa del distrito minero

de Chivor. En ella se observa la alta salinidad y la relación entre los iones monovalentes y polivalentes. Es clara la alta concentración de NaCl (28-36%) y de CaCl_2 (5-14%).

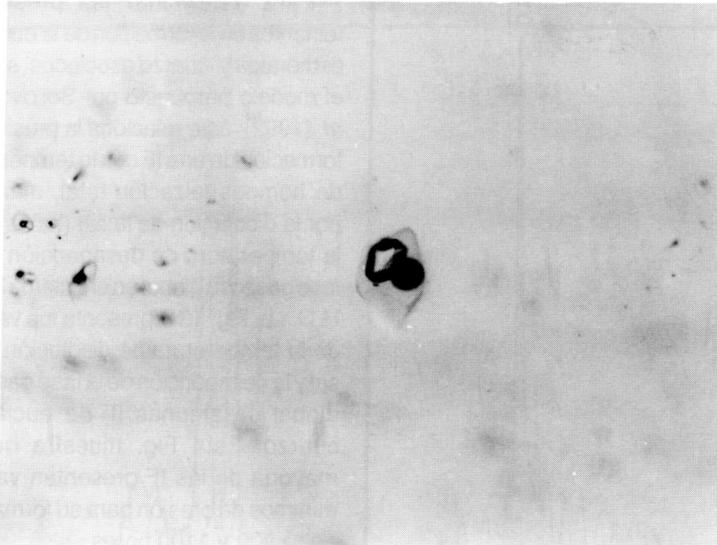
Para determinar las presiones reinantes en la formación de la euclasa, esmeralda y cuarzo asociados, se usó el modelo propuesto por SOLOVOVA *et al.* (1992); éste relaciona la presión de formación de una IF con la temperatura de homogeneización total, marcada por la disolución de la sal (halita), con la temperatura de desaparición de la fase gaseosa global en el sistema $\text{NaCl-H}_2\text{O}$. La Fig. 13 representa los valores de la temperatura de disolución de la sal y la desaparición de la fase gaseosa global de algunas IF de euclasa y cuarzo. Esta Fig. muestra que la mayoría de las IF presentan valores mínimos de presión para su formación, entre 900 y 1100 bares.

Las formas de homogeneización de las IF en minerales, usualmente indican datos precisos, que pueden ser utilizados para establecer fajas de temperatura de homogeneización en el proceso de formación del mineral. En este caso los valores mínimos de temperatura pueden ser usados para tal interpretación. Esto significa temperaturas entre 330 y 357°C.

Ciertos fenómenos geológicos podrían haber contribuido al aumento de esa temperatura, como los procesos tectónicos de la Orogenia Andina, los cuales podrían estar acompañados por



Microfotografía 3. Inclusión fluida trifásica dentro de un cristal de calcita, asociado a la mineralización de euclasa. Su composición química es similar a la presentada por las IF de la euclasa. Halita (h); salmuera (s) y fase gaseosa (g).



Microfotografía 4. Inclusión fluida trifásica presente en un cristal de esmeralda del Distrito Minero de Chivor. El número de fases y composición química de sus IF es similar a las encontradas en la euclasa.

la transformación de energía mecánica en calor.

Los estimativos de soterramiento de esmeraldas en el cinturón esmeraldífero oriental, varían entre 700 y 2500 m, o sea, presiones entre 200 y 742 bares, considerando un sedimento tipo shale con densidad de

2,5 g/cc. En el distrito minero de Chivor los datos sobre las profundidades de soterramiento de las mineralizaciones berilíferas no son concretos; sin embargo, al considerar que el fluido mineralizante fue el mismo en las dos regiones, como se demuestra por las características físico-químicas de las

IF de esos minerales en ambas áreas, la profundidad de soterramiento podría tener un valor semejante.

Los estimativos de la profundidad de soterramiento, pueden ser un poco más altos de lo que realmente eran, debido posiblemente a que las mineralizaciones se presentan en venas, diques y lentes que cortan los estratos que las contienen, lo que aumenta la presión confinante dentro de las inclusiones fluidas (HOLLISTER & CRAWFORD 1981).

La composición química del líquido mineralizante fue determinada con ayuda de las IF. La concentración total de sales se encuentra entre 35 y 45% en peso, siendo los principales componentes $Cl > Na > Ca > Al > K > Mg$. Las concentraciones de Na, Ca, Br y Cl de las soluciones inclusas en los minerales estudiados, al ser comparadas con aguas recientes del tipo Na-Ca-Cl y aguas hidrotermales de áreas continentales y marinas, se muestran como sales equivalentes a salmueras de cuencas sedimentarias. Se descarta un origen geotérmico para esas mineralizaciones, pues las IF en esos

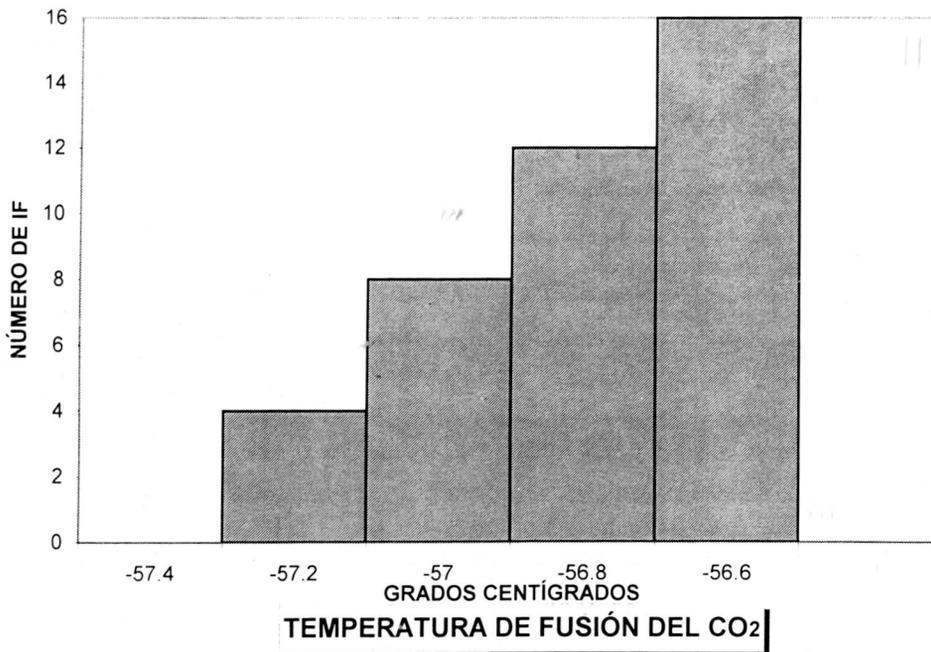


Fig. 7. Histograma de frecuencia para las temperaturas de fusión del CO_2 presente en las IF de la euclasa. Los valores de las temperaturas de fusión son menores de $-56,6^{\circ}C$, que corresponden a la temperatura de fusión del CO_2 puro, sugiriendo la presencia de otros componentes volátiles en la fase gaseosa de la IF.

APPLICATIONS LAB D.I.L.O.R. Version 2.00 IBM	OPERATOR Marcos DATE 07-15-1992 SAMPLE Quartzo Co GRATING 1800 MODE MULTICHANNEL REMARK chivor	EXCITATION (na) 514.53 LASER POW. (mW) 500 FOREMONO (cm-1) 1300.0 SPECTRO (cm-1) 1300 SLIT WIDTH (um) 100	SPECT. SLIT WIDTH (cm-1) 3.35 DETECTOR (nbr of diodes) 1024 FILTER INTEGRATION TIME (s) 5 NUMBER OF ACCUMULATIONS 16
--	---	---	--

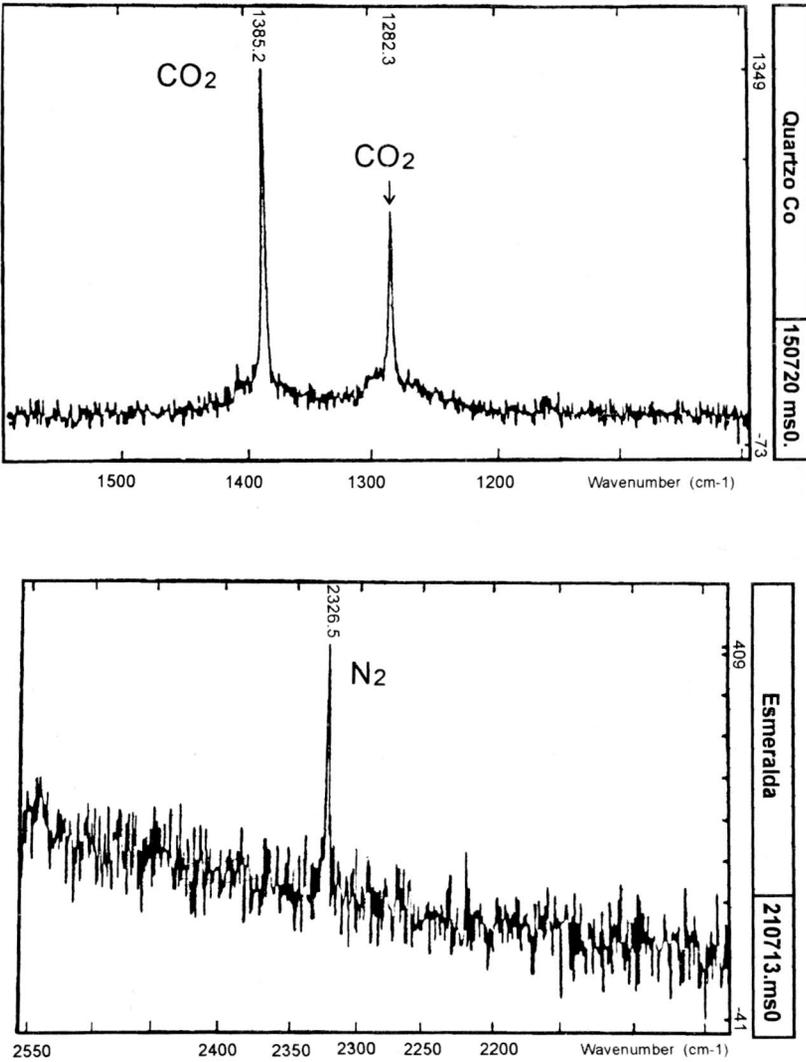


Fig. 8. Espectros micro-Raman de IF presentes en esmeralda y cuarzo de Chivor. Se destacan los picos correspondientes al CO₂ y N₂.

1994), lo que nos permite sugerir que la euclasa, esmeraldas, y algunos minerales asociados se formaron en niveles corticales muy semejantes.

ESTABILIDAD DE LA EUCLASA

Las propiedades termodinámicas pueden ser usadas para el cálculo de la estabilidad de las fases. En el caso de algunos minerales berilíferos, podemos realizar algunas interpretaciones mineralógicas y petrológicas a través del sistema BASH, BeO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (Fig. 14), en conjunto con otra información geológica, tal como equilibrio de fases, asociaciones mineralógicas y datos microtermométricos.

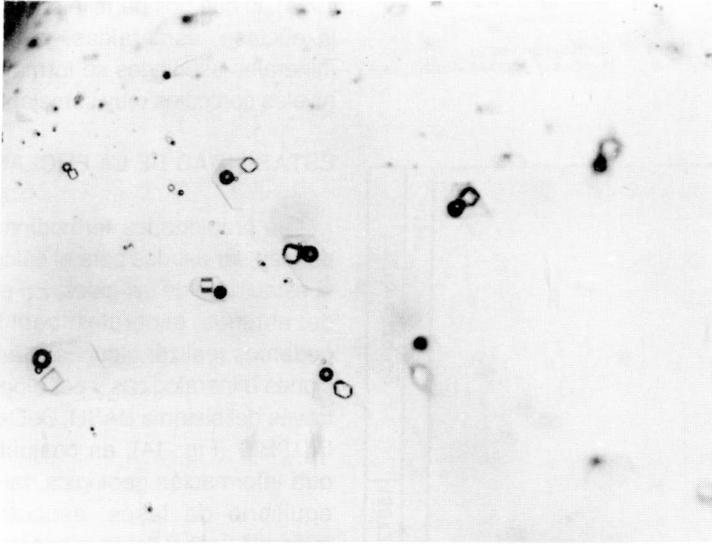
De las fases presentes en la Fig. 14, solamente el berilo (Be) presenta una composición variable (BARTON 1986). Los aluminosilicatos (Als) pueden aceptar pequeñas cantidades de metales de transición; la caolinita (Ka), pirofilita (Py) y el diásporo (Di), pueden contener pequeñas cantidades de halógenos sustituidos por hidróxidos; aún así, su composición varía poco. El crisoberilo (Ch) puede contener hierro, cromo y manganeso; sustituidos por aluminio, pero ese cambio puede ser muy pequeño. La euclasa (Eu) y fenakita (Ph) no aceptan sustituciones. La bertrandita (Bt) puede contener exceso de Be(OH)₂ (GANGULI & SAHA 1967).

La euclasa sustituye al berilo en un rango de 300 a 500°C. Ese mineral es estable solamente en actividades elevadas de alúmina, lo que sugiere un ambiente donde los álcalis han tenido bajas actividades (como es el caso del distrito minero de Chivor, cuando se compara con el de Muzo), como consecuencia de un metasomatismo ácido, o donde el contenido inicial de álcalis fue bajo con alta movilidad de alúmina.

Los diagramas para el cálculo de fases se realizan experimentalmente de acuerdo a la paragénesis y se comparan con las características

sistemas presentan muy baja salinidad. La alta salinidad en las IF de esos minerales (sistema químico Na-Ca-Cl con altas concentraciones de cloro y bromo), sugiere que el fluido mineralizante se originó a partir de aguas connatas que se desarrollaron y acumularon en sedimentos de origen marino. Es posible que tales soluciones disolvieran e incorporaran sal de los cuerpos evaporíticos ampliamente

distribuidos en la región. Se descarta un origen pegmatítico o metamórfico para esos minerales. Los valores termobarométricos de las IF en los minerales estudiados, muestran valores de dispersión muy semejantes con las temperaturas de homogeneización y presiones máximas de aprisionamiento de las esmeraldas de Muzo, Pacho, Yacopí, Coscuez y Chivor (ORDÓÑEZ *et al.*



Microfotografía 5. Inclusiones fluidas trifásicas, con formato regular, presentes en un cristal de cuarzo asociado a la euclasa.

termodinámicas de las mismas. La Fig. 14 muestra la estabilidad de algunos minerales de berilo dentro del sistema BASH, diagrama propuesto por BURT (1978), modificado por FRANZ & MORTEANI (1981) y HSU (1983).

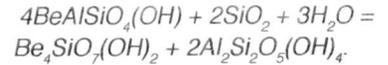
Al disminuir la temperatura, el berilo+silicato de aluminio reemplaza el crisoberilo+cuarzo en condiciones acuosas saturadas. Entre 300° y 400°C, el berilo+silicato de aluminio es reemplazado por la euclasa. Entre 200° y 300°C el berilo+agua reacciona con la euclasa o minerales tipo bertrandita y fenakita más agua de reacción de la bertrandita.

Los datos termodinámicos y de estabilidad presentes en la Fig. 15, muestran que la asociación cuarzo+euclasa+berilo, puede encontrarse en amplias condiciones de presión y temperatura; por ejemplo, entre 300 y 320°C, como es el caso de la euclasa y minerales asociados en Chivor (ORDÓÑEZ *et al.* 1994). Aún así, ese diagrama experimental no confirma los datos de presión para las IF de tal asociación (0,9-1,1 Kbars). Este aspecto podría ser explicado, debido a que no se había encontrado esa asociación a presiones menores, como lo comenta BARTON (1986).

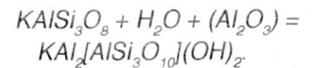
En el distrito minero de Chivor se

presenta un polimorfismo cristalino pobre, sugiriendo una inusual actividad de la sílice en el momento de la cristalización. Los feldespatos de potasio tipo hidrotermal, se encuentran en forma de caolinita, indicando metaestabilidad (con respecto a la moscovita). La sílice presentó mayor actividad que la solubilidad del cuarzo, pudiendo significar desplazamientos de la fase de equilibrio, tal como hidrólisis de feldespato de potasio. La reacción

química sería:

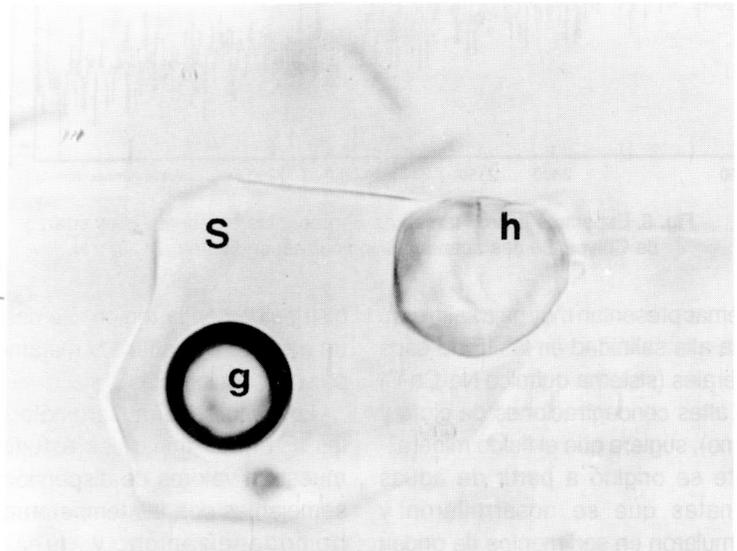


En sistemas mineralógicos composicionamente complejos, como los hallados en el distrito minero de Chivor, donde se presenta varias asociaciones y componentes, es necesaria la ampliación del sistema BASH. Entre esas adiciones encontramos Na₂O, K₂O y CaO en la forma de feldespatos, carbonatos, micas y arcillas. El equilibrio de los feldespatos-micas puede ser representado por la reacción química:



La alúmina se encierra entre paréntesis para enfatizar que no se refiere al corindón.

Otro componente importante en el equilibrio encierra aluminosilicatos de berilio con Li, Mg, Mn, Fe, Zn, P, S y F. Las relaciones entre las fases de sistemas complejos de este tipo han sido discutidas por varios autores, entre ellos BEUS & DÍKOV (1967) y KUPRIYANOVA (1982).



Microfotografía 6. Inclusión fluida trifásica presente en un cristal de fluorita, encontrada en una de las minas del Distrito Minero de Chivor. La composición química de las fases presentes en esta IF es similar a las de la euclasa estudiada. Halita (h), salmuera (s) y fase gaseosa (g).

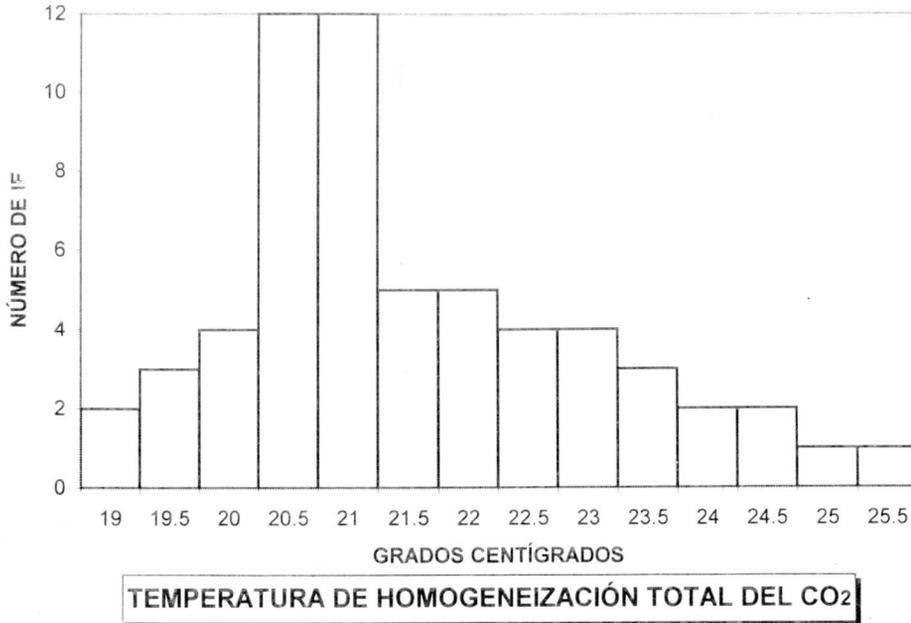


Fig. 9. Histograma de frecuencia para las temperaturas de homogeneización del CO₂ presente en las IF de la euclasa. En todos los casos la homogeneización ocurrió para la fase líquida.

CONCLUSIONES

Los resultados de estos estudios permitieron concluir que la euclasa del distrito minero de Chivor presenta características mineralógicas similares a las de otras localidades del mundo.

La euclasa y minerales asociados del distrito minero estudiado, fueron generados a partir de un mismo fluido mineralizante, con temperaturas máximas de 360°C y presiones mínimas de aprisionamiento entre 900 y 1100 bares.

El comportamiento microtermométrico, las fases

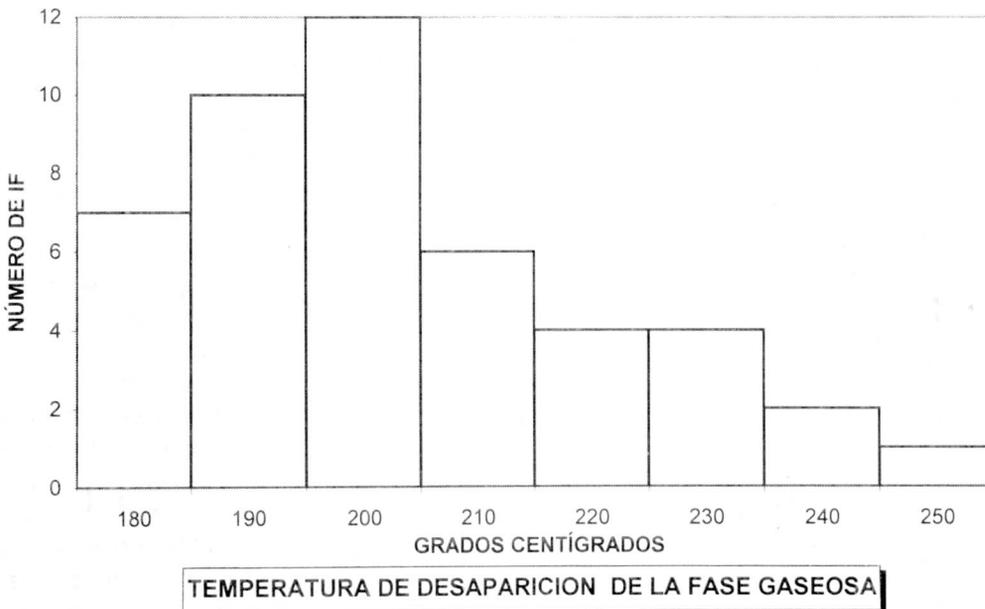


Fig. 10. Histograma de frecuencias de temperaturas de desaparición de la fase gaseosa global de las IF en cristales de euclasa estudiados. Esa temperatura está marcada por la desaparición de la bola de vapor de la inclusión.

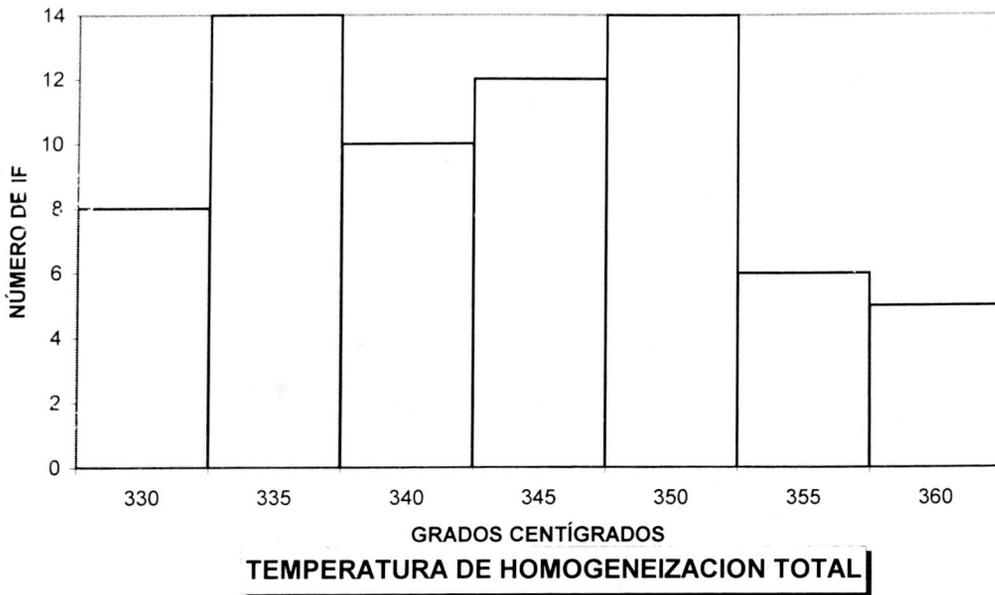


Fig. 11. Histograma de frecuencia de las temperaturas de homogeneización total de las IF presentes en cristales de euclasa. Esta temperatura es registrada en el momento del desaparición de la fase sólida, en este caso los cristales de sal (halita).

presentes y iones disueltos en la parte líquida de las IF de la euclasa y minerales asociados, permiten sugerir que el fluido mineralizante que generó esos minerales fue el mismo que

generó las esmeraldas de todas las localidades esmeraldíferas colombianas.

La euclasa estudiada se presenta dentro de un contexto geológico

especial, no comparable con el de otras localidades del mundo, donde se presenta el mineral. Este tipo especial de euclasa, su ambiente de formación y asociación mineralógica no han sido reportados en la literatura especializada.

Las características físico-químicas y alta salinidad en las IF de la euclasa y minerales asociados, sugieren que el fluido mineralizante se originó a partir de aguas connatas que se desarrollaron y acumularon junto con sedimentos de origen marino. Es posible que tales soluciones disolvieran e incorporaran sal de los cuerpos evaporíticos ampliamente distribuidos en la región. Se descarta un origen geotérmico, pegmatítico o metamórfico para estos minerales.

La euclasa podría ser de interés económico para el país, pues ese mineral corresponde al grupo de las gemas semipreciosas, con alto valor en el mercado internacional. Si se amplía la búsqueda de nuevas alternativas mineralógicas en el distrito minero de Chivor, se podría mejorar la situación socio-económica de los

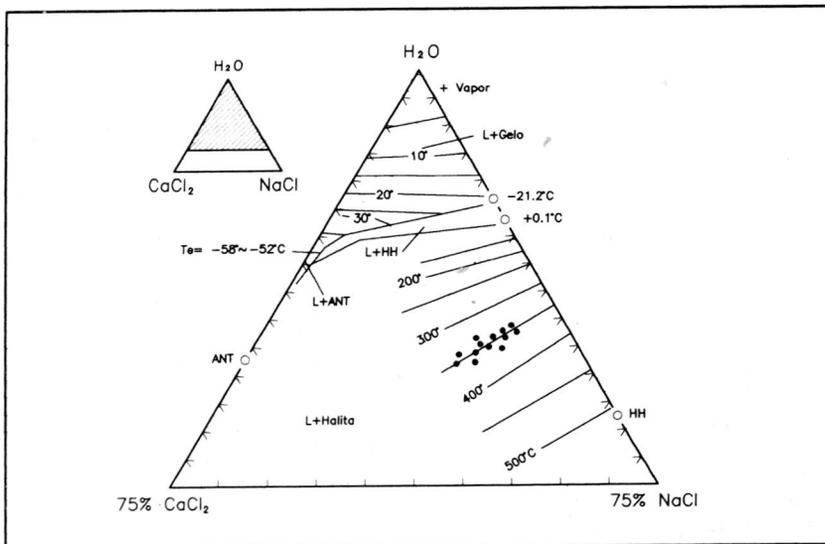


Fig. 12. Determinación de los porcentajes de NaCl y CaCl₂ en el diagrama de fases de VANKO *et al.* (1988), a partir de la temperatura del punto eutéctico, temperaturas de fusión del hielo y disolución de la sal.

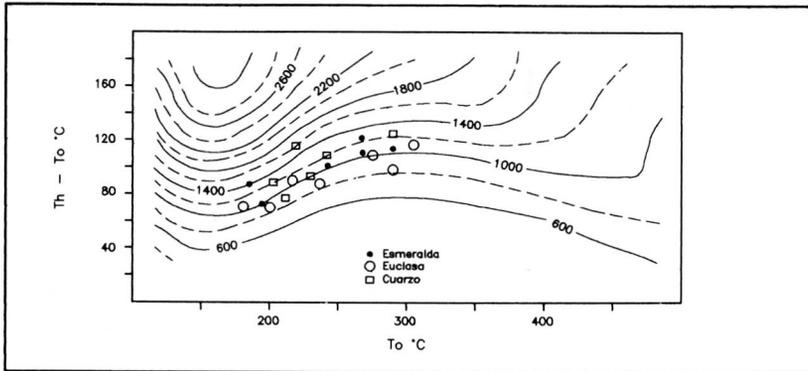


Fig. 13. Determinación de las isocoras de presión de IF presentes en esmeraldas, euclasa y cuarzo de Chivor, usando el diagrama de SOLOVOVA *et al.* (1992) que relaciona la temperatura de desaparición de la fase gaseosa (To °C) y la diferencia entre esa temperatura de disolución de la sal (Th-To °C); válido para el sistema H₂O-NaCl. Los valores obtenidos están entre 900 y 1100 bares

habitantes de la región.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los mineros de Chivor que cedieron las muestras para realizar este trabajo. También queremos expresar nuestros agradecimientos a los Profesores Dr. H. E. Toma (IQ-USP) y Kazuo Fuzikawa (CDTN-UFMG) en cuyos laboratorios fueron realizados los espectros electrónicos y de microscopía micro-Raman; a los físicos Verterramas, Aparecido y Myriam de la sección de Física y Microscopía Electrónica de la PF-IC (Sao Paulo), por su colaboración en los estudios de rayos X. Las muestras de

colección de la euclasa, en donde se realizaron análisis no destructivos, fueron prestadas por la firma Gentec Ltda (Bogotá). Agradecemos al geólogo Campo E. Perilla por su colaboración en la diagramación del texto final, así como al Prof. Dr. Joaquín Molano (DG-UN) por su valiosa ayuda en la corrección del texto final.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BANK, H. (1980): Neues Vonkommen von Euklas in Brasilien.- Zeitschrift der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft, 29:190.

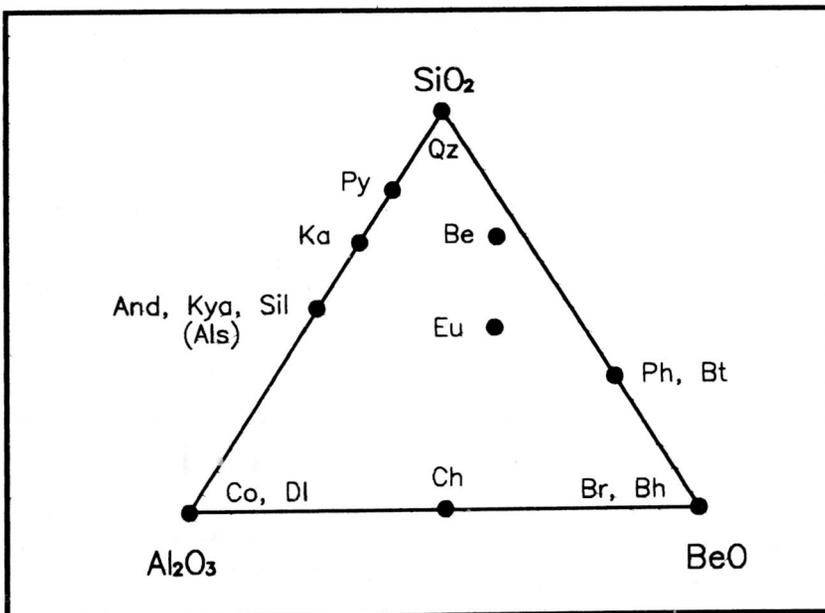


Fig. 14. Fases del sistema SiO₂ - Al₂O₃ - BeO - H₂O.

BARTON, M. D. (1986): Phase equilibria and thermodynamic properties of minerals in the BeO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (BASH) system, with petrologic applications.- American Mineralogist, 71: 277-300.

BEUS, A. A. & DIKOV, Y. P. (1967): The geochemistry of beryllium in the processes of endogenetic mineralization.- Nedra, Moscow.

BURT, D..M. (1978): Multisystem analysis of beryllium mineral stabilities: The System BeO - Al₂O₃ - SiO₂ - H₂O.- American Mineralogist, 63: 664-676.

CANO, D. (1986): Levantamiento geológico del túnel del Río Chivor, Proyecto Guavio.- Trabajo de Grado, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional, 97 p., Bogotá.

CASSEDANNE, J. P. & CASSEDANNE, J. O. (1974): Mineral collecting localities from the Capelinha-Malacacheta Area (State of Minas Gerais, Brazil).- Mineralogical Record, 5: 224-232.

CHAVES, M.L. & KARFUNKEL, J. (1996): Novas Ocorrencias de euclásio em Minas Gerais.- Boletim IG-USP. Série Científica, 25: 53-60.

DUD'A R. & LOBUS, R. (1989): La gran enciclopedia de los minerales. 3.ed.- Praga, Aventinum. 519 p.

DUROC-DANNER, J. M. (1989): Medium-dark blue aquamarines from Tongafeno, Madagascar, with high physical and optical properties, and showing three-phase inclusions.- Journal of Gemmology, 21(7): 423-430.

DUROC-DANNER, J. M. (1996): Euclase from Colombia showing three-phase inclusions.- Journal of Gemmology, 25(3): 175-176.

ESCHWEGE, W. L. (1822): Geognostisches Gemalde von Brasilien und wahrscheinliches Muttergestein der Diamanten.- Landes-Industrie-Comptoir, Weimar, 44 p.

ESCOBAR, R. (1975): Geología y geoquímica de las minas de esmeralda de Gachalá.- Boletín Geológico, 22(3): 119-153.

ETAYO SERNA, F. (1968): El sistema Cretáceo en la región de Villa de Leyva y zonas próximas.- Geología Colombiana, 5: 5-74.

FABRE, A. (1983): La subsidencia de la

Norsk Geologiske Tidsskrift, 31: 1-5.

ULLOA, M. C. & RODRIGUEZ, M. E. (1979): Geología del cuadrángulo K-12, Guateque.- Boletín Geológico, 22(1): 1-56.

VANKO, A. D.; BODNAR, R. J. & STERNER, S.M. (1988): Synthetic fluid inclusions: VIII. Vapor-Saturated halite solubility in part of the system NaCl-CaCl₂-H₂O, with application to fluid inclusions from oceanic hydrothermal system.- Geochimica et Cosmochimica Acta, 52: 2451-56.

VLASOV, K. A. (1966): Mineralogy of Rare Elements.- Israel, program for scientific translations. Jerusalem, 945 p.

WEBSTER, R. (1987): Gems: their sources, description and identification. 4th edn. Revised by B. W. Anderson.- Butterworths, London. p. 322.

WOPENGA, B. & PASTERIS, J. (1986): Limitation to quantitative analysis of fluid inclusions in geological samples by laser Microprobe Raman Spectroscopy.- Applied Spectroscopy, 40(2): 144-151.

WOPENGA, B.; PASTERIS, J.; FREEMAN, J. (1990) Analysis of individual fluid inclusions by fourier transform infrared and Raman microspectroscopy.- Geochimica et Cosmochimica Acta, 54: 519-533.

Manuscrito recibido, Marzo de 1997.