

Estudio de inclusión fluidas

1. Marco teórico

En la formación de los yacimientos minerales es fundamental la presencia de fluidos con capacidad de transportar y depositar metales. La evidencia directa de tales paleofluidos son las inclusiones fluidas (IF), que pueden ser contemporáneos con el depósito mineral o pudieron haber circulado por este en algún periodo de su historia geológica. Estas pueden suministrar información sobre las condiciones fisicoquímicas (temperatura, presión, densidad, composición) de los paleofluidos, que permite reconstruir historia de formación y modificación del sistema hidrotermal sin y post-mineralización (Camprubí, 2010; Bodnar et al., 2014).

Las IF son concentraciones microscópicas de líquido, gas, sólido y/o fundido atrapadas en interrupciones o defectos de la estructura cristalina de los minerales durante la formación de los mismos o posteriormente como relleno de fracturas. La mayoría de minerales contienen inclusiones fluidas a excepción de los filosilicatos, debido a que los planos de exfoliación bien desarrollados en una dirección favorecen la filtración y pérdida de los fluidos a través de estos. En el 90% de los estudios de IF es empleado el cuarzo por su transparencia, ausencia de clivaje, facilidad de recristalización y abundancia en los diferentes ambientes geológicos. También son analizados la calcita, fluorita, apatito, esfalerita y casiterita. En el caso de los minerales opacos, como los sulfuros, se debe usar un microscopio petrográfico con sensor infrarrojo. (Korzeniewski, 2002; Van den Kerkhof y Hein, 2001).

La mayoría de inclusiones fluidas estudiadas tienen diámetros que varían entre 5 y 20 micras, pero pueden encontrarse con tamaños inferiores a 1 micra o superiores a 100 micras, que incluso se observan en muestra de mano (Van den Kerkhof y Hein, 2001). En promedio contienen de 10^{-13} a 10^{-6} gramos de fluido. Por lo general, los grupos de IF ocupan menos del

0.1% del volumen total de un cristal. En el caso de los minerales secundarios es poco común que contengan inclusiones fluidas, así como las zonas de crecimiento y sobrecimiento de un mineral, que tienden a tener menor concentración de IF en comparación con las zonas internas (Korzeniewski, 2002). Con respecto a la morfología, está relacionada con la estructura cristalina del mineral huésped y puede presentarse en formas alargadas, geométricas, redondeadas, ameboideas y ramificadas. La composición también influye en la morfología, siendo las inclusiones fluidas acuosas más variadas que las carbónicas (Bodnar, 2017; Mangas y Sierra, 2004).

En 1994, Goldstein y Reynolds propusieron el concepto familia de inclusiones fluidas (FIA, por sus siglas en inglés), para caracterizar conjuntos de inclusiones fluidas atrapadas de forma simultánea con la misma presión, temperatura y composición. Las inclusiones fluidas que hacen parte de la FIA representan un evento hidrotermal que tuvo lugar durante la historia del depósito mineral. Posteriormente, en 1998 Fonarev et al. introdujeron la denominación grupo de inclusiones sincrónicas (GSI, por sus siglas en inglés), que contrasta con el modelo anterior en que cada grupo de inclusiones se limita entre 10 y 20, para efectos de análisis geoestadísticos en microtermometría (Randive et al., 2014).

A la hora de llevar a cabo estudio de inclusiones fluidas es fundamental tener en cuenta cuatro suposiciones, conocidas como **Reglas de Roedder** (1981). La aceptación y verificación de estas determina la utilidad de la información interpretada.

1. Las inclusiones fluidas son muestras representativas de fluidos homogéneos atrapados durante la formación del depósito mineral. Sin embargo, existen sistemas heterogéneos con diferentes fases debido a procesos de ebullición, atrapamiento de dos fluidos inmiscibles y contaminación por sólidos

provenientes de ruptura de la roca caja y minerales que cristalizan de forma simultánea (Mangas y Sierra, 2004; Randive et al., 2014).

2. La masa permanece constante, ningún material es incorporado o perdido después del atrapamiento. A temperaturas menores de 500 °C está conjetura es válida, pero cuando son mayores la difusión, en especial la del H₂, puede ser significativa (Mangas y Sierra, 2004; Randive et al., 2014).
3. Las inclusiones fluidas son sistemas isocóricos, es decir, el volumen o el tamaño permanecen constantes. Esto hace que la densidad aparente sea constante y, por lo tanto, las IF puedan ser usadas como geotermómetros y geobarómetros (Mangas y Sierra, 2004; Randive et al., 2014).
4. Es reconocida en espacio y tiempo la relación entre el evento de atrapamiento de las IF y los procesos geológicos formadores del depósito mineral. En algunos casos resulta difícil comprobar esta hipótesis, por ejemplo, en asociaciones de cuarzo y sulfuros las IF analizadas en el cuarzo no necesariamente pertenecen al evento formador de la mena, sino a la cristalización del cuarzo (Mangas y Sierra, 2004).

Las inclusiones fluidas analizadas deben ser cavidades herméticas, en las que la densidad y composición del fluido no ha variado desde el proceso de atrapamiento. Son sistemas termodinámicos aislados, lo cual se puede verificar en los análisis microtermométricos cuando la IF recobra sus fases iniciales al volver a temperatura ambiente (Mangas y Sierra, 2004).

Es posible que procesos subsiguientes al atrapamiento de las inclusiones fluidas las modifiquen y produzcan reducción de volumen, cambio de morfología y pérdida de fluidos (Randive et al., 2014). La información obtenida a partir de estas inclusiones da lugar a

interpretaciones parcial o totalmente erróneas, por lo que es necesario un minucioso análisis petrográfico previo a la microtermometría para identificarlas. En caso de ser pasados por alto, los datos alterados podrían identificarse al aplicar un análisis geoestadístico (Mangas y Sierra, 2004). Según lo descrito por Randive et al (2014), los mecanismos de modificación se describen a continuación.

- **Recristalización:** cambios significativos en las condiciones fisicoquímicas del sistema hidrotermal, generan cristalización de fluidos o recristalización de sólidos contenidos en la inclusión fluida, provocando cambios en la morfología de las paredes y desarrollo de cristal negativo.
- **Dilatación y estrangulamiento (“necking-down”):** previamente al desarrollo de cristal negativo, los procesos de disolución y precipitación durante la disminución de temperaturas, producen alargamiento de inclusiones y formación de “senderos” de inclusiones más pequeñas, inicialmente conectadas entre sí por capilaridades.
- **Decrepitación:** las variaciones de temperatura – presión entre la inclusión fluida y el sistema hidrotermal, pueden provocar el colapso de la misma a partir de dos escenarios: explosión, la presión del sistema disminuye con respecto a la IF; implosión, la presión del sistema aumenta con respecto a la IF.
- **Filtración:** el fluido contenido en la inclusión se puede filtrar al exterior por procesos deformativos.

A lo largo de los años se han propuesto diversas clasificaciones que engloban las diferentes variedades de inclusiones fluidas basándose en la composición, origen y

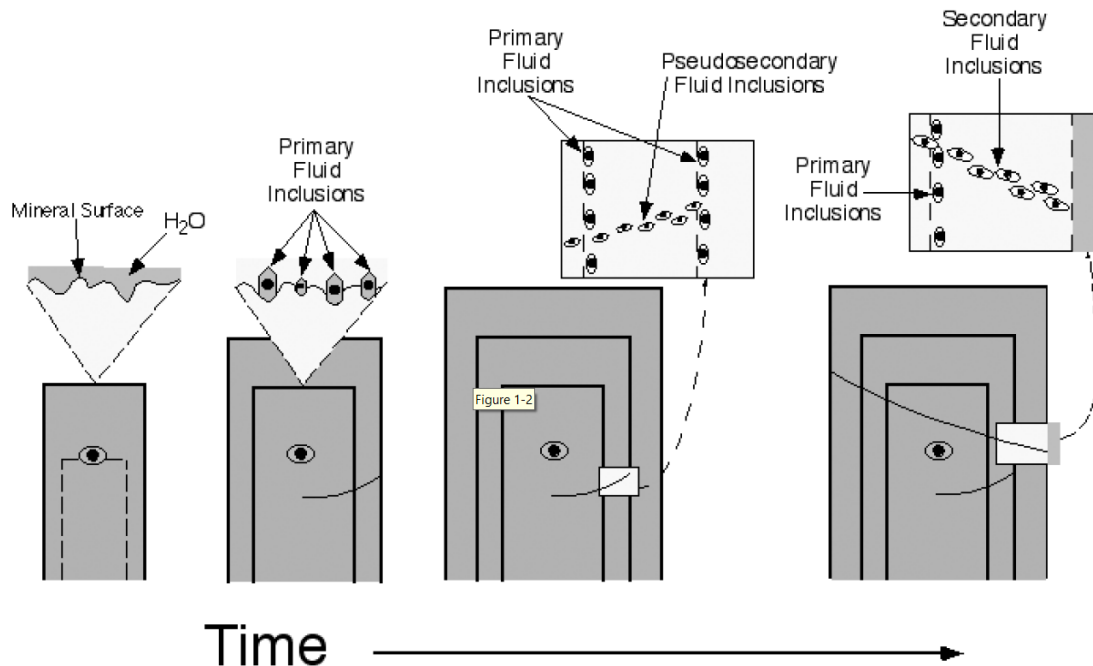
proporción relativa de fases. Dos de estas han sido las más utilizadas por la mayoría de estudios, debido a su practicidad de implementación y la amplia información aportada.

- Clasificación según el origen

Propuesta por Roedder (1976, 1981, 1984) y Bodnar (2003) (como se citó en Randive et al., 2014), se basa en el periodo de atrapamiento de las inclusiones fluidas con respecto a la cristalización del mineral que las alberga. Plantea tres tipos de inclusiones fluidas (Figura 1): **Primarias**, se forman durante el crecimiento del cristal huésped, generalmente a lo largo de las caras del cristal o zonas de crecimiento; ocurren de forma solitaria o asilada y son los mejores indicadores de las condiciones fisicoquímicas durante la formación del cristal. **Secundarias**, se originan con posterioridad a la cristalización del mineral huésped, son atrapadas a lo largo de fracturas que por lo general son intergranulares, es decir, atraviesan los bordes de los cristales por lo que estos grupos de IF se encuentran agrupadas en forma senderos o lineamientos. **Pseudosecundarias**, se forman cuando el cristal se fractura durante su crecimiento, de modo que aparecen como agrupaciones alineadas que finalizan abruptamente en las zonas de crecimiento o bordes de cristal; al igual que las primarias son evidencia del fluido presente durante el crecimiento del cristal (Mangas y Sierra, 2004; Randive et al., 2014).

Figura 1.

Clasificación de las inclusiones fluidas según su origen



Nota: Descripción grafica de las formación de inclusiones fluidas primarias, secundarias y pseudosecundarias en relación con la cristalización del mineral huésped. Tomado de Bodnar, 2003.

- Clasificación según el número de fases

Nash (1976) y Sheperd (1985) (como se citó en Camprubí, 2010) clasificaron las inclusiones fluidas según la cantidad y proporción de fases observables a temperatura ambiente:

- Monofásicas de líquido (**L**): constituidas únicamente por fase líquida, generalmente acuosa. Son inclusiones fluidas de salinidad baja (<23% peso equivalente NaCl).
- Bifásicas ricas en líquido (**L+V**): la fase predominante es la líquida y la burbuja de vapor representa entre un 40% y 50% del volumen total. Por lo general, son de salinidad baja (<23% peso equivalente NaCl).

- Bifásicas ricas en vapor ($V+L$): la burbuja correspondiente a la fase vapor ocupa más del 50% del volumen total.
- Monofásicas de vapor (V): sin la presencia visible de líquido, están constituidas en su totalidad por fase vapor, generalmente conformada por mezcla de CO_2 , CH_4 , N_2 , entre otros gases.
- Multifásicas con sólidos e inclusiones multisólidas ($S+L\pm V$): las proporciones de líquido y vapor son variables. Contienen una fase o más de cristales hijos, lo cual indica que están saturadas en sales ($>23\%$ peso equivalente $NaCl$). Si los sólidos ocupan más del 50% del volumen total, se denominan IF multisólidas. Cuando este tipo y el tipo $V+L$ se encuentran de forma simultánea en el mismo cristal y sus temperaturas de homogeneización son similares, indican un sistema de alta temperatura.
- Con líquidos inmiscibles ($L_1+L_2\pm V$): contienen dos o más fases líquidas inmiscibles, siendo una acuosa y la otra rica en CO_2 o HC. Las IF ricas en CO_2 pueden presentar “doble burbuja”, una rica en vapor y otra en líquido.

La **microtermometría** es un método no destructivo empleado para determinar los cambios de fases que ocurren en las inclusiones fluidas en función de variaciones progresivas de temperaturas entre $-200^{\circ}C$ y $+1500^{\circ}C$. Previamente a la implementación de esta técnica, se debe realizar un estudio petrográfico mineralógico para definir las asociaciones minerales y su sucesión temporal en etapas de mineralización y seguidamente la petrografía de inclusiones fluidas con la finalidad de determinar características de las poblaciones y temporalidad relativa.

El procedimiento estándar de la microtermometría inicia con el enfriamiento hasta la solidificación o congelamiento de la inclusión fluida, a partir de allí se inicia el calentamiento

y los principales parámetros medidos son los siguientes: (a) temperatura eutéctica, es la primera aparición de fase líquida, es característica para cada sistema por lo que indica composición; (b) temperatura de fusión del hielo y otras fases sólidas formadas por sobrecongelamiento (hidrohalita, clatratos), permiten calcular la salinidad del fluido; (c) temperatura de solubilización de cristales hijos, permite estimar la salinidad mediante el uso de ecuaciones de estado; (d) temperatura de homogenización, es el paso de fases líquida y vapor a una sola fase líquida, vapor o supercrítica, es equivalente a la temperatura mínima de atrapamiento de la inclusión fluida. (Camprubí, 2010; Randive et al., 2014; Oviedo, 2018). Estos datos aportan información fundamental para la reconstrucción de la historia geológica del sistema hidrotermal coexistente con el atrapamiento de las inclusiones fluidas como es el caso de temperatura y presión mínimas de precipitación mineral, composición y densidades de los fluidos, zonaciones térmicas y composicionales, canales de ascenso de los fluidos, tipo de depósito mineral, entre otras características.

2. Petrografía

Se llevó a cabo luego de realizar el análisis petrográfico mineralógico, fueron empleadas dos muestras de relleno hidrotermal en secciones delgadas doblemente pulidas con espesor entre 60 y 100 micras. Para lo anterior, se utilizó un microscopio petrográfico convencional referencia Leica DM750P. Dependiendo de la capacidad de aumento del microscopio se definen los tamaños de inclusiones fluidas a ser estudiados, para este caso las inclusiones fluidas tienen un tamaño promedio de 5 micras.

En el estudio petrográfico de inclusiones fluidas se evalúan las relaciones texturales entre el mineral huésped y los grupos de inclusiones para determinar la representatividad de los fluidos que estas contienen sobre los procesos geológicos de interés. Específicamente, se describe la morfología, tamaño, componentes o fases constitutivas (líquido, vapor,

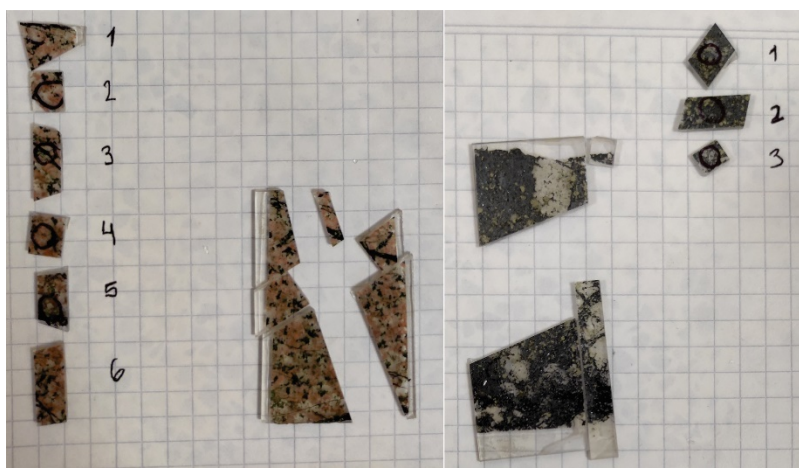
mineralogía de cristales atrapados e hijos), relaciones porcentuales volumétricas entre las fases, cronología relativa y origen según su disposición espacial (primarias, secundarias y pseudosecundarias), así como la presencia y naturaleza de cambios de volumen y modificaciones post-atrapamiento.

3. Microtermometría

La extracción de los chips analizados se debe al tamaño del portaobjeto de la placa térmica referencia Linkam THMS600.

Figura 2.

Chips extraídos de secciones delgadas para análisis microtermométrico



Nota: Secciones delgadas correspondientes a muestras de venillas de magnetita (izquierda) y veta de especularita (derecha).

Para las inclusiones bifásicas y multifásicas los datos corresponden a las temperatura finales de homogenización. Para evitar decrepitación de las inclusiones bifásicas por diferencias de temperatura, primero se calentaron estas y luego las multifásicas.

Los valores de salinidad se expresan en porcentaje en peso equivalente de NaCl, ya que las inclusiones por lo general tienen otras sales disueltas, pero como es una estimación relativa de salinidad se asume un sistema simple de NaCl.

Tabla 1.

Datos obtenidos a partir del análisis microtermométrico

Etapas de mineralización	Fases	Origen	Th_v (°C)	Tf_s (°C)	Salinidad (%peso eq. NaCl)	Densidad (g/cm³)
Venillas de magnetita	L+V+S	Primaria	163.8	338.9	40.83	1.04
	L+V+S	Primaria	155.9	322.2	39.54	1.05
	L+V+S	Primaria	160.4	340.8	40.98	1.02
	L+V+S	Primaria	162.7	321.2	39.47	1.03
	L+V+S	Primaria	514	550	-	-
	V+L	Primaria	447.5			
	L+V	Secundaria	196.0			
	L+V	Primaria	261.6			
	L+V	Primaria	208.1			
	L+V	Primaria	196.1		N/A	
	L+V	Secundaria	191.8			
	L+V	Primaria	162.0			
	L+V	Primaria	203.3			
	L+V	Primaria	195.2			
Veta de especularita	L+V+S	Primaria	156.7	268.2	35.77	1.10
	L+V+S	Primaria	165.1	262.0	35.38	1.10
	L+V+S	Primaria	179.1	241.6	34.14	1.15
	L+V+S	Primaria	159.3	272.4	36.04	1.10
	L+V+S	Primaria	187.4	220.6	32.96	1.11
	L+V+S	Primaria	160.5	215.6	32.70	1.12
	L+V+S	Primaria	152.0	251.7	34.75	1.10
	L+V	Primaria	163.2			
	L+V	Primaria	163.8			
	L+V	Primaria	186.3			
	L+V	Primaria	168.3		N/A	
	L+V	Primaria	191.2			
	L+V	Primaria	155.4			

L+V	Primaria	173.2
-----	----------	-------

Nota: Th_v: temperatura de homogenización de la fase vapor. Tf_s: temperatura de fusión de la halita. Para las IF bifásicas no se calcula la salinidad y densidad, ya que no se cuenta con la temperatura eutéctica.

Referencias bibliográficas

- Bodnar, R. (2003) Introduction to Fluid Inclusions. En: Samson, I., Anderson, A. y Marsh, D. (Eds.), *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineral. Assoc. Canada, Short Course 32, 1-8.
- Bodnar, R. (2017). Fluid Inclusions. En W. White (Eds.), *Encyclopedia of Geochemistry*. Springer International Publishing.
- Camprubí, A. (2010). Criterios para la exploración minera mediante microtermometría de inclusiones fluidas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 62(1), 25-42.
<http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2010v62n1a2>
- Korzeniewski, L. (2002). Inclusiones fluidas aplicadas a la exploración minera. *Servicio geológico minero argentino*, Publicación 165.
- Oviedo, O. (2018). *Estudio de inclusiones fluidas en muestras de núcleo de pozos geotérmicos* (Diplomado). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Mangas J. y Sierra, J. (2004). Las inclusiones fluidas: Método de análisis e interpretación. En R. Lunar y R. Oyarzun (Eds.), *Yacimientos minerales* (pp. 79-146). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Randive, K., Hari, K., Dora, M., Malpe, D. y Bhondwe, A. (2014). Study of fluid inclusions: Methods, techniques and applications. *Gondwana geological magazine* 29(1-2), 19-29.
- Van den Kerkhof, A. y Hein, U. (2001). Fluid inclusions petrography. *Lithos*, 55(2001), 27-47.
[https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00037-2)