

# ESTUDIO DE INCLUSIONES FLUIDAS EN POZOS DE GRADIENTE TÉRMICO, VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ

Cindy L. Urueña-Suárez.<sup>1</sup>; Carlos A. Zuluaga<sup>2</sup>; Juan Carlos Molano<sup>3</sup>

## RESUMEN

El estudio de inclusiones fluidas asociadas al sistema hidrotermal-magmático del Volcán Nevado del Ruiz permitió conocer en detalle aspectos característicos de los fluidos involucrados en la evolución del sistema geotérmico. Para ello se seleccionaron muestras de la parte más profunda de tres pozos de gradiente térmico que fueron perforados en la zona de Estudio del Proyecto Geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz, promovido por ISAGEN S.A. ESP. Con el fin de establecer la interacción fluido-roca durante la evolución del sistema hidrotermal se analizaron principalmente inclusiones fluidas secundarias hospedadas en cuarzo, plagioclasa y carbonato; en estos minerales también se pudieron estudiar algunas inclusiones fluidas primarias. Las microestructuras permitieron identificar cuáles de los cristales analizados son minerales formadores de roca y cuales son minerales de alteración.

Los carbonatos en los que se analizaron inclusiones fluidas ocurren como venas con textura coloforme que cortan una sucesión de tobas y lavas andesíticas (profundidades de 170,0 y 171,6 m). Las inclusiones en los carbonatos se interpretaron como originadas por fluidos hidrotermales de alta temperatura (superiores a 250 °C) y por fluidos de baja temperatura con salinidad variable, que posiblemente se relacionan con los fluidos del sistema geotermal actual. En estas muestras se realizaron adicionalmente análisis de catodoluminiscencia, espectrometría de dispersión de energía y se obtuvieron imágenes de electrones retrodispersados, estas técnicas permiten definir con mayor precisión la relación entre los datos de microtermometría y las variaciones texturales y composicionales asociadas al bandeamiento coloforme, en el que se desarrollan niveles de calcita y dolomita con presencia de cristales de barita relacionados con el evento hidrotermal.

Las inclusiones fluidas hospedadas en cuarzo se observaron en muestras de milonitas (profundidades de 299,9 y 300,9 m), estas inclusiones se interpretan como formadas por la interacción de fluidos de metamorfismo e hidrotermales de alta temperatura, la interpretación se basa en la profundidad de las muestras y en los resultados del análisis de las inclusiones. Las inclusiones fluidas analizadas en plagioclasa corresponden a muestras de lavas andesíticas ubicadas a profundidades de 259,9 y 260,0 m, éstas inclusiones pertenecen al sistema de  $H_2O + CO_2$  y se consideran como formadas de fluidos de origen magmático, se observan como dos grupos composicionales, unas inclusiones tienen fase líquida y gaseosa ( $CO_2$ ) y otras solamente fase gaseosa, esta característica evidencia atrapamiento heterogéneo, soportando la interpretación de origen magmático del fluido.

**Palabras clave:** Inclusiones fluidas, Fluidos geotermales, Sistema hidrotermal, Temperatura.

## FLUID INCLUSIONS STUDY IN THERMAL GRADIENT WELLS, NEVADO DEL RUIZ VOLCANO

### ABSTRACT

A fluid inclusions study in the Nevado del Ruiz volcano hydrothermal system allowed to characterize fluids involved in the evolution of the geothermal system. Fluid inclusions hosted in quartz, plagioclase and carbonate from samples of the deepest parts of three thermal gradient wells were analyzed to understand fluid-rock interaction. Fluid inclusions hosted in carbonate veins with coloform microstructure represent hydrothermal fluids with temperatures higher than 250° C. This interpretation is supported by microprobe and cathodoluminescence analysis that also indicate a hydrothermal origin for the veins. Fluid inclusions hosted in quartz (mylonites) were originated by metamorphic fluids and fluid inclusions hosted in plagioclase (andesitic lavas) are considered to be originated from magmatic fluids ( $H_2O + CO_2$  system).

**Keywords:** Fluid inclusions, Geothermal fluids, Hydrothermal system, Temperature

<sup>1</sup> Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. cluruenas@unal.edu.co

<sup>2</sup> cazuluagacas@unal.edu.co

<sup>3</sup> jcmolanom@unal.edu.co

## INTRODUCCIÓN

Con el fin de evaluar el potencial térmico en el flanco noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz (Colombia) se realizaron tres perforaciones para pozos de gradiente térmico (pozos de menos de 300 m de profundidad donde se mide la distribución de temperatura con la profundidad). Estos pozos fueron adicionalmente corazonados y los núcleos fueron analizados petrográficamente. Uno de los objetivos del estudio petrográfico fue buscar evidencias de la interacción fluido-roca para entender la evolución del sistema geotérmico. La interacción fluido-roca produce minerales de alteración y en muchos casos hidrofracturamiento. Las fracturas pre-existentes o generadas durante el evento pueden en cualquier momento cerrarse y atrapar fluido para formar inclusiones fluidas secundarias, atrapadas en los minerales de alteración o en los minerales formadores de roca. Sin embargo, algunas inclusiones fluidas son originadas durante la cristalización o recristalización de los minerales, durante los procesos formadores de rocas, éstas son inclusiones primarias. Una caracterización petrográfica cuidadosa y el análisis mismo de la inclusión permiten identificar la relación de la inclusión con los posibles eventos hidrotermales. Los fluidos atrapados en una inclusión proveen información sobre la temperatura, la presión, la densidad y la salinidad del fluido en el momento de su atrapamiento (Izquierdo *et al.*, 2008). Estas variables permiten interpretar la composición química del fluido y la historia térmica del evento que puede estar relacionado a la cristalización del mineral huésped o a un evento posterior que afecta al cristal.

En este estudio, para caracterizar las condiciones térmicas de un posible reservorio geotermal presente y para entender la evolución del sistema hidrotermal, se llevaron a cabo análisis de microtermometría en los que se evaluaron todas aquellas posibles inclusiones que podrían representar el ingreso de fluidos. El rango de profundidades y de litologías seleccionadas permitió analizar inclusiones producto del sistema hidrotermal actual y de eventos previos al desarrollo del sistema presente.

## METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS

De los tres pozos de gradiente térmico del área de estudio se seleccionaron un total de seis muestras para la elaboración de secciones doblemente pulidas llevando a cabo un total de 80 mediciones de microtermometría. Las inclusiones fueron caracterizadas petrográficamente con

el objetivo identificar familias y de seleccionar las más representativas de cada familia. Los parámetros tenidos en cuenta fueron las características morfológicas, los tamaños, las fases presentes y la relación entre las fases, así como las relaciones de corte (temporalidad). Durante el estudio petrográfico también se identificaron inclusiones fundidas, pero éstas no se analizaron por lo que no son objeto de este estudio.

Se midieron todas las temperaturas en las que la inclusión muestra algún cambio. Sin embargo, los cambios más relevantes para la caracterización de fluidos geotérmicos son la temperatura final del hielo y la temperatura de homogenización. La temperatura final del hielo fue usada para estimar la salinidad relativa del fluido en % peso equivalente de NaCl con base la fórmula propuesta por Hall *et al.* (1988) en el caso de inclusiones bifásicas y la fórmula de Sterner *et al.* (1988) para inclusiones trifásicas. La temperatura de homogenización permitió interpretar la mínima temperatura a la que ocurrió el atrapamiento del fluido hidrotermal (Izquierdo *et al.*, 2008). En la mayoría de las inclusiones se determinó además la temperatura eutéctica, la cual permitió identificar el sistema químico al que pertenece el fluido (usando datos teóricos presentados por Brown, 1998) para separar los fluidos involucrados en diferentes eventos (e.g., sistemas de las diferentes inclusiones fluidas en las fases cuarzo, plagioclasa y carbonato).

En las muestras de carbonatos se realizaron análisis de catodoluminiscencia y de microsonda con el fin de determinar la relación entre inclusiones fluidas, bandeamiento coloforme y con texturas producidas por defectos de la red cristalina (donde generalmente se agrupan las inclusiones; Van den Kerkhof and Hein, 2001).

## LOCALIZACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio se localiza en la parte norte del Volcán Nevado del Ruiz (VNR) en el eje central de la Cordillera Central. El Volcán Nevado del Ruiz (VNR, 4° 53'43 "N, 75° 19'21" W), tiene un basamento de rocas metamórficas de edad Paleozoica (Complejo Cajamarca) y rocas plutónicas de edad Paleocena, de composición tonalítica a granodiorítica (Granodiorita de Manzales y Batolito del Bosque). Su historia eruptiva inicia hace aproximadamente 1.8 Ma y ha sido interpretada como dividida en estados sucesivos de construcción y destrucción del edificio volcánico. El sistema hidrotermal asociado al edificio volcánico ha sido definido a partir de la identificación de tres

tipos de aguas: sulfatadas, bicarbonatadas, y cloruradas (Sturchio *et al.*, 1988; Lopez, 1992), y la relación de estos fluidos con el sistema de fallas y fracturas (Lopez, 1992; Mejía *et al.*, 2012). Un estudio reciente de las alteraciones minerales observadas en superficie indica la presencia de alteración argílica avanzada e intermedia característica de una zona de baja sulfuración (Forero *et al.*, 2011).

## POZOS DE GRADIENTE TERMICO

Los tres pozos de gradiente geotérmico perforados en la zona norte del Volcán Nevado del Ruiz (F), alcanzaron profundidades de 300,9 m (Pozo 1); 260,2 m (Pozo 2) y 174,3 m (Pozo 3). Los núcleos de los tres pozos fueron descritos para identificar las variaciones litológicas. En el Pozo 1 se diferencian cuatro unidades, que de arriba a abajo se observan así: (i) un depósito de clastos de lava y brecha, estos últimos presentan silicificación penetrativa de la matriz y contenidos importantes de minerales de arcilla y óxidos de hierro; (ii) una sucesión de lavas andesíticas ocasionalmente con enclaves (o xenolitos) de textura fanerítica inequigranular y de composición básica, las lavas están alteradas a minerales de arcilla y se observan venas de sílice coliforme; (iii) una brecha que pasa de clasto soportada (20% matriz) en el tope a matriz soportada (75% matriz) en la parte inferior, esta litología también está alterada a minerales de arcilla y óxidos; y (iv) milonitas con muy poca alteración y un fracturamiento intenso, a lo largo de las fracturas se observan ocasionalmente venillas subparalelas y oblicuas a la orientación mineral de cuarzo y pirita de origen hidrotermal y minerales de alteración como carbonatos y epidota. El Pozo 2 muestra una secuencia de lavas andesíticas y brechas matriz soportadas con evidencias de diferentes eventos de alteración, donde se formaron epidota, minerales de arcilla y óxidos (sobreimpuestos). En el Pozo 3 de arriba a abajo se observa: (i) lavas andesíticas y dacítica, (ii) brechas clasto soportadas poco consolidadas intercalada con lavas de composición andesítica y (iii) tobas cristalinas y tobas cristalinas vítreas intercaladas con lavas andesíticas localmente con vetas abundantes de carbonato y ocasionalmente pirita.

## INCLUSIONES FLUIDAS

En el Pozo 1 se tomaron dos muestras a profundidades de 299,9 y 300 m en una zona donde las milonitas se encuentran afectadas por abundantes venas hidrotermales de cuarzo y pirita subparalelas y oblicuas a la orientación mineral; a esta profundidad también se observan

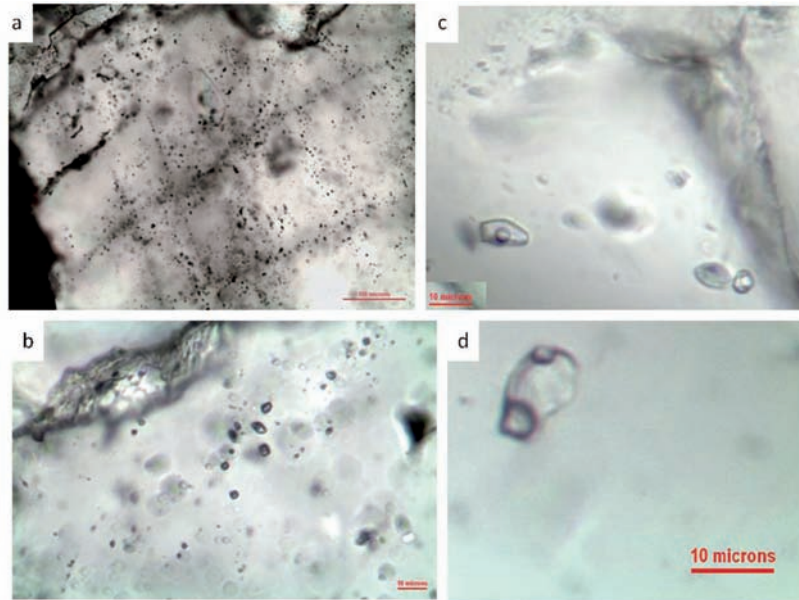
minerales de alteración como carbonatos y epidota. Las muestras seleccionadas en el Pozo 2 se tomaron a profundidades de 259,5 y 260,0 m en lavas andesíticas con fenocristales de plagioclasa en una matriz mixta de vidrio y microlitos, y con algunas fracturas abiertas que afectan generalmente los fenocristales de plagioclasa. Las muestras seleccionadas en el Pozo 3 se ubican a 170,0 y 171,6 m de profundidad en una zona de venas abundantes de carbonatos donde las venas alcanzan hasta 5 cm de espesor; estas venas son paralelas entre sí, de geometría regular, presentan textura coliforme y cortan los niveles de tobas intercalados con andesitas. Las inclusiones fluidas estudiadas están hospedadas en cuarzo, plagioclasa y carbonatos.

### Inclusiones fluidas hospedadas en cuarzo

Estas inclusiones se encuentran en muestras de milonitas del Pozo 1 en las que se observan venillas delgadas de cuarzo y pirita. Sin embargo, el cuarzo presente en dichas venillas tiene una textura en mosaico de grano fino, muy similar a los cristales muy finos de cuarzo metamórfico observados en los bordes de porfiroclastos de cuarzo o en lentes de cuarzo recristalizado producto del evento dinámico. Por esta razón es difícil diferenciar las inclusiones relacionadas al evento de metamorfismo dinámico de posibles inclusiones formadas en eventos hidrotermales posteriores (e.g., las venas se desarrollaron en un evento en el que ingresan fluidos de origen metamórfico o hidrotermal). Sin embargo, para este estudio las inclusiones se estudiaron con el propósito de usar las temperaturas obtenidas en microtermometría y determinar si el evento de formación de las venas estuvo relacionado con el sistema hidrotermal actual.

Las inclusiones estudiadas son bifásicas, ricas en líquido (relación líquido/vapor >1), se clasifican como secundarias porque se ubican en filas sellando fracturas intercrystalinas que cruzan varios cristales y se desarrollan en diferentes planos vistos a lo largo del espesor que tiene la sección, lo que permite determinar la cronología relativa entre los grupos de inclusiones (FIGURA 2). Éstas tienen tamaños inferiores a 10 micras con formas cúbicas y elipsoidales, aunque se conservan algunas más grandes con formas irregulares que generalmente representan estrangulamiento de la fase vapor respecto de la fase líquida (*Necking down*), por lo tanto, no fueron tomadas en cuenta para las mediciones de microtermometría. También se reconocieron inclusiones trifásicas (que sugieren alta salinidad) en las que se desarrollan uno o dos minerales hijos; se considera que su atrapamiento ocurrió durante un evento previo al último evento hidrotermal (FIGURA 2c).



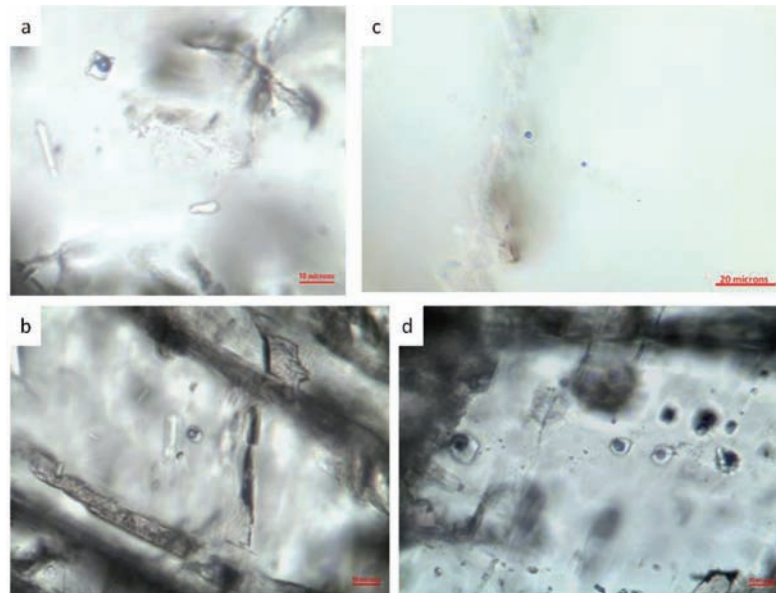


**FIGURA 2.** Inclusiones fluidas hospedadas en cuarzo. (a) suturas selladas por inclusiones que se cruzan entre sí. (b) Inclusiones bifásicas secundarias alineadas que se desarrollan en planos de observación inferiores. (c) Inclusión bifásica. (d) Inclusión trifásica.

### Inclusiones fluidas hospedadas en plagioclasa

Estas inclusiones fueron estudiadas en muestras del Pozo 2 (lavas andesíticas); se observan aisladas y asociadas a planos de crecimiento de los cristales (ocasionalmente en fracturas intracristalinas); su distribución dentro de los cristales permite interpretarlas como inclusiones primarias. Se identificaron dos familias principales con base en la distribución y las fases que se observan en ellas, las inclusiones de las dos familias son similares en tamaños

y morfologías. En una familia de inclusiones se reconocen dos fases líquidas ( $H_2O$  y  $CO_2$ ) y son ricas en  $CO_2$ ; las fases líquida y gaseosa de  $CO_2$  generan un doble anillo de burbuja (FIGURA 3a). En esta familia las inclusiones se encuentran aisladas y se ubican de forma paralela a las líneas de exfoliación del cristal. La otra familia de inclusiones son bifásicas (líquido – vapor, sin doble anillo), ocasionalmente desarrolladas en fracturas intracristalinas entre dos planos de exfoliación (FIGURA 3).



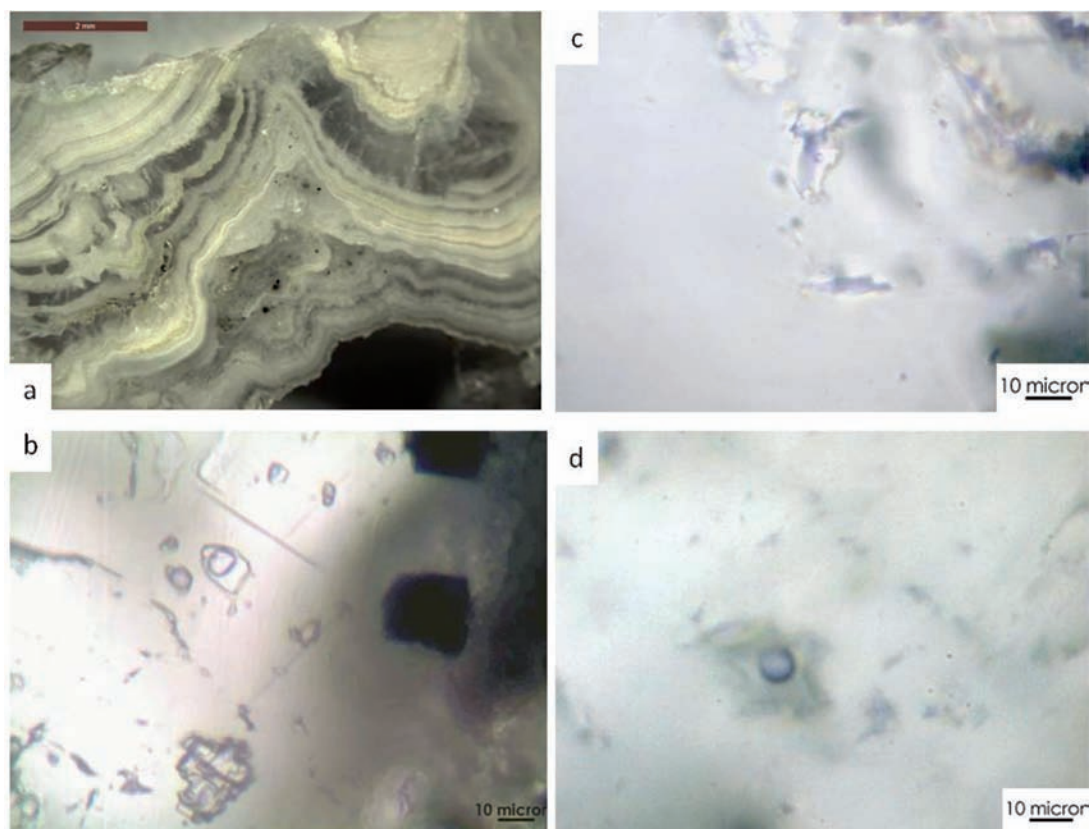
**FIGURA 3.** Inclusiones hospedadas en plagioclasa. (a) Inclusión rica en  $CO_2$ , desarrollo de doble anillo. (b) Inclusiones pseudosecundarias asociadas a suturas entre dos planos de exfoliación. (c) inclusiones bifásicas alineadas en una sutura intracristalina. (d) Inclusiones fundidas.

### Inclusiones fluidas hospedadas en carbonatos

Las inclusiones hospedadas en carbonatos se estudiaron en muestras del Pozo 3. Las venas de carbonato se caracterizan por presentar una estructura coloforme (desarrollo de bandas, FIGURA 4a) y por cortar la secuencia de tobas y andesitas que aparece en la parte más profunda del pozo. La distribución de las inclusiones dentro de los cristales permite interpretarlas como primarias, ya que petrográficamente no se observan diferencias notables entre ellas y tampoco un parámetro que permitiera separar inclusiones en familias. Todas las inclusiones son bifásicas, con una proporción líquido-vapor similar, pero ligeramente más ricas en líquido; la mayoría tienen morfologías irregulares con tamaños entre 12 y 20 micras, algunas generan una alta refracción de la luz y están orientadas con los planos de crecimiento de los cristales o asociadas a los planos de clivaje de la calcita (FIGURA 4).

La estructura coloforme de carbonato evidencia un bandeamiento composicional que fue estudiado con detalle por sus implicaciones en la distribución de

inclusiones. Las inclusiones fluidas seleccionadas para análisis de microtermometría provienen de bandas translúcidas que están intercaladas con bandas poco translúcidas, este comportamiento de las bandas en luz transmitida se correlaciona bien con el comportamiento luminiscente de las bandas. Las bandas translúcidas tienen una luminiscencia de tonos amarillos mientras que las oscuras tienen luminiscencia en varios tonos naranjas con intensidades (brillos) variables. En los niveles de carbonato más oscuros existen inclusiones, pero su análisis se dificulta por la poca transmisión de luz; en estos niveles se observan también pequeños cristales con tonos azules brillantes que se interpretan como sílice (FIGURA 5). Los espectros de luminiscencia (FIGURAS 6, 7 y 8) permitieron identificar los elementos activadores en los carbonatos ( $Mn^{2+}$ , pico entre 560 nm y 630 nm) y en varios de los minerales accesorios de las venas (e.g., apatito con picos de  $Tb^{3+}$  y  $Sm^{3+}$ , y posiblemente  $Dy^{3+}$  y  $Eu^{3+}$ ). Las bandas representan composicionalmente alternancia de niveles ricos en calcita y niveles ricos en dolomita como se observa en las imágenes composicionales de rayos X (FIGURAS 9 y 10).



**FIGURA 4.** Inclusiones fluidas hospedadas en carbonato. (a) Vena de carbonatos con estructura coloforme. (b) Inclusiones asociadas a los planos de clivaje, con morfologías muy regulares. (c) Inclusión aislada rica en líquido. (d) Inclusión aislada con una fase de vapor mayor.

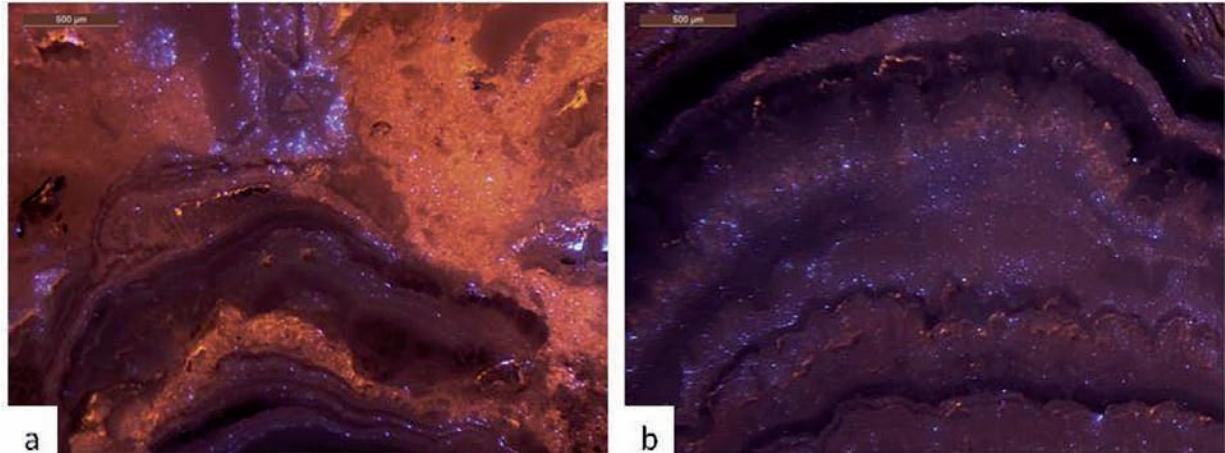


FIGURA 5. Imágenes de catodoluminiscencia en calcita coloforme. En (a) se observan tonos naranjas en la zona más masiva y desarrollo de bandas con menor luminiscencia, cristales con luminiscencia azul. En (b) se diferencian claramente la variación en las bandas menos luminiscentes.

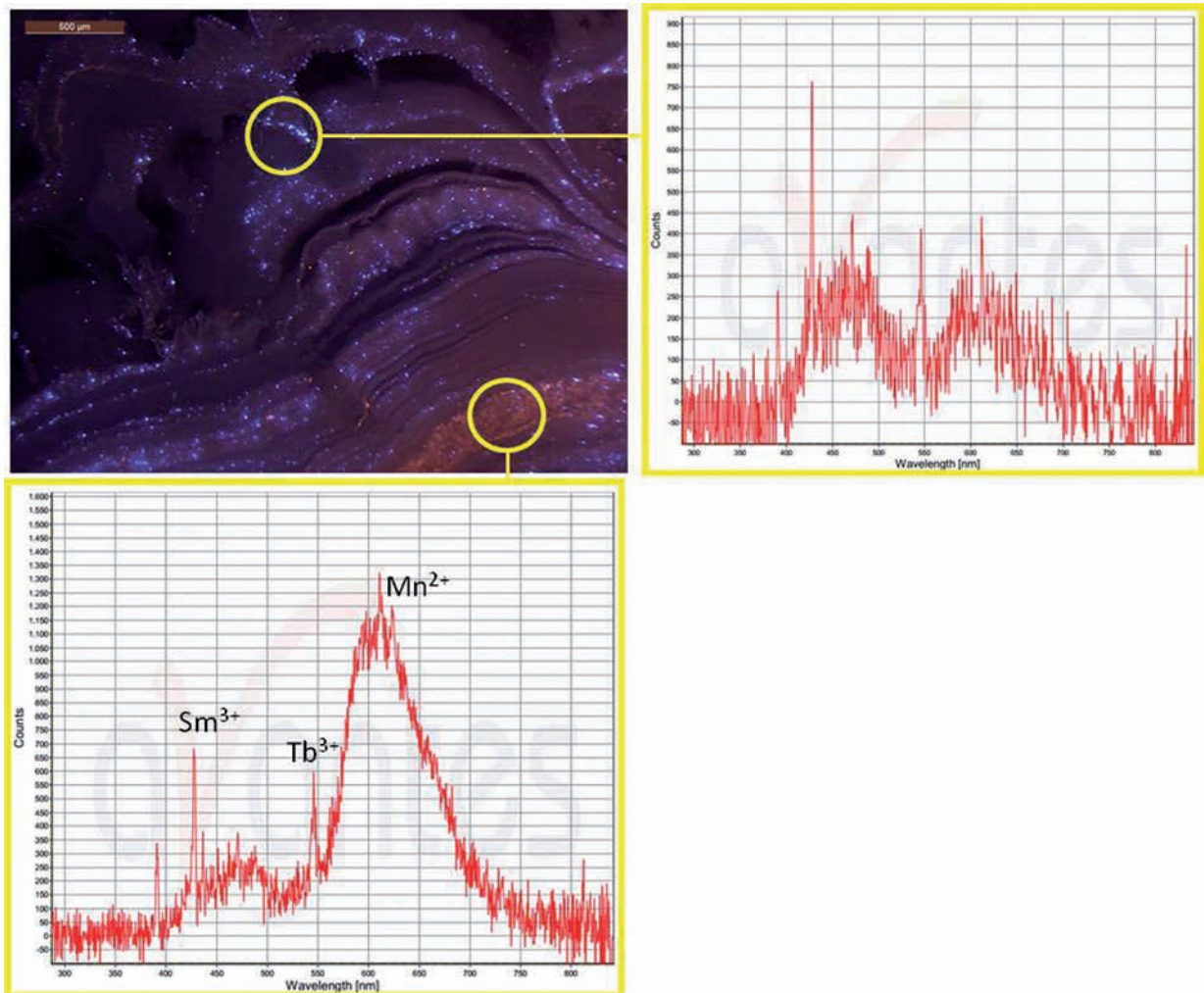


FIGURA 6. Imagen de catodoluminiscencia y espectros que representan una variación composicional entre las bandas.

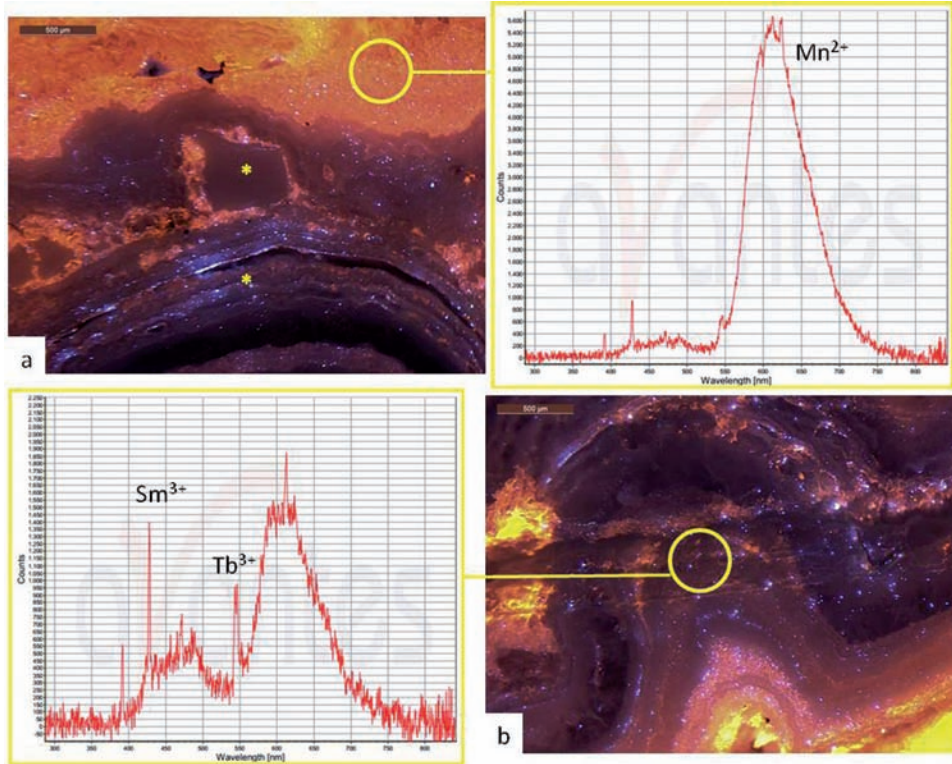


FIGURA 7. (a) Espectro típico de calcita, obtenido en la parte masiva. (b) Espectro obtenido en zona de baja luminiscencia similares a los que se obtuvieron en las zonas con \* en (a).

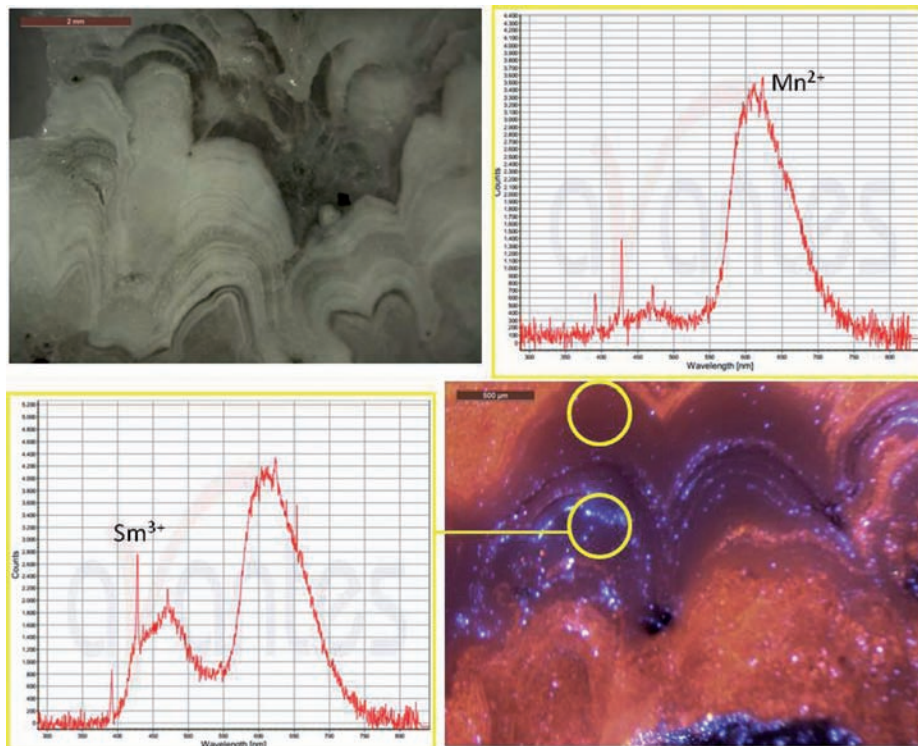
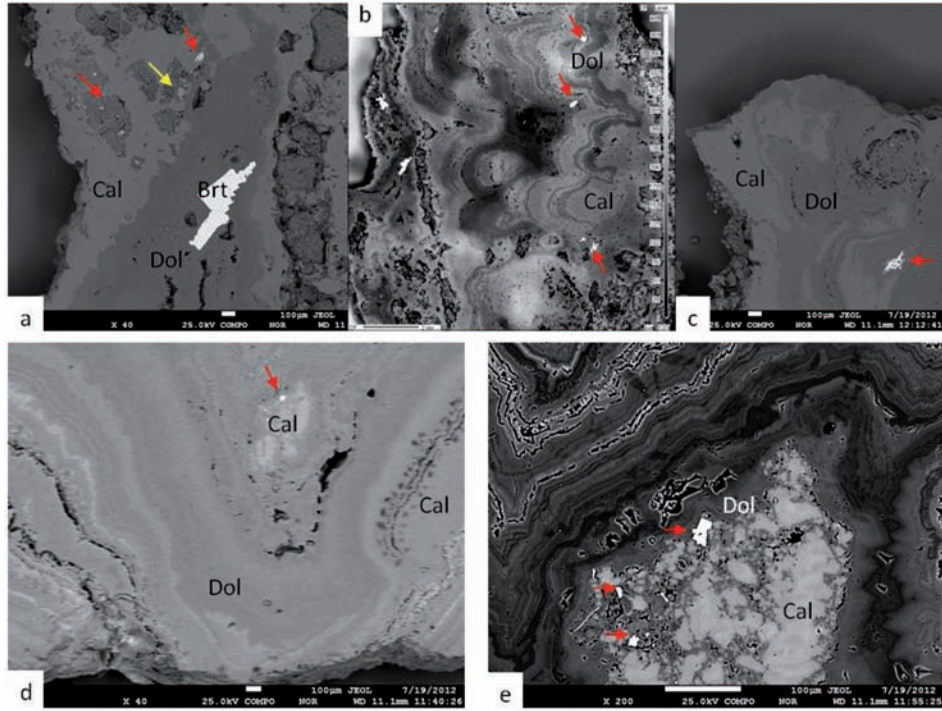
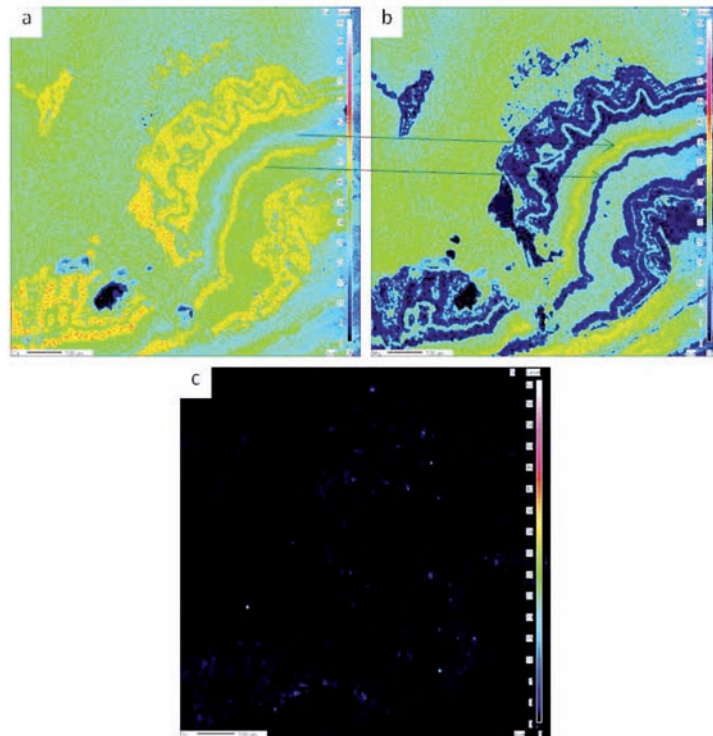


FIGURA 8. En la primera imagen se observa el bandeamiento coliforme en la vena de carbonato. El primer espectro fue obtenido en un sector con luminiscencia moderada y es muy similar a los espectros tomados en calcita. Para el segundo espectro se nota un incremento en los picos entre 430 y 480 nm correspondientes a elementos de tierras raras.





**FIGURA 9.** Fotografías de electrones retrodispersados. Se diferencian niveles de calcita (Cal) y dolomita (Dol); las flechas en rojo señalan sulfuros de Pb y Fe. En (a) se observan cristales de barita (Brt) y la flecha amarilla señala fosfatos. En (a y c) los niveles de calcita y dolomita no tienen una distribución homogénea. En (b, d y e) el bandeamiento coloforme está claramente desarrollado mostrando variaciones composicionales y en (d) los niveles más oscuros representan un incremento en el contenido de magnesio ( $Mg^{2+}$ ).



**FIGURA 10.** Mapas composicionales de rayos X. (a) Mapa para  $Ca^{2+}$  en carbonato bandeado. (b) Mapa para  $Mg^{2+}$  en carbonato bandeado. (c) Mapa para  $Si^{4+}$  bajos contenidos (en azul) diseminados.

## MICROTERMOMETRÍA

Las inclusiones en cuarzo analizadas se separaron en dos grandes grupos de acuerdo con la temperatura eutéctica. El primer grupo corresponde a inclusiones con temperaturas de primera fusión entre  $-65$  y  $-50^{\circ}\text{C}$  que pertenecen al sistema  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  posiblemente con impurezas de otros gases (e.g.  $\text{CH}_4$ ); las inclusiones de este primer grupo tienen una salinidad promedio de 12,6% (TABLA 1) y se interpretan como originadas por un único evento. El segundo grupo corresponde a inclusiones de sistemas salinos ( $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  /  $\text{H}_2\text{O}-$

$\text{NaCl}-\text{KCl}$ ) con temperaturas de primera fusión entre  $-30$  y  $-20^{\circ}\text{C}$ , dentro de éste grupo se encuentran inclusiones trifásicas y bifásicas y se interpretan por lo menos tres momentos en los que hay atrapamiento de inclusiones bifásicas salinas. Como se muestra en la FIGURA 11, se encontró una población de inclusiones con alta salinidad ( $>15\%$ ) y bajas temperaturas de homogenización, otra población en la que se observa un aumento proporcional de la salinidad con la temperatura de homogenización y una última población con salinidad inferior al 5% que homogenizan entre  $200$  y  $325^{\circ}\text{C}$ .

TABLA 1. Resultados de microtermometría para inclusiones fluidas hospedadas en cuarzo.

Grupo	Cant.	Rango Tm $^{\circ}\text{C}$	Promedio Tm $^{\circ}\text{C}$	Rango Th $^{\circ}\text{C}$	Promedio Th $^{\circ}\text{C}$	Rango Tfc $^{\circ}\text{C}$	Rango % wt NaCl	Promedio %wt NaCl
$\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$	5	-10.8 a -7.0	-8.8	296.0 a 370.5	339.2		10.5 a 14.7	12.6
Salinas bifásicas	26	-15.9 a -0.1	-5.9	180.0 a 398.9	290.7		0.1 a 19.3	8.8
Salinas trifásicas	4	-7.8 a -0.6	-5.5	177.4 a 375.6	307.7	383.1 - 600.0	45.6 - 73.9	60.4

Tm: temperatura de fusión final del hielo, Th: temperatura de homogenización de la inclusión, Tfc: temperatura de disolución del sólido.

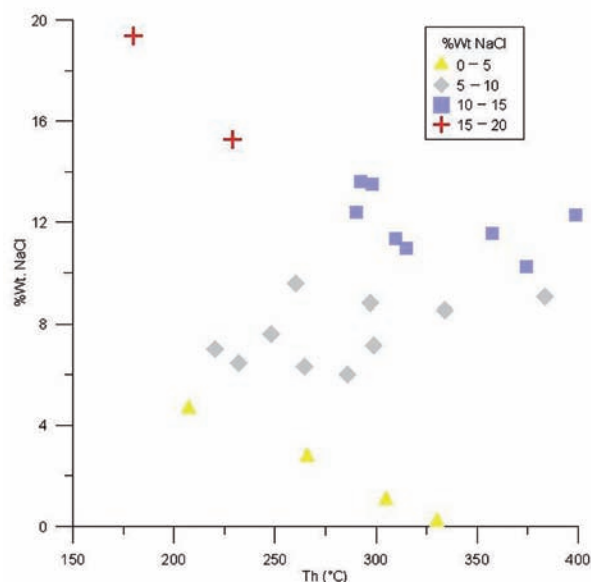


FIGURA 11. Diagrama temperatura de homogenización (Th) Vs. Salinidad (%wt NaCl) para inclusiones salinas bifásicas. Se diferencian poblaciones con alta salinidad (cruz roja), baja salinidad (triángulos amarillos) y las demás con salinidad intermedia, en las cuales hay una relación directa con el descenso de la temperatura.

De las inclusiones fluidas hospedadas en plagioclasa se encontró una población predominante del sistema  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  de las cuales sólo dos inclusiones medidas

desarrollan doble anillo de  $\text{CO}_2$  y sólo tres inclusiones pertenecen a un sistema salino. Estas inclusiones no homogenizaron por debajo de  $600^{\circ}\text{C}$  (excepto una a  $217,2^{\circ}\text{C}$ , TABLA 2) lo que soporta la interpretación de que las inclusiones son primarias. Las inclusiones ricas en  $\text{CO}_2$  y las que no desarrollan doble anillo parecen corresponder a un mismo evento debido a que se encuentran juntas en planos específicos y la salinidad está en el mismo rango; en este caso, la variación en las fases presentes representa atrapamiento heterogéneo. En la FIGURA 12 se muestra la variación de la salinidad con respecto a los grupos de inclusiones, es interesante observar en particular que las inclusiones salinas no muestran una tendencia clara en cuanto a la salinidad del fluido que representan, sin embargo se debe tener en cuenta la baja población de datos obtenidos.

Aunque petrográficamente no se logró diferenciar familias de inclusiones fluidas en los carbonatos, es posible separar dos poblaciones de inclusiones con base en el sistema químico que representan. Las dos poblaciones son salinas, una tiene una temperatura eutéctica entre  $-32$  y  $-24^{\circ}\text{C}$  y representa un sistema  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  y/o  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{KCl}$ , la otra población agrupa inclusiones menos frecuentes con temperatura eutéctica entre  $-42$  y  $-36^{\circ}\text{C}$ , asociada posiblemente al sistema  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$  y/o  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{MgCl}_2$ . La salinidad promedio es similar en los dos grupos,

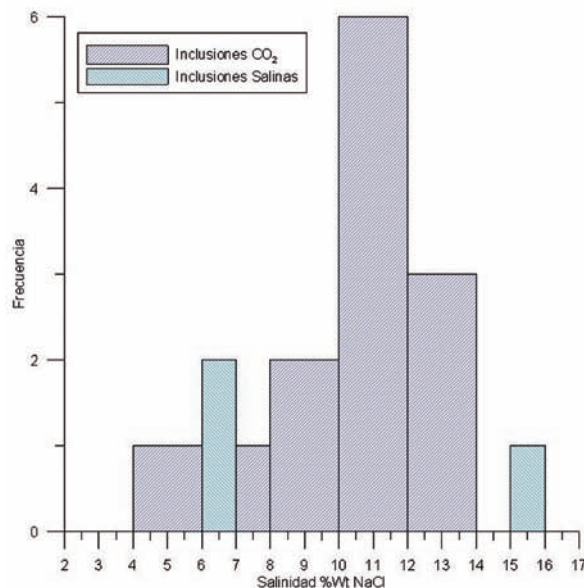
el primer grupo tiene un rango amplio de variación y es posible que las inclusiones hayan sido formadas en más de un evento, mientras que las inclusiones del segundo grupo tienen una mayor salinidad en un rango más restringido. Los datos de temperaturas de homogenización muestran en general una gran dispersión lo que dificulta su interpretación, esta dispersión es interpretada como relacionada con la

variación en la temperatura de los fluidos asociados a cada evento de precipitación de los diferentes niveles de carbonato. Se observa además una población de inclusiones de baja salinidad (<10%) con bajas temperaturas de homogenización (<200°C) y otra población poco definida en la que se aprecia una tendencia de aumento de la salinidad con el aumento en la temperatura de homogenización (FIGURA 13).

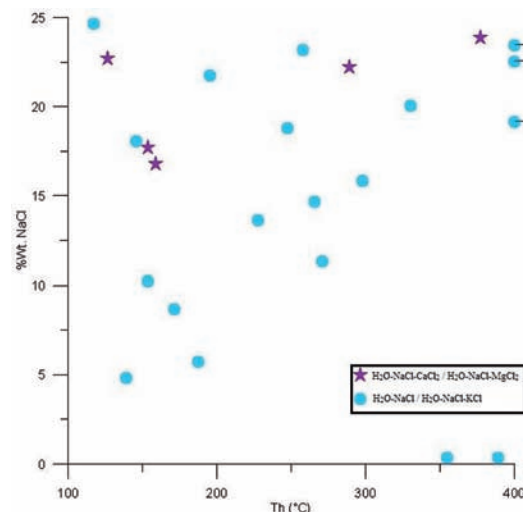
**TABLA 2.** Resultados de microtermometría para inclusiones fluidas hospedadas en plagioclasa.

Grupo	Cant.	Rango Tm °C	Promedio Tm °C	Rango % wt NaCl	Promedio %wt NaCl
Ricas en CO <sub>2</sub>	2	-8.2 a -7.2	-7.7	10.7 a 11.9	11.3
H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub>	11	-9.9 a -3.1	-7.1	5.1 a 13.8	10.4
Salinas	3	-12.0 a -3.8	-6.7	6.1 a 15.9	9.6

Tm: temperatura de fusión final del hielo.



**FIGURA 12.** Diagrama de salinidad (%wt NaCl) para inclusiones hospedadas en plagioclasa.



**FIGURA 13.** Diagrama temperatura de homogenización (Th) Vs. Salinidad (%wt NaCl). Se encuentran inclusiones con bajas temperaturas de homogenización (<200 °C) asociadas al evento hidrotermal con baja salinidad (<10%) y alta salinidad (>15%). Otras inclusiones muestran una relación directa entre el descenso de la temperatura de homogenización y la salinidad.

**TABLA 3.** Resultados de microtermometría para inclusiones fluidas hospedadas en carbonato.

Grupo	Cant.	Rango Tm °C	Promedio Tm °C	Rango Th °C	Promedio Th °C	Rango % wt NaCl	Promedio %wt NaCl
H <sub>2</sub> O-NaCl / H <sub>2</sub> O-NaCl-KCl	23	-16.8 a -0.2	-8.1	139.2 a 258.0	276.4	0.3 a 20.0	11.4
H <sub>2</sub> O-NaCl-CaCl <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O-NaCl-MgCl <sub>2</sub>	6	-20.5 a -12.9	-17.8	126.8 a 377	191.6	16.8 a 22.7	19.5

Tm: temperatura de fusión final del hielo, Th: temperatura de homogenización de la inclusión.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La evolución termal y química de los fluidos involucrados en el sistema hidrotermal del Volcán Nevado del Ruiz es importante para entender el sistema volcánico y para evaluar el potencial geotermal del mismo. Los modelos existentes se basan en las características de los fluidos termales que emanan en la zona de influencia del sistema (Sturchio *et al.*, 1988; López, 1992), en las características de las alteraciones observadas en superficie (Forero *et al.*, 2011), y en la interpretación petrológica de los productos volcánicos (e.g., para entender la configuración del edificio volcánico; Rayo-Rocha y Zuluaga, 2011; Melson *et al.*, 1990; Stix *et al.*, 2003).

Las características de fluidos involucrados durante las fases evolutivas de los fluidos hidrotermales asociados a la actividad volcánica pueden también estudiarse a partir del análisis de las inclusiones fluidas, estos minerales pueden ser producto de la alteración hidrotermal o minerales pre-existentes (formadores de roca) que fueron afectados en cierto grado por los fluidos hidrotermales circulantes. A través del análisis de muestras que representan diferentes litologías y que se encuentran a diferentes profundidades en la zona de influencia del sistema hidrotermal-volcánico, éste estudio de inclusiones fluidas permitió realizar la caracterización de los fluidos que intervienen en diferentes estados del sistema hidrotermal activo del Volcán Nevado del Ruiz.

Las venas bandeadas o coloformes de carbonatos observadas en el Pozo 3 se interpretan como estructuras relacionadas con ambientes donde se desarrollan manantiales de agua caliente y constituyen una fuerte evidencia de la presencia de un régimen epitermal asociado a procesos volcánicos (Echeveste, 2005). Adicionalmente, en estas venas se observa barita cuyo ambiente de formación está relacionado con el ingreso de soluciones en zonas oxidantes, cercanas a la superficie (Echavarría, 2004), lo que puede interpretarse como la manifestación de un evento tardío. Los resultados de los análisis de las inclusiones fluidas encontradas en estas venas se consideran entonces como información representativa para caracterizar los fluidos del sistema geotérmico y las condiciones actuales de las aguas termales del reservorio.

Los resultados de microtermometría apuntan a la formación de carbonatos en un ambiente hidrotermal con fluidos de salmuera concentrada (salinidad >15% y contenidos de CaCl<sub>2</sub> y/o MgCl<sub>2</sub>; Słowakiewicz, 2003). Los datos en las bandas sucesivas también indican que

a medida que ocurre la precipitación para formar la estructura coloforme hay un descenso progresivo en la temperatura y la salinidad. Las inclusiones en las bandas con temperatura de homogenización menor a 200°C con baja (<10%) y alta salinidad (>17%) se generaron probablemente en un evento de ebullición reciente. El inicio de ebullición se evidencia por el desarrollo de calcita en bandas (Etoh *et al.*, 2002; Echavarría, 2004), cuando el proceso avanza hay pérdida de volátiles y un aumento del pH y por tanto disolución del carbonato que empieza a ser reemplazado por sílice. Aunque este proceso de disolución y reemplazamiento de sílice no se observa en las muestras del pozo, si hay reportada silicificación en un afloramiento cercano a los pozos (Forero *et al.*, 2011). El aumento de la salinidad en las inclusiones fluidas puede indicar una concentración de sales debido a la pérdida de fluidos hacia la fase vapor durante el proceso de ebullición (Echavarría, 2004).

Las inclusiones fluidas analizadas en las litologías de los otros dos pozos no parecen relacionadas al sistema hidrotermal actual. La inclusiones hospedadas en venilla de cuarzo en las milonitas y que pertenecen al sistema CO<sub>2</sub> son interpretadas como asociadas a un evento metamórfico. Los datos de las inclusiones fluidas observadas en las plagioclasas de las lavas andesíticas son concordantes con un origen magmático de los fluidos y no parecen relacionarse con eventos secundarios, éstas inclusiones representan estados de inmiscibilidad durante el proceso de diferenciación magmática y cristalización fraccionada (Roedder, 1992). En las plagioclasas se observan además inclusiones fundidas, cuyas características morfológicas y distribución son similares a las de las inclusiones fluidas, lo que soporta la interpretación del origen magmático para éstas últimas.

Los resultados obtenidos con el conjunto de técnicas de análisis utilizadas, permiten concluir que únicamente un grupo de inclusiones fluidas analizadas (las hospedadas en carbonatos) representan fluidos hidrotermales actuales. Los resultados obtenidos de las inclusiones hospedadas en cuarzo (milonitas) y plagioclasa (andesitas) permiten identificar fluidos asociados a eventos relacionados con procesos magmáticos, de deformación y fracturamiento de las litologías del basamento del macizo volcánico.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es un producto del “Programa estratégico para la investigación y modelamiento del sistema hidrotermal magmático en áreas con potencial geotérmico localizadas en el flanco noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz, Colombia” financiado por

COLCIENCIAS Universidad Nacional, ISAGEN e INGEOMINAS (Programa 762 del 2009, Código 1101-454-25657). Los autores agradecen a Takashi Akatsuka de JMC Geothermal Engineering Co., Ltd. por su asesoría en el tema de inclusiones fluidas aplicadas a sistemas geotermales. Agradecemos también a Javier Mendéz de ISAGEN S.A. ESP por sus comentarios y sugerencias a una versión preliminar del manuscrito, así como a un evaluador anónimo. Los equipos usados para la caracterización con catodoluminiscencia (CITL CL Mk5) fueron adquiridos dentro del marco del proyecto mencionado arriba. El Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia permitió el uso de la microsonda electrónica (JEOL 8230) y de microscopios petrográficos para esta investigación.

## REFERENCIAS

- Brown, P. 1998. Fluid inclusions modeling for hydrothermal systems. Richards, J.P. and Larson, P.B, eds. Reviews in Economic Geology, Techniques in Hydrothermal Ore Deposits Geology, Society of Economic Geologists, Inc., 10: 151-172
- Echavarría, L. 2004. Los fluidos hidrotermales formadores de la mineralización epitermal el Dorado-Monserrat, Macizo del Deseado. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 59 (1): 70-82.
- Echeveste, H. 2005. Travertinos y jasperoides de Manantial Espejo, un ambiente Hot Spring Jurásico. Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz, Argentina. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis, 12 (1): 33-48.
- Etoh, J., Izawa, E., Watanabe, K., Taguchi, S. and Sekine, S. 2002. Bladed Quartz and its relationship to gold mineralization in the Hishikari low-Sulfidation epithermal gold deposit, Japan. Economic Geology, 97: 1841-1851.
- Forero, J., Zuluaga, C.A., and Mojica, J. 2011. Alteration related to hydrothermal activity of the Nevado del Ruiz Volcano (NRV), Colombia. Boletín de Geología, UIS, 33 (1): 59-67.
- Hall, D.L., Sterner, S.M. and Bodnar, R.J. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O solutions. Economic Geology, 83: 197-202.
- Izquierdo, G., Aragón, A. y Viggiano, C. 2008. Microtermometría de inclusiones fluidas en ambientes hidrotermales. Caso de estudio del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS México. Boletín IIE: 95-101.
- López, D. A. 1992. The hydrothermal system of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *PhD thesis Louisiana State University.*
- Mejía, E.L., Velandia, F., Zuluaga, C.A., López, J.A. y Cramer, T. 2012. Análisis estructural al noreste del Volcán Nevado del Ruíz, Colombia – Aporte a la exploración geotérmica. Boletín de Geología, UIS, 34 (1): 27-41
- Melson W. G., Allan J. F., Jerez D.R., Nelen J., Calvache M.L., Williams S.N., Fournelle J., and Perfit M. 1990. Water contents, temperatures and diversity of the magmas of the catastrophic eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, November 13, 1985. In: S. N. Williams (Editor), Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, I. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 41: 97-126.
- Rayo-Rocha, L. y Zuluaga, C.A. 2011. Procesos magmáticos en el Volcán Nevado del Ruiz: Un análisis cuantitativo textural. Boletín de Geología, UIS, 33(2): 59-72.
- Roedder, E. 1992. Fluid Inclusion Evidence for Immiscibility in Magmatic Differentiation. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56: 5-20.
- Słowakiewicz, M. 2003. Fluid inclusion data in calcite from the Upper Triassic hot-spring travertines in southern Poland. Journal of Geochemical Exploration, 78-79: 123-126.
- Sterner, S.M., Hall, D.L., and Bodnar, R.J. 1988. Synthetic Fluid Inclusions: V. Solubility reactions in the system NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O under vapor-saturated conditions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52: 989-1006.
- Stix, J., Layne G.D., and Williams S.N. 2003. Mechanisms of degassing at Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. Journal of the Geological Society, 16 (4): 507-521.
- Sturchio, N., Williams, S., Garcia, N., and Londoño, A. 1988. The hydrothermal system of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. Bulletin of Volcanology, 50: 399-412.
- Van den Kerkhof, A.M., and Hein, U.F. 2001. Fluid inclusion petrography. Lithos, 55: 27-47.