



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA MINERALIZACIÓN AURÍFERA EN LA MINA EL GRAN PORVENIR, LÍBANO, TOLIMA**

**Diana Lucía Angée Moreno**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Maestría en Ciencias - Geología  
Bogotá, Colombia  
2022

# ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA MINERALIZACIÓN AURÍFERA EN LA MINA EL GRAN PORVENIR, LÍBANO, TOLIMA

**Diana Lucía Angée Moreno**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ciencias - Geología**

Director (a):

MSc Juan Carlos Molano

Codirector (a):

Ph.D Colombo Celso Gaeta Tassinari

Línea de Investigación:

Metalogenia y Recursos Minerales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Maestría en Ciencias - Geología

Bogotá, Colombia

2022

## *Dedicatoria*

*Para mis papás, Clara y Benjamín, por siempre creer en mí y llevarme adonde tengo que estar. A mi hermano, Eduardo, por su compañía infinita y a mis gatos por la serotonina. A Alejo y Nats, por su amor y paciencia en el proceso.*

*A mi tío, Jose Manuel, que desde el cielo se sonríe con el escudo que lleva esta tesis.*

## **Declaración de obra original**

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

---

Diana Lucía Angée Moreno

Fecha 1/08/2022

## **Agradecimientos**

A la Mina El Gran Porvenir por el financiamiento de este proyecto y el apoyo que brindaron desde el primer día.

## Resumen

### **Origen y evolución de la mineralización aurífera en la Mina El Gran Porvenir, Líbano, Tolima.**

La mineralización aurífera de El Gran Porvenir se encuentra en la Cordillera Central de Los Andes colombianos, emplazada en esquistos grafitosos del Complejo Cajamarca, y consta principalmente de vetas de cuarzo y sulfuros como galena, esfalerita, pirita, calcopirita y pirrotina. Con la intención de clasificar el yacimiento, se realizó microtermometría e isotopía de S y Pb-Pb. Por medio de la microtermometría se pudo establecer que la temperatura de formación de la mineralización oscila entre los 243°C y 348°C. El fluido mineralizante está compuesto por H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y su sistema salino es de NaCl, KCl con una salinidad promedio de 8,6 wt% NaCl. Los resultados de  $\delta^{34}\text{S}$  sugieren una génesis metamórfica o sedimentaria para los sulfuros con valores entre los -4,1 y -11 ‰. Resultados similares se encontraron en los isótopos de Pb, los cuales arrojan una fuente heterogénea, asociada a orógenos con aportes importantes de la corteza superior. Los análisis realizados y el contexto geológico permiten clasificar la Mina El Gran Porvenir como un yacimiento de oro orogénico.

**Palabras clave: oro orogénico, isotopía, microtermometría, mineralización.**

## Abstract

### **Genesis and evolution of the gold mineralization at El Gran Porvenir mine, Líbano, Tolima**

The gold mineralization at El Gran Porvenir Mine is in the Central Mountain Range of the Colombian Andes, located in graphitic schists of the Cajamarca Complex, and consists mainly of quartz veins and sulfides such as galena, sphalerite, pyrite, chalcopyrite and pyrrhotite. In order to classify the deposit, microthermometry and S and Pb-Pb isotopies were performed. By means of the microthermometry it was possible to establish that the mineralization formation temperature oscillates between 243°C and 348°C. The mineralizing fluid is composed of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and its salt system is NaCl, KCl with an average salinity of 8.6 wt% NaCl. The  $\delta^{34}\text{S}$  results suggest a metamorphic or sedimentary genesis for the sulfides with values between -4.1 and -11 ‰. Similar results were found for Pb isotopes, which yield a heterogeneous source, associated with orogens with important contributions from the upper crust. The analyses performed and the geological context allow us to classify the El Gran Porvenir Mine as an orogenic gold deposit.

**Keywords: Orogenic gold, isotopy, microthermometry, mineralization.**



# Contenido

	<b>Pág.</b>
<b>1. Localización.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Contexto geológico.....</b>	<b>4</b>
2.1 Geología Regional	4
2.2 Geología del depósito	6
2.2.1 Petrografía.....	8
2.2.2 Metalografía.....	10
<b>3. Metodología.....</b>	<b>15</b>
<b>4. Resultados.....</b>	<b>18</b>
4.1 Raman	18
4.2 Microtermometría	20
4.3 Isótopos de azufre ( $\delta^{34}\text{S}$ )	25
4.4 Isótopos de plomo (Pb-Pb)	27
<b>5. Discusión.....</b>	<b>30</b>
5.1 Composición y características de formación del fluido mineralizante.	30
5.2 Fuente del azufre	32
5.3 Fuente del plomo	33
<b>6. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>35</b>
6.1 Conclusiones	35
6.2 Recomendaciones	36

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Imagen satelital de la Mina El Gran Porvenir y su ubicación en el territorio nacional.	3
Figura 2. Mapa Geológico de los alrededores del Líbano, Tolima. Modificado de Gómez et al., 2015.	6
Figura 3. Edades de las posibles fuentes de la mineralización de la Mina El Gran Porvenir según los autores mencionados en el texto.	6
Figura 4. Diferentes tipos de vetas y dique intruyendo esquistos grafitosos del Complejo Cajamarca.	8
Figura 5. Contacto veta/dique, y acercamiento al dique en 5X, NP.	9
Figura 6. Textura lepidoblástica de grafito y moscovita en la roca cada. 5X, NP.	9
Figura 7. Presencia de sulfuros en la roca caja. 5X, NP.	10
Figura 8. Vetillas de carbonato con sulfuros atravesando la roca caja.	10
Figura 9. Sección petrográfica del dique.	11
Figura 10. Oro albergado en fracturas de pirita, asociado a galena y esfalerita.	12
Figura 11. Pirita, galena, esfalerita rodeados de cuarzo. 10x, NP.	13
Figura 12. Texturas de mena. Izquierda: Exsolución de galena y pirita. Derecha: Chalcopyrite disease de calcopirita en esfalerita.	13
Figura 13. Pseudomorfismo de pirrotina en pirita.	14
Figura 14. Secuencia paragenética de la Mina El Gran Porvenir.	15
Figura 15. Mapa interno de la Mina El Gran Porvenir y distribución de los análisis realizados.	17
Figura 16. Muestras analizadas de cada mineral para isotopía de S y Pb.	18
Figura 17. Espectro raman y números de onda relativos de los gases más comunes en inclusiones fluidas (Modificado de Frezzoti et al., 2012).	21
Figura 18. Comportamiento de las inclusiones fluidas de la Mina El Gran Porvenir a diferentes temperaturas.	23
Figura 19. Clasificación de inclusiones fluidas según su composición según Nash (1976)	24
Figura 20. Distribución de inclusiones fluidas en la Mina El Gran Porvenir según Nash (1976)	25
Figura 21. Frecuencia de densidades del fluido mineralizante en El Gran Porvenir.	

---

Figura 22. Frecuencia de temperaturas de homogenización del fluido mineralizante en El Gran Porvenir.	26
Figura 23. Valores de $\delta^{34}\text{S}$ de los ambientes geológicos más importantes (Hoefs, 201	28
Figura 24. Plumbotectonics II, tomado de Zartman y Doe, 1981.	30
Figura 25. Clasificación de la Mina El Gran Porvenir, según salinidad y cantidades molares de $\text{CO}_2$ . Modificado de Ridley y Diamond (2000).	34
Figura 26. Clasificación de la Mina El Gran Porvenir según temperaturas de formación y salinidad. Modificado de Hurai et al., 2015.	35
Figura 27. Clasificación de la Mina El Gran Porvenir según la fuente de S. Modificado de Hoefs (2015).	36
Figura 28. Clasificación de la Mina El Gran Porvenir según isotopía de Pb. Modificado de Zartman y Doe, 1981.	37



# Introducción

La mineralización aurífera de La Mina El Gran Porvenir se encuentra en la Cordillera Central de Colombia, al norte del departamento del Tolima. Allí, la mineralización está distribuida en vetas de cuarzo. La veta principal puede presentarse con diferentes texturas, pero las más comunes e importantes son: 1) Bandeada: con alta presencia de sulfuros e intercalaciones de cuarzo y mena; y 2) Masiva: veta de cuarzo masivo con presencia moderada de sulfuros de manera diseminada. El depósito está estructuralmente controlado por las Fallas de Palestina y Honda, sumadas a fallas locales de menor extensión que producen estructuras tipo *boudinage* en las vetas. En ocasiones genera zonas ricas en oro y otras, logra la desaparición de las estructuras.

Tras años de producción minera, el enfoque investigativo de esta zona del país ha sido nulo. Por ello, es de suma importancia realizar este trabajo que trata temas base como la mineralogía y específicos como la firma isotópica del yacimiento, análisis que han procurado el mejoramiento de los procesos extractivos y de exploración. Regionalmente, el impacto de esta información permite clasificar y conocer los depósitos de la Cordillera Central, sumada a la construcción de un contexto geológico y metalogénico que permite aumentar el conocimiento de esta área específica en el país. Por medio de petrografía, metalografía, microraman, microtermometría e isotopía, esta investigación busca caracterizar el fluido mineralizante de la Mina El Gran Porvenir, entender los procesos que dieron origen y conocer su firma isotópica para lograr entender su génesis, con el fin de diseñar una clasificación apropiada y precisa del yacimiento.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Establecer el origen y la evolución de los fluidos de la Mina el Gran Porvenir.

### **Objetivos específicos**

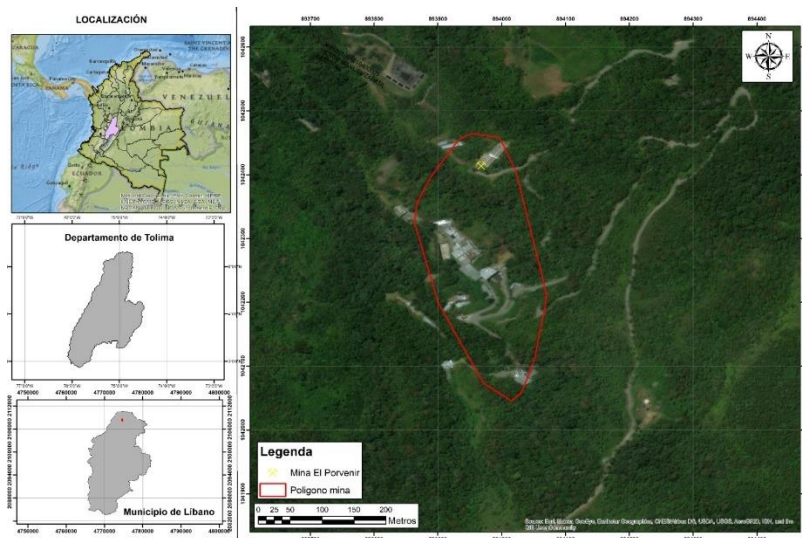
Conocer la firma isotópica de los fluidos del yacimiento.

Determinar qué evento geológico está relacionado con el origen de la mineralización.

Clasificar el yacimiento de oro de la Mina El Gran Porvenir.

# 1. Localización

La Mina El Gran Porvenir (MGP) se encuentra en la Cordillera Central de los Andes Colombianos, al norte del departamento del Tolima en el municipio del Líbano.



**Figura 1.** Imagen satelital de la Mina El Gran Porvenir y su ubicación en el territorio nacional.

Desde la cabecera municipal del Líbano se puede acceder a la mina por dos vías secundarias. Por un lado, está la vía a la vereda La Polka, esta es la ruta más accesible en términos de terreno y seguridad. La segunda opción es acceder desde el barrio Colollita, con una carretera menos frecuentada y sin un mantenimiento frecuente. En cualquiera de los dos casos, el tiempo de recorrido es aproximadamente de 50 minutos.

Otras opciones de acceso son: desde el corregimiento de Convenio, hacia la Vereda Las Delicias y posteriormente El Sirpe – El Porvenir; también, la vía al municipio de Villa Hermosa, en la vereda Bulgaria. Finalmente, por la zona de *la regresiva* se llega a la vereda Meseta Baja y después se encuentra El Porvenir.

El yacimiento de la MGP se ubica en la vereda El Porvenir - Matefique, del corregimiento del Convenio, y sus áreas de explotación se ubican sobre la cuenca del río Lagunilla.

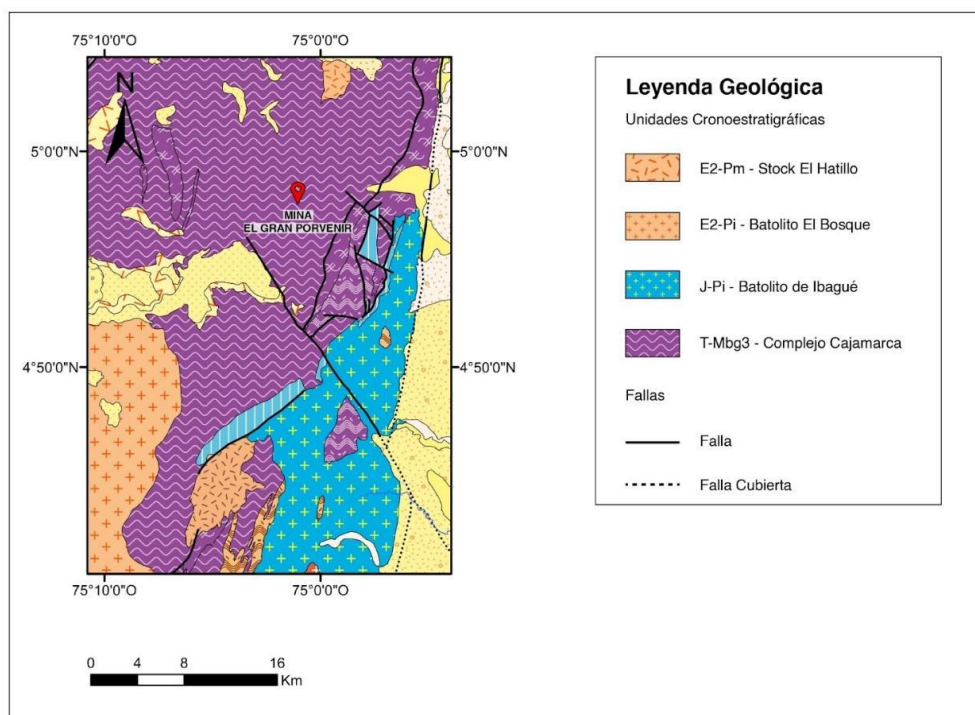
## **2. Contexto geológico**

### **2.1 Geología Regional**

La Cordillera Central de Colombia se compone de dos terrenos principales, definidos por Restrepo y Toussaint en 1998: Terreno Tahamí y Terreno Chibcha. El primero conforma el basamento del norte de la Cordillera (localización de la zona de estudio), se extiende hacia el sur y se estrecha progresivamente hasta desaparecer cerca al límite con Ecuador (Restrepo et al., 2009). Durante mediados del Pérmico, este terreno tuvo magmatismo que intruyó sedimentos carboníferos (Restrepo et al., 2011). El metamorfismo de este terreno se origina en el Triásico por orogenia en el margen continental de Pangea (Restrepo et al., 2009).

Como basamento de la Cordillera Central se encuentra el Complejo Cajamarca, limitado al este por el sistema de Fallas Otú-Pericos y al oeste por el sistema de Fallas de Romeral. Se compone de esquistos gráficas, cuarzosmoscovíticos, cloríticos y anfibólicos; filitas; cuarcitas; mármoles, y serpentinitas (Gómez et al., 2015). Estas rocas se encuentran en facies esquistos verdes a facies anfibolitas en un cinturón de baja presión (Toro et al., 2005). Su metamorfismo se dio durante el Triásico Tardío, afectando basaltos, granitos y rocas sedimentarias de la parte oeste de Pangea (Restrepo et al., 2011). Sin embargo, se han encontrado edades Jurásicas en Anfibolitas del Complejo Cajamarca que obtuvieron

edades Jurásicas (40Ar-39Ar plateau ages of 147–158 Ma), indicando un evento de colisión más reciente (Blanco-Quintero et al., 2014).



*Figura 2.* Mapa geológico de los alrededores Líbano, Tolima. Modificado de Gómez et al., 2015.

Edades (m.a.)	250	200	150	100	65	55	45	35	25	Unidades
						■				Stock El Hatillo
						■				Batolito del Bosque
			■							Batolito de Ibagué
	●									Complejo Cajamarca

*Figura 3.* Edades de las posibles fuentes de la mineralización de la Mina El Gran Porvenir según los autores mencionados en el texto.

Intruyendo el Complejo Cajamarca, cerca de la zona de estudio, se encuentra el stock el Hatillo, el Batolito del Bosque y el Batolito de Ibagué. El primero está compuesto por granodioritas con plagioclasa An<sub>25–35</sub> (55–65%), cuarzo (15–25%), feldespato potásico (5–15%) y biotita (5–15%). Estas rocas intruyeron metapelitas de edad mesozoica que cerca de la intrusión sufrieron metamorfismo de contacto y formaron esquistos ricos en biotita. El segundo es de composición granodiorítica con plagioclasa An<sub>30–40</sub> (50–60%), cuarzo (20–30%), Feldespato K, (10–20%) y biotita (10–15%); y sus minerales accesorios principales son el circón y el apatito p. Los dos cuerpos tienen edades de cristalización U-Pb entre hace 60 y 53 millones de años (Bustamante et al., 2017). Finalmente, el tercero está compuesto por dioritas, granitos y granodioritas de carácter calco-alcalino cuya edad mínima y máxima de cristalización indica magmatismo relacionado a subducción desde ~180 Ma hasta ~147 Ma (Villagomez et al., 2011).

## 2.2 Geología del depósito

La mineralización de la Mina El Gran Porvenir se encuentra hospedada en vetas de cuarzo, dentro del Complejo Cajamarca. Localmente consta de esquistos grafitosos y moscovíticos en facies esquistos verde, compuestos por cuarzo, carbonatos, plagioclasa, grafito, moscovita, scheelita, clorita, clinozoisita, biotita y apatito. Estas rocas lograron un metamorfismo regional de bajo grado, alcanzando las facies esquistos verde.

La foliación de los esquistos tiene una dirección N-NE y en zonas cerca de las vetas pueden apreciarse mineralizaciones de pirita, calcopirita, galena y esfalerita diseminadas; en ocasiones concordantes con la foliación de la roca caja.

La mineralización en la Mina El Gran Porvenir está albergada en vetas de cuarzo con dirección NE y buzamientos variables hacia el NW. Existen dos tipos de texturas en la veta principal y algunos eventos posteriores definidos por vetillas de menor tamaño:

- Textura cuarzo masivo: definida por cuarzo de textura masiva con sulfuros diseminados en cantidades moderadas. Los minerales que caracterizan este evento son la scheelita y la pirrotina. Adicionalmente, se encuentra pirita, calcopirita, galena, esfalerita, oro, melnikovita y carbonatos. Su espesor es desde pocos centímetros hasta casi 2 m. Su dirección y buzamiento promedio es de N34°E/36°NW.

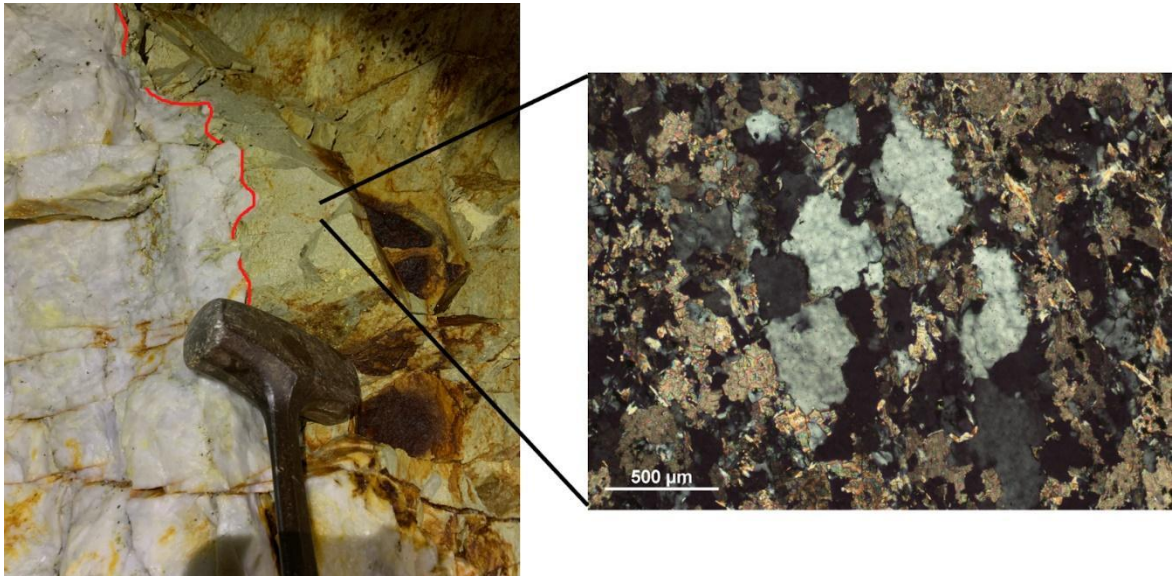
- Textura bandeada: consta de intercalaciones de cuarzo y grandes concentraciones de sulfuros. Su mineralogía está dada por pirita, calcopirita, galena, esfalerita, oro y carbonatos. Es la veta más grande del yacimiento y alcanza espesores hasta de 4 m. Su dirección y buzamiento promedio es de N59E / 51°NW.
- Vetillas: definen un evento posterior, suelen tener pocos centímetros de espesor y una cantidad menor de sulfuros albergados en el cuarzo (pirita, calcopirita, galena, carbonatos, y minerales de alteración como melnikovita, pirrotina, anatasa y telururos de Pb – Ag - Au).



**Figura 4.** Diferentes tipos de vetas y dique intruyendo esquistos grafitosos del Complejo Cajamarca.

En algunas ocasiones se ve solo un tipo de veta, pero es común encontrar las tres juntas dentro de la mina, generando zonas de mena importantes para el oro.

Intruyendo el Complejo Cajamarca se encuentran diques afaníticos de composición intermedia y completamente alterados. Petrográficamente se identificaron cuarzo, carbonatos, sericita y clorita de tamaño muy fino en cristales anhedrales: sin embargo, a excepción del cuarzo —con cuyo contenido se puede determinar la acidez de la roca—, no se encontraron minerales primarios que permitieran la clasificación de la roca.

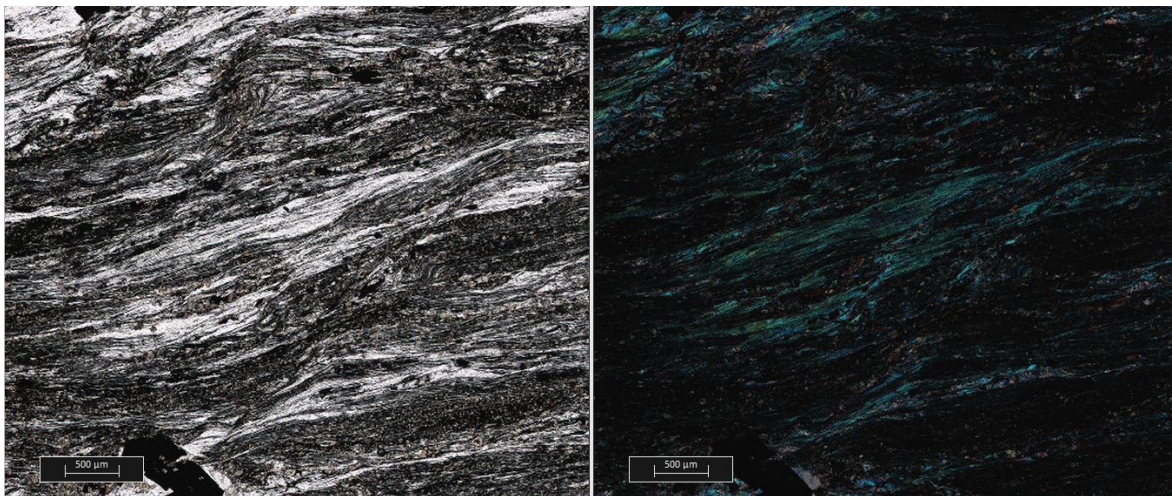


*Figura 5.* Contacto veta/dique, y acercamiento al dique en 5X, NP.

### 2.2.1 Petrografía

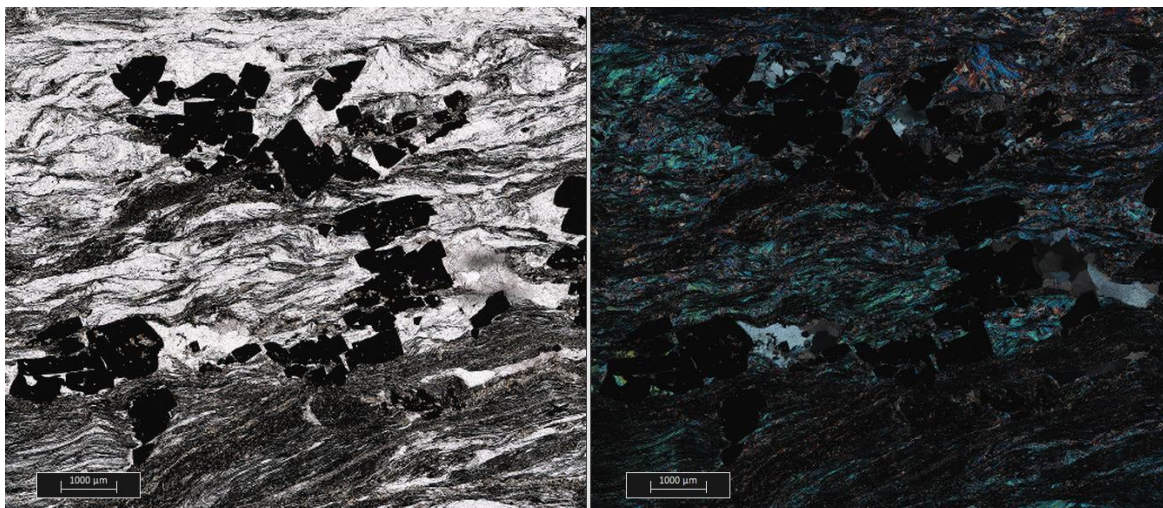
Se analizaron 12 secciones delgadas pulidas correspondientes a la mineralización y 3 secciones delgadas para describir la roca caja y el dique.

**Roca Caja:** se clasifica como un esquisto grafitoso, producto de metamorfismo regional en facies esquisto verde. La roca presenta textura lepidoblástica conformada por grafito y moscovita, y a mayor escala, se presentan bandeamientos de estos mismos minerales con algo de cuarzo. En menor cantidad se encuentra clinozoisita, clorita y apatito.

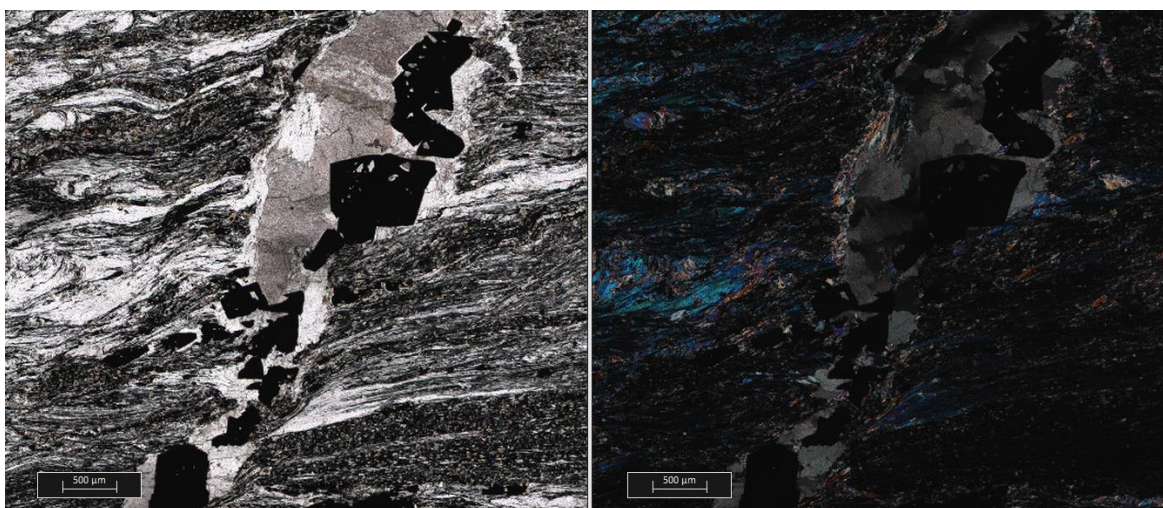


*Figura 6.* Textura lepidoblástica de grafito y moscovita en la roca caja. 5X, NP.

Se encuentran cantidades menores de sulfuros como pirita, galena, esfalerita y calcopirita diseminados, siguiendo la foliación de la roca (fig. 7). Sin embargo, estos minerales también se encuentran albergados en vetillas de carbonato que se presentan de manera discordante con la foliación del esquistos (fig. 8).

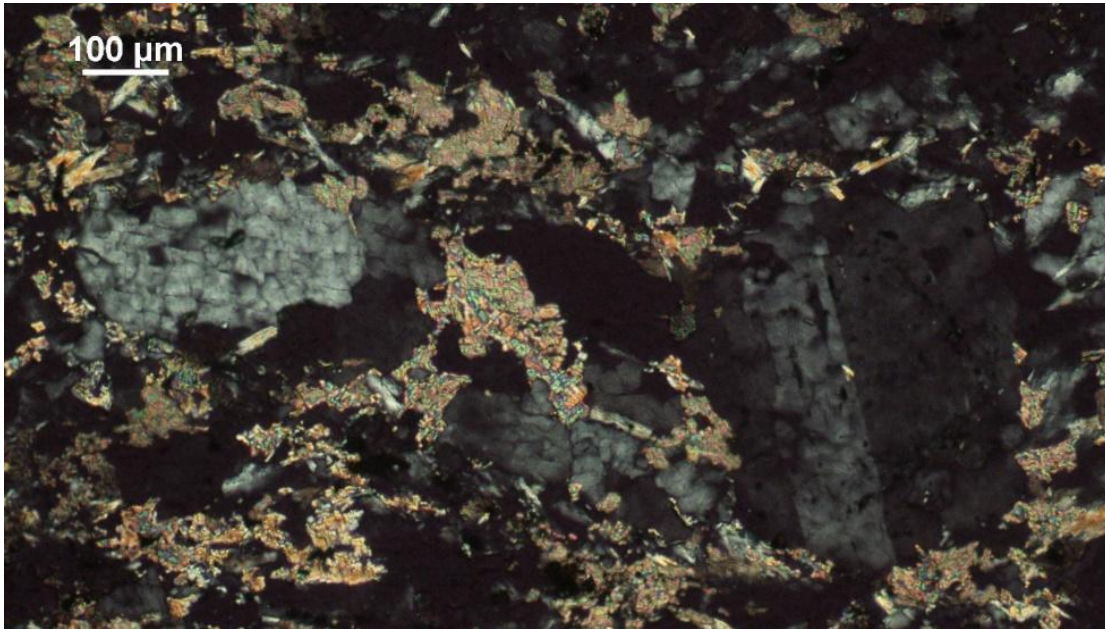


**Figura 7.** Presencia de sulfuros en la roca caja. 5X, NP.



**Figura 8.** Vetillas de carbonato con sulfuros atravesando la roca caja.

**Dique:** Roca de grano fino totalmente alterada a sericita. Gracias a su textura y la cantidad de cuarzo se puede clasificar como una roca ígnea de composición básica – intermedia. Sin embargo, la alteración de sus minerales esenciales impide realizar una clasificación exacta de la roca. Algunos de los cuarzos de muestra tenían apatitos y una cantidad poco significativa de circones.

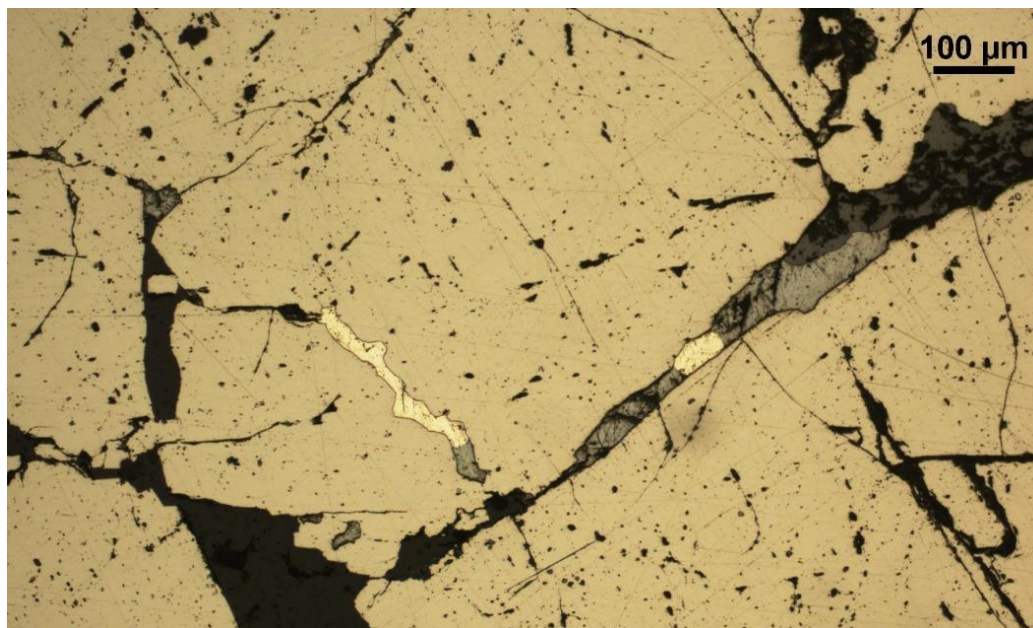


**Figura 9.** Sección petrográfica del dique.

### 2.2.2 Metalografía

En el yacimiento del Gran Porvenir se encuentran los siguientes minerales de mena (en orden de abundancia): Pirita, galena, esfalerita, calcopirita, scheelita, pirrotina, marcasita y oro.

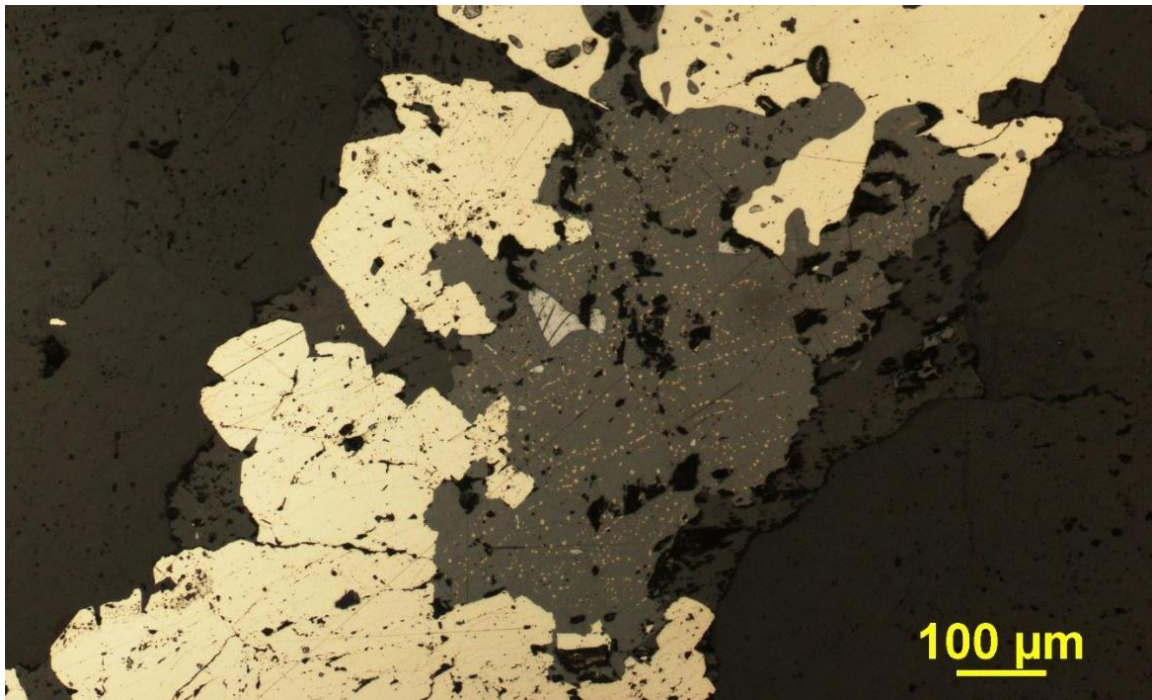
La **pirita** tiene una forma subhedral y, en ocasiones, se encuentran granos euhedrales de tamaño grueso, aparece como cristales muy finos y otros muy gruesos. En los niveles más profundos de la mina son muy comunes los clusters de pirita formando muestras de mano de varios centímetros. Dentro del yacimiento, la pirita puede presentar fracturas importantes para la búsqueda de oro, debido a que se rellenan de cuarzo, galena, esfalerita y oro. Sus asociaciones mineralógicas más frecuentes se dan con la galena, esfalerita, cuarzo y pirrotina.



**Figura 10.** Oro albergado en fracturas de pirita, asociado a galena y esfalerita.

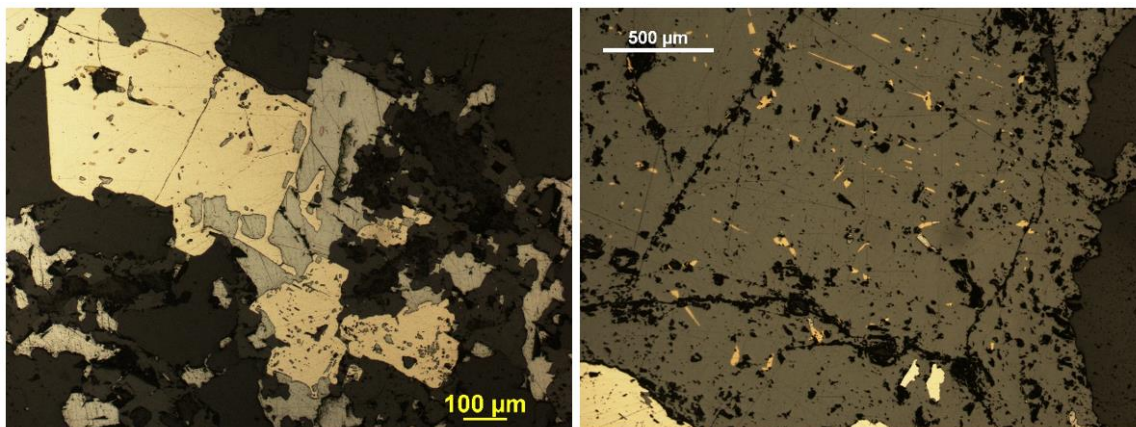
Los granos de **galena** tienen una forma anhedral a subhedral y tamaño variable entre fino y grueso. Una de las texturas más importantes que presenta es la dislocación de sus pits triangulares, que permite evidenciar que la roca ha pasado por deformación de tipo dúctil. Es común encontrar asociaciones de galena, esfalerita y oro, y entre otros minerales asociados se encuentra el cuarzo, la pirita, carbonatos y calcopirita.

La **esfalerita** se presenta de forma anhedral y tamaño desde muy fino hasta muy grueso. Al igual que la pirita hallada en las zonas más profundas de la mina, pueden encontrarse granos de tamaño de muestra de mano y forma euhedral. Se diferencian dos tipos de esfalerita según su coloración que puede ser más rojiza, acorde a la cantidad de hierro que tenga el mineral. En algunas ocasiones la esfalerita se encuentra fracturada. Sus grietas se rellenan de cuarzo, pirita, galena y oro, esto explica por qué es un mineral relevante para la exploración. Su asociación más común ocurre con la calcopirita por medio de la textura *Chalcopyrite disease*, mostrando la cristalización simultánea de estos dos minerales.



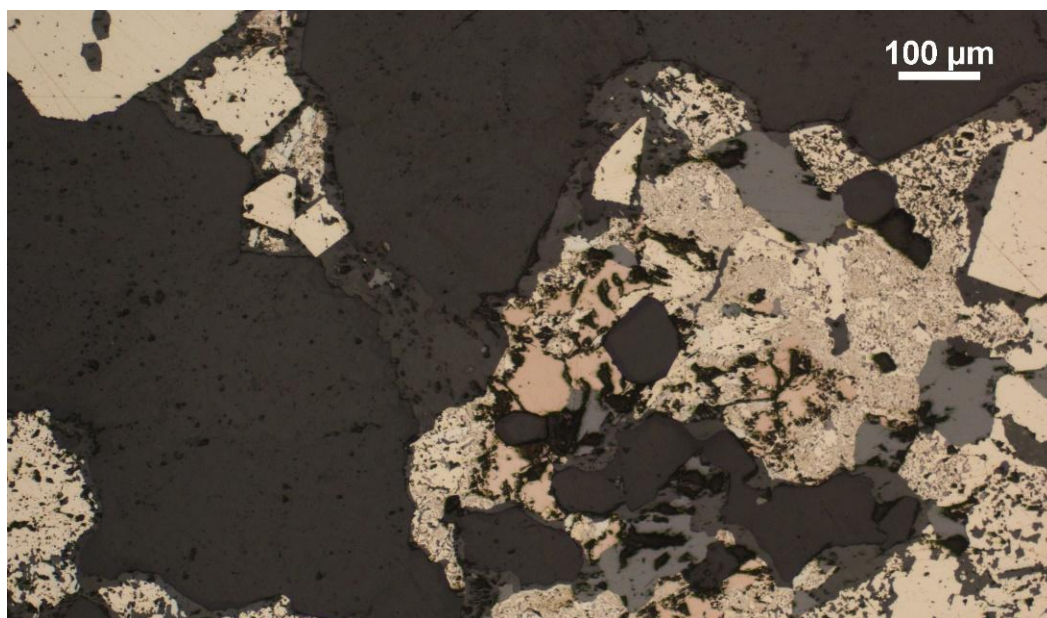
*Figura 11.* Pirita, galena, esfalerita rodeados de cuarzo. 10x, NP.

Se encontraron diferentes **texturas de mena** a partir de las cuales se pudo determinar la temporalidad de emplazamiento de cada mineral, así como las condiciones físicas o químicas del fluido mineralizante. Las texturas principales encontradas son de reemplazamiento y exsolución.



**Figura 12.** Texturas de mena. Izquierda: Exsolución de galena y pirita. Derecha: Chalcopyrite disease de calcopirita en esfalerita.

Se halla reemplazamiento pseudomórfico de marcasita en pirita y pirrotina en pirita, donde los primeros minerales mencionados empiezan a tomar la forma de la pirita mientras la reemplazan. Una de las texturas más comunes es la *Chalcopyrite disease* de calcopirita en esfalerita —o calcopirita en pirita— y galena en pirita que, a luz de la exsolución, indica que la cristalización de los minerales ocurrió simultáneamente.



**Figura 13.** Pseudomorfismo de pirrotina en pirita.

### Secuencia paragenética

Según las texturas encontradas, la relación espacial de las vetas y las asociaciones mineralógicas encontradas durante la metalografía, se establecieron diferentes eventos mineralizantes y el orden de la cristalización de los minerales en cada uno.

El primer evento mineralizante, definido por la veta de cuarzo lechoso, tiene la mayor variedad de minerales. Se encuentra cristalización temprana de cuarzo y scheelita. El oro está asociado a esfalerita, pirita, galena y cuarzo, albergándose principalmente en las fracturas de la pirita. Al final de este evento aparecen la pirrotina y marcasita como producto del reemplazamiento de la pirita.

El segundo evento está representado por la veta con bandas intercaladas de cuarzo y sulfuros. Estos últimos conformados por pirita, galena, esfalerita, calcopirita y oro. La variedad de minerales en este evento es menor que en el primero, pero su concentración es mucho más importante.

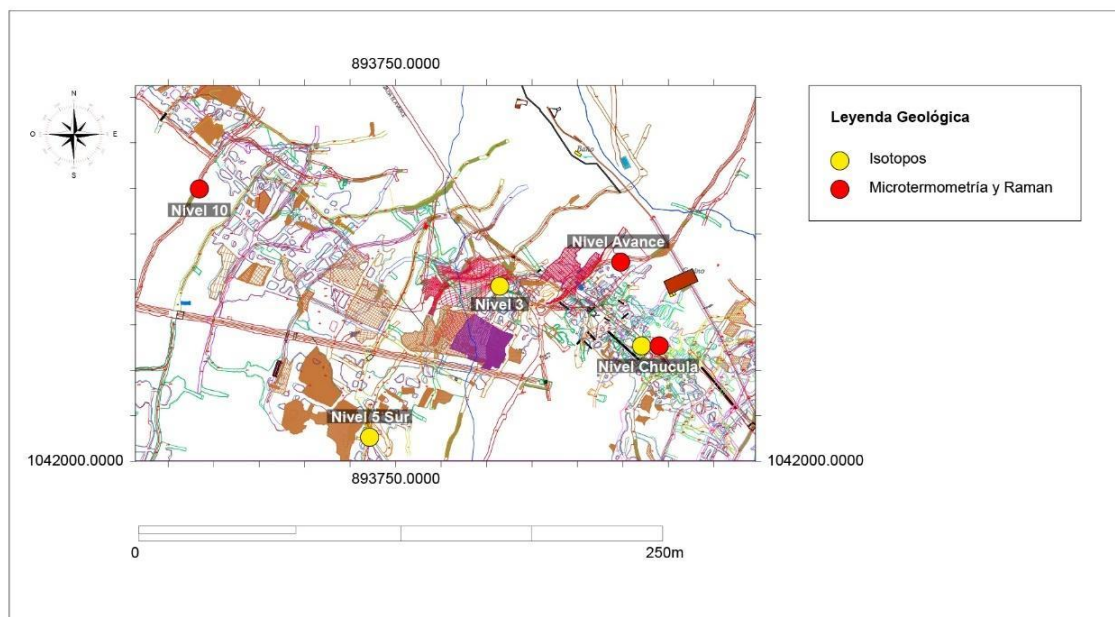
Se presenta un último evento mineralizante, representado por vetillas de menor espesor con poca importancia económica. En este no se identifican granos de oro y se encuentra pirita, galena, calcopirita, y pirrotina en bajas concentraciones.

	Evento 1	Evento 2	Evento 3
Cuarzo	————— ······	————— ······	—————
Pirita	—————	—————	—————
Galena	—————	—————	———
Esfalerita	- - - ———	—————	
Calcopirita	—————	———	————— ······
Oro	- - - - - ·	—————	
Marcasita	—————		
Pirrotina	—————		·······
Scheelita	—————		
Carbonatos	—————	———	—————

**Figura 14.** Secuencia paragenética de la Mina El Gran Porvenir.

### 3. Metodología

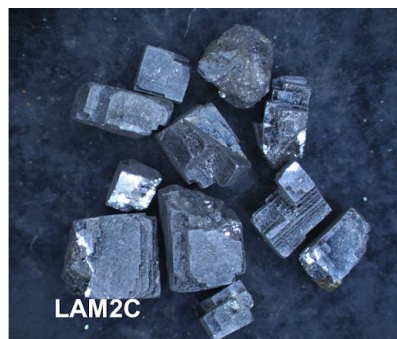
Con el objetivo de definir el origen de la mineralización en El Gran Porvenir se realizaron muestreos representativos en los diferentes tipos de veta en 6 niveles de la mina. Se tomaron diez muestras de pirita, galena y esfalerita para isotopía de azufre y plomo, y dos muestras de roca total en el esquisto negro para isotopía de plomo. Dieciséis muestras adicionales fueron destinadas a análisis petrográficos y metalográficos. Además, algunas muestras de tres niveles de mina fueron sometidas a análisis de micro-raman y microtermometría. Inicialmente se intentó recolectar sericita de las vetas para datar los eventos mineralizantes principales, pero no se encontró material suficiente para realizar análisis de Ar/Ar.



**Figura 15.** Mapa interno de la Mina El Gran Porvenir y distribución de los análisis realizados.

Durante la etapa inicial de la investigación, se caracterizó el fluido hidrotermal mineralizante por medio de microtermometría y raman en muestras colectadas durante estudios previos. Se seleccionaron inclusiones fluidas teniendo como criterio que estuvieran asociadas al oro dentro de los eventos mineralizantes principales. Para determinar la composición de la fase gaseosa de las inclusiones fluidas se usó el equipo Renishaw Centrus 0281Q1 de la Universidad Nacional de Colombia, con un objetivo de 50X y un láser de 532 nm. Posteriormente por medio de microtermometría se establecieron las características principales del fluido mineralizante (temperatura, composición, salinidad). Esta fue realizada como parte de un trabajo previo en el laboratorio de Metalografía y Microtermometría de la Universidad de Caldas, con un microscopio Zeiss Scope equipado con una platina LINKAM TH600, Renishaw Centrus 0281Q1 con un objetivo de 50X y un láser de 532 nm. Con la determinación de sistemas salinos y diferentes cambios de la temperatura, se calcularon densidades con el software BULK de Baker (2003).

La etapa inicial de los análisis de isótopos se realizó con la trituración y separación de cada uno de estos minerales por medio de picking en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.





*Figura 16.* Muestras analizadas de cada mineral para isotopía de S y Pb.

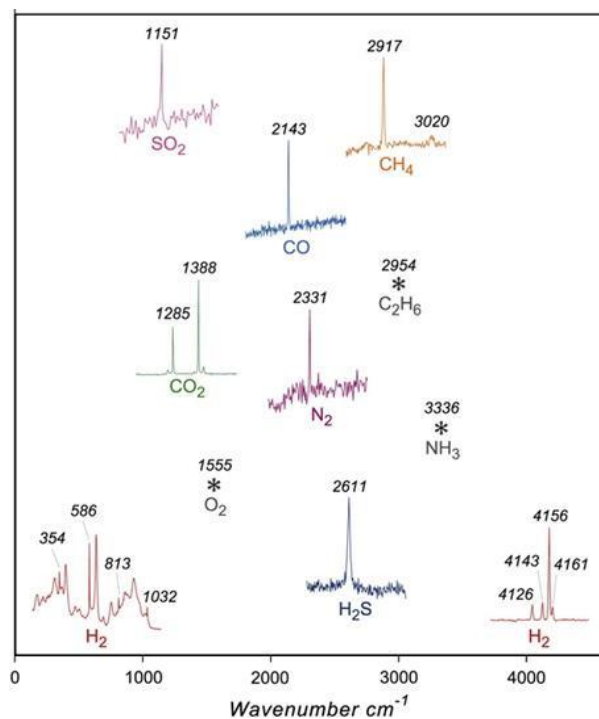
Para establecer la fuente de los fluidos mineralizantes se usaron isótopos de azufre ( $^{34}\text{S}$ ) en muestras de galena, pirita y esfalerita de los dos tipos de veta en zonas asociadas a la presencia de oro. Este método fue realizado en los laboratorios de ALS Geochemistry en Colombia y así se logró obtener una firma isotópica del depósito de El Gran Porvenir. Esta información se mostrará más adelante con el ploteo de estos puntos dentro de un gráfico de ambientes y su cantidad determinada de azufre 34.

Adicionalmente, para evaluar los aportes que diferentes ambientes pudieran tener frente a la roca caja y la mineralización, así como las edades relativas de dichos eventos y su firma isotópica, se realizaron isótopos de Pb para roca total, galena y esfalerita en el *Centro de Pesquisas em Geocronologia e Geoquímica Isotópica* de la Universidad de Sao Paulo, Brasil. En esta etapa final se usó Isoplot para obtener los gráficos de manera más exacta y realizar un análisis más preciso.

## 4. Resultados

### 4.1 Raman

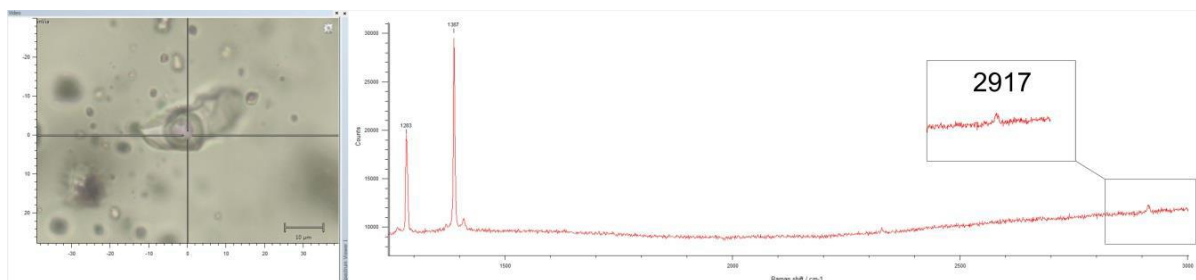
La espectroscopia Raman es un método altamente sensible, no invasivo, que se aplica para la identificación de materiales sólidos, líquidos o gaseosos en diferentes áreas. En este caso, permite definir componentes líquidos y/o gaseosos en inclusiones fluidas (e.g. H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc). Actúa teniendo en cuenta el número de onda (1/λ) en el que se ejerce una vibración principal al atacar con luz, esto se visualiza como un pico de mayor intensidad en respuesta a dicha luz emitida por el Raman (Frezzoti et al., 2012).



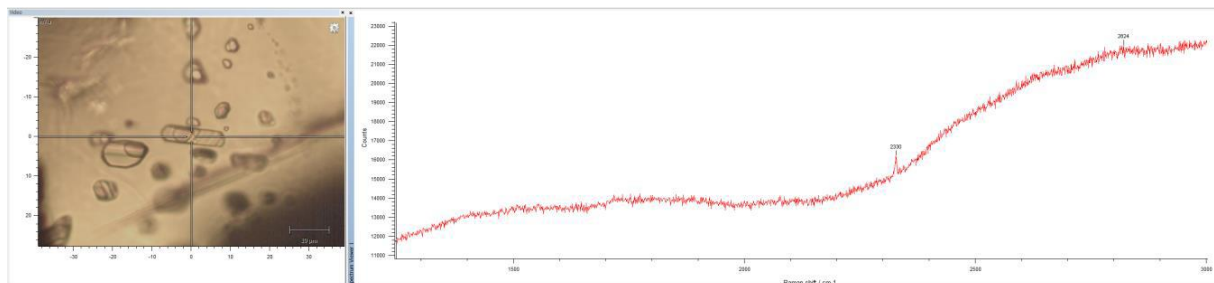
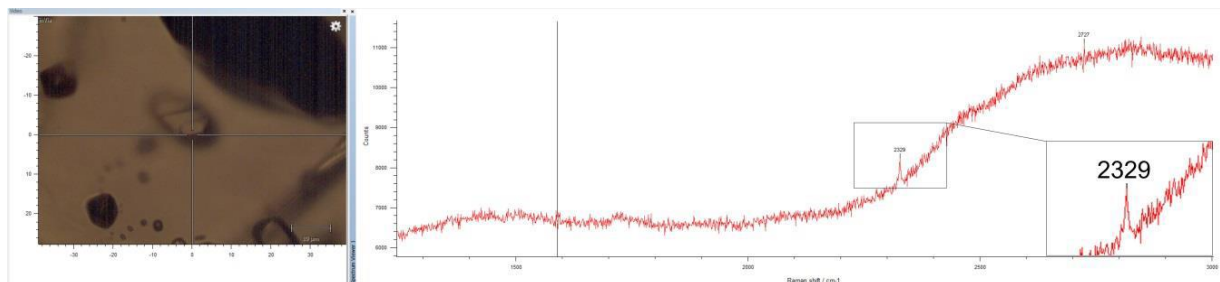
**Figura 17.** Espectro raman y números de onda relativos de los gases más comunes en inclusiones fluidas (Modificado de Frezzoti et al., 2012).

Para el caso del  $\text{CO}_2$ , el espectro de sus moléculas muestra dos bandas principales, y dos bandas más débiles alrededor de las primeras, que aparecen por un efecto de resonancia llamado “Doblete de Fermi”. Curiosamente, la distancia entre las bandas principales es proporcional a la densidad del fluido, y gracias a ello es posible realizar el cálculo de la densidad dentro de las inclusiones (Frezzotti et al., 2012).

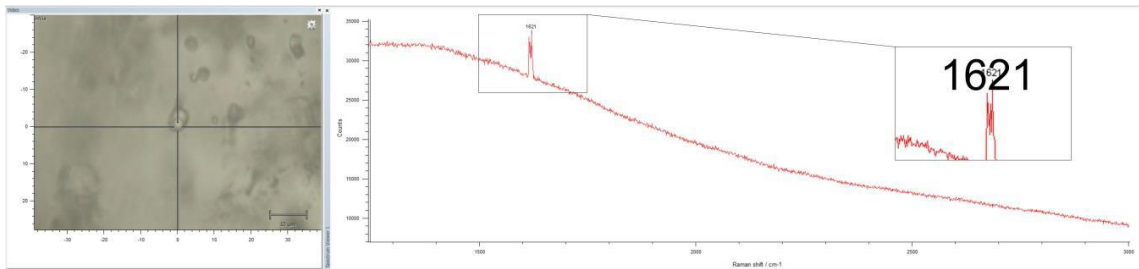
Los componentes identificados en las inclusiones fluidas de la Mina El Gran Porvenir son:  **$\text{CH}_4$** : con un pico de  $2917 \text{ cm}^{-1}$ . En la siguiente figura se puede apreciar la presencia de  $\text{CO}_2$  en mayor cantidad, y el pico que identifica el  $\text{CH}_4$  con menor intensidad hacia el lado derecho.



**$\text{N}_2$** : Identificado con un pico cercano a  $2331 \text{ cm}^{-1}$ .



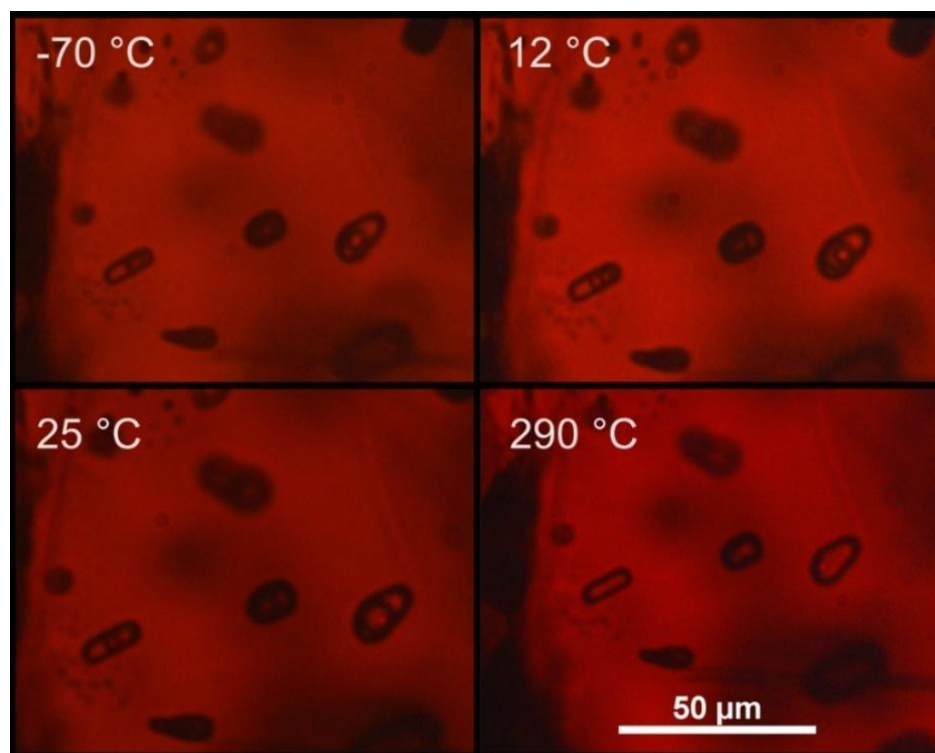
**$\text{H}_2\text{O}$  líquido**: Caracterizado por un pico alrededor de  $1630 \text{ cm}^{-1}$ .



De las inclusiones analizadas se puede concluir que los gases presentes en las inclusiones fluidas son  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{CH}_4$ , mientras la parte líquida se conforma de  $\text{H}_2\text{O}$ .

## 4.2 Microtermometría

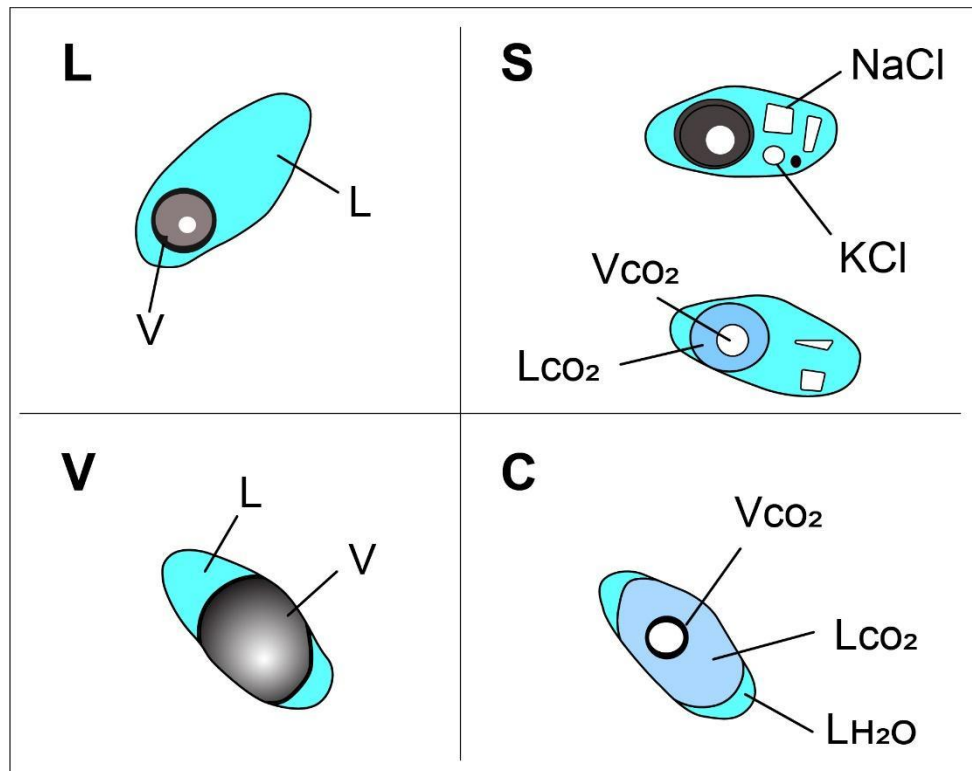
Las inclusiones fluidas son pequeñas fracciones de fluido atrapado dentro de un cristal durante su formación, bien sea a partir de este mismo fluido o por relleno de fracturas en presencia de otro. El estudio de estas provee información química y física que con otros análisis no se podría obtener. Ese es el mayor rasgo de importancia de la microtermometría, que permite obtener datos cuantitativos de temperatura, composición, densidad y composición de los fluidos que existieron en el pasado (Roedder, 2002). La visualización de inclusiones fluidas se facilita en secciones doblemente pulidas en minerales translúcidos. Para este caso se analizaron sesenta inclusiones en cuarzo (42 IF) y esfalerita (18 IF) de los dos eventos mineralizantes principales, en su mayoría de zonas asociadas al oro.



**Figura 18.** Comportamiento de las inclusiones fluidas del Gran Porvenir a diferentes temperaturas.

Este análisis se realiza a medida que se altera la temperatura de la inclusión con nitrógeno, sumado a una platina especializada que permite congelar y calentar el chip seleccionado. Deben observarse todos los cambios de fase que ocurren dentro de cada inclusión y que nos darán temperaturas claves para caracterizar el fluido mineralizante. Algunos de los cambios más importantes son: Temperatura de primera fusión, temperatura de desaparición de burbuja CO<sub>2</sub>, temperatura de homogeneización.

La **clasificación de inclusiones** se realizó según Nash (1976), con base en la relación entre fases que tiene la inclusión a temperatura ambiente:



**Figura 19.** Clasificación de inclusiones fluidas según su composición según Nash (1976)

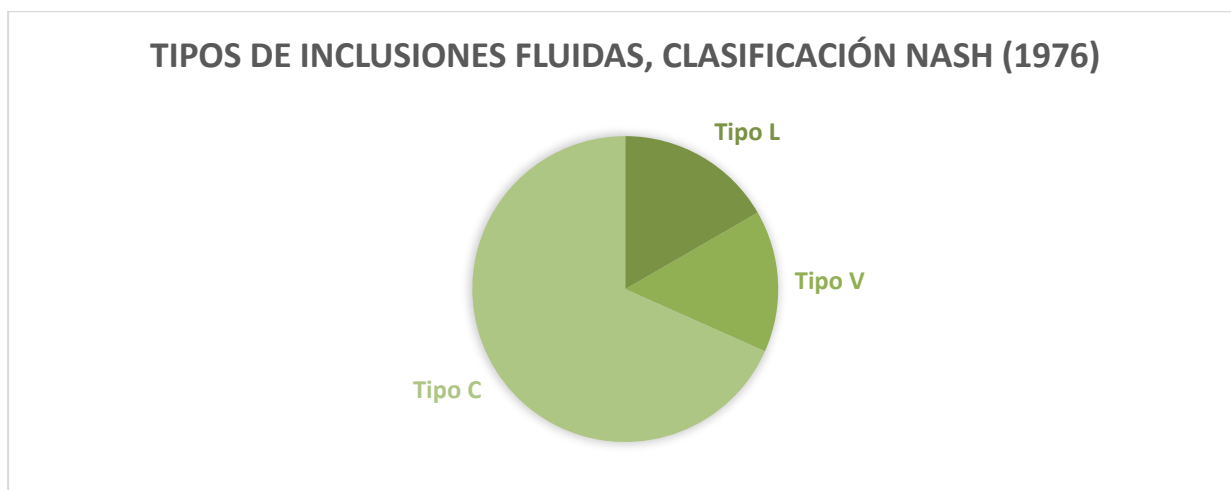
**Tipo L (Líquido):** Poseen dos fases, una líquida (agua) y otra gaseosa (vapor de agua), cada una con un volumen distinto que depende de la temperatura de atrapamiento.

**Tipo V (Vapor):** El gas ocupa un 60% de la inclusión. En algunas ocasiones permiten indicar la existencia de ebullición, especialmente cuando coexisten con las inclusiones tipo L. Pueden contener algo de CO<sub>2</sub>.

**Tipo S (Sólido):** De salinidad muy alta, presenta cristales de halita y en ocasiones de silvita, anhidrita, hematites, entre otros.

**Tipo C (Carbónicas):** Ricas en CO<sub>2</sub>, con una relación CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O variable pero casi siempre comprendida entre 3 y 30% del volumen.

De las sesenta inclusiones fluidas analizadas en la Mina El Gran Porvenir, se encontraron diez inclusiones tipo L, 9 tipo V y 41 tipo C. La mayoría de las inclusiones fluidas dentro de la Mina El Gran Porvenir son de doble anillo con alto contenido de CO<sub>2</sub>, que revela una muestra importante de cantidad de carbono que existe en el depósito.



*Figura 20.* Distribución de inclusiones fluidas en El Gran Porvenir según Nash (1976)

### Interpretación de datos microtermométricos:

**Temperatura eutéctica:** Es la temperatura mínima en la que existe líquido de manera estable. Permite establecer los sistemas predominantes en la inclusión fluida, sean salinos acuosos o volátiles, entre otros (Hurai et al., 2015). Cada sistema salino fue identificado según las temperaturas descritas en los trabajos de Ridley y Diamond (2000).

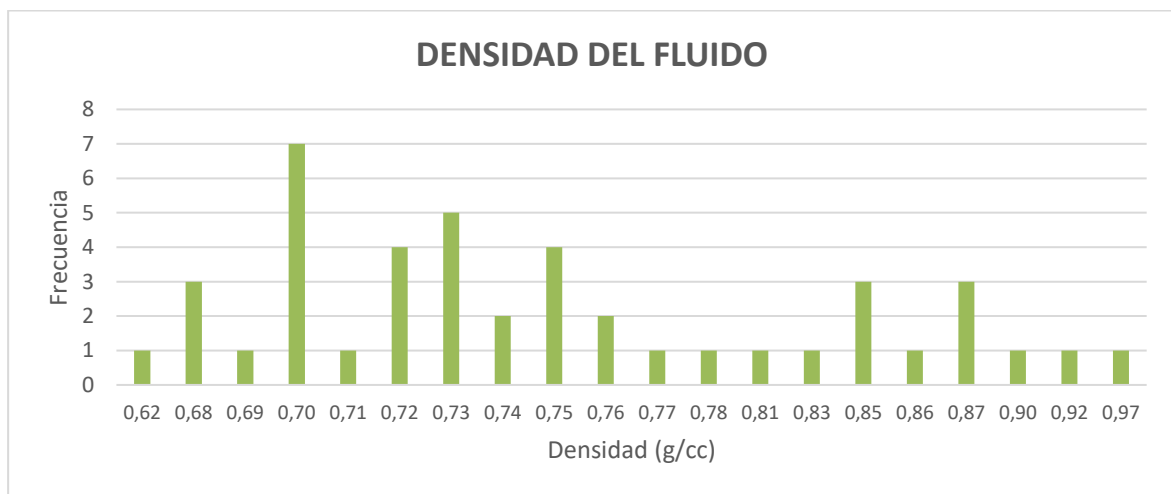
Las diferentes temperaturas eutécticas que se identificaron en las inclusiones de los dos eventos mineralizantes representan los siguientes sistemas: 1)  $H_2O - CO_2$ , 2)  $H_2O - CO_2 - NaCl$ , y 3)  $H_2O - CO_2 - KCl$ . El primero se encuentra en veinticinco inclusiones fluidas y representa la mayoría de estas, son acuo-carbónicas y posee temperaturas entre  $-56,6$  y  $-65,0$  °C; sin embargo, se encontraron temperaturas más bajas que al contrarrestar con raman, se confirmó que contienen  $N_2$  y  $CH_4$ . Los sistemas dos y tres contienen  $CO_2$  acompañado de  $NaCl$  y  $KCl$ , respectivamente; un hallazgo develado por los cambios en la burbuja líquida a temperaturas desde los  $-21,2$  hasta los  $-20,7$  °C para el  $NaCl$ , y desde  $-11$  hasta  $-9$  °C para el  $KCl$ .

**Salinidad:** La temperatura de fusión del último sólido junto con los sistemas salinos identificados permiten saber la salinidad del depósito. Este cálculo se realizó con el software BULK de Bakker (2003). En el caso de La Mina El Gran Porvenir se obtuvo

información de veintisiete inclusiones que arrojaron resultados entre 1,59 a 12,66 wt % NaCl, con un promedio de 8,60 wt % NaCl, definiendo una salinidad baja.

La cantidad de NaCl puede definir el tipo de homogeneización que ocurre en el sistema, las inclusiones acuosas de baja a moderada salinidad homogenizan a líquido o vapor, dependiendo de si la densidad total es mayor (líquido) o menor (vapor) a la que se da durante el punto crítico. Las inclusiones que poseen CO<sub>2</sub> solo son estables si este representa más de un 3.6% de la masa de la inclusión, y cuando esto sucede, es muy común que el clatrato interactúe con líquido acuoso y vapor rico en CO<sub>2</sub> (Hurai et al., 2015).

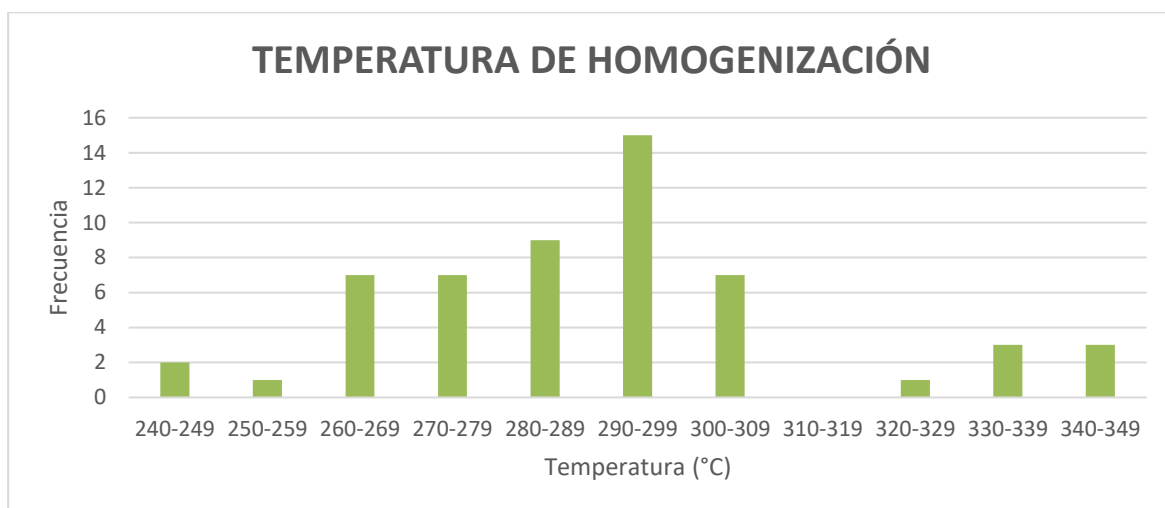
**Densidad:** La densidad es una medida de masa en una unidad de volúmen. Existen dos maneras de calcularla en inclusiones. Una, por medio del software BULK, donde se usa la temperatura de homogeneización de la fase gaseosa del CO<sub>2</sub> y los datos del sistema salino; otra por medio de Raman, donde se usa la diferencia entre dos picos de CO<sub>2</sub> en un gráfico, según el autor a referenciar. Por cuestiones de exactitud, se calculó la densidad a través del primer método y se obtuvo rangos entre 0.62 y 0.97 g/cc, con un promedio de 0.76 g/cc.



**Figura 21.** Frecuencia de densidades del fluido mineralizante en El Gran Porvenir.

**Temperatura de homogeneización:** Se da cuando se aumenta la temperatura de la inclusión hasta el punto en que todas las fases existentes se vuelven una sola. Esta se

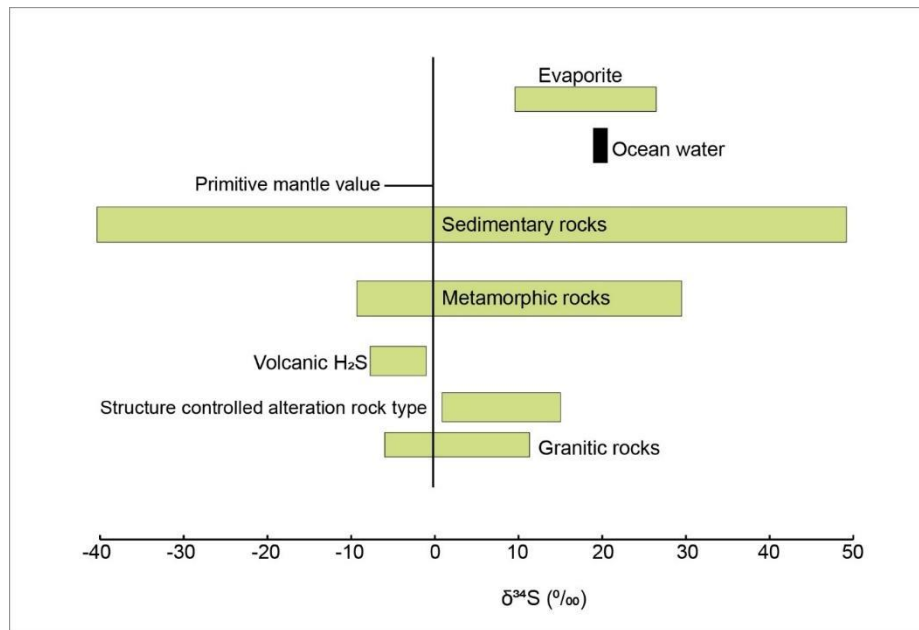
asume como la temperatura mínima de atrapamiento del fluido hidrotermal, aunque puede perder exactitud cuando las presiones de formación del depósito son altas y el dato tiende a hacerse menor a la temperatura real (Hurai et al., 2015). De las inclusiones analizadas se obtuvieron resultados concluyentes en cincuenta y uno, donde las temperaturas oscilaron desde 243.8 hasta 348.2 °C. En promedio, la temperatura de formación del depósito está alrededor de los 289.4 °C.



**Figura 22.** Frecuencia de temperaturas de homogenización del fluido mineralizante en El Gran Porvenir.

### 4.3 Isótopos de azufre ( $\delta^{34}\text{S}$ )

Uno de los componentes principales en los yacimientos de oro son los sulfuros y sulfatos, una característica que prioriza el análisis del azufre, conforme se revelan datos sobre este. El azufre tiene 4 isótopos estables —en orden de abundancia en la naturaleza:  $\delta^{32}\text{S}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{33}\text{S}$  y  $\delta^{36}\text{S}$ — y cada uno tiene un rango muy marcado en los diferentes ambientes geológicos, especialmente para el  $\delta^{34}\text{S}$ , cuyos valores importantes para la definición de reservorios se encuentra entre 50 y -40 ‰, como se puede observar en la siguiente gráfica (Hoefs, 2015).



**Figura 23.** Valores de  $\delta^{34}\text{S}$  de los ambientes geológicos más importantes (Hoefs, 2015).

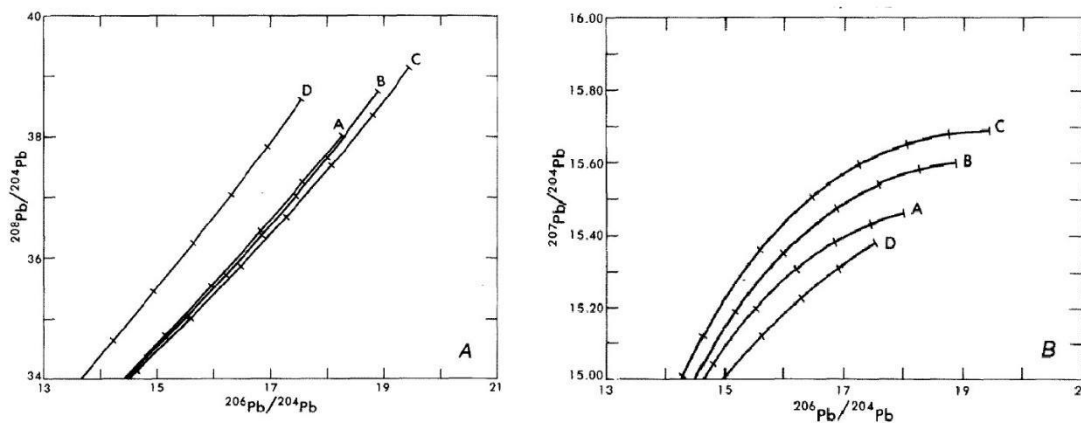
Los análisis de  $\delta^{34}\text{S}$  se realizaron en Galena, Pirita y Esfalerita, y muestran valores entre los -4,1 y -11 ‰, con un promedio de -6,4‰. El espectro de valores más amplio lo tiene la galena entre -4,1 y -11 ‰ con un promedio de -7,8 ‰. La pirita tiene valores similares que varían entre los -5,7 y -5,2 ‰ con un promedio de -5,4 ‰. Por otro lado, el mínimo de  $\delta^{34}\text{S}$  en la esfalerita es de -8,1 ‰ y su máximo es de -4,8 ‰, con un promedio de -6,4 ‰.

Muestra	Mineral	$\delta^{34}\text{S}$ ‰ vs VCDT
LAM2D	Galena	-11,5
LAM3E	Esfalerit	-8,1
	a	
LAM2G	Esfalerit	-6,4
	a	

LAM2A_	Pirita	-5,7
D		
LAM2A	Pirita	-5,5
LAM3A	Pirita	-5,2
LAM1F	Esfalerit	-4,8
a		
LAM1D	Galena	-4,1

#### 4.4 Isótopos de plomo (Pb-Pb)

La cantidad de isótopos de plomo contenida en los sulfuros de un yacimiento mineral suministra información sobre el origen de los metales y los fluidos hidrotermales que fueron la base de esa mineralización. A la vez, proporciona las edades relativas o absolutas del mismo (Tosdal et al., 1999). Existe una relación entre la composición de isótopos de plomo del manto, corteza y reservorios orogénicos, y la edad media de plomo en la corteza, razón por la cual Zartman y Doe, en 1981, generó gráficos mediante los cuales se puede definir la fuente o proveniencia de un material y su edad relativa, por medio de la cantidad de isótopos de  $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$  y  $^{207}\text{Pb}$  presentes en este.



*Figura 24.* Plumbotectonics II, tomado de Zartman y Doe, 1981.

Se realizaron análisis de Pb Pb en galena, pirita, esfalerita y roca caja (esquisto grafitoso) y muestran valores para  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  entre 18,684 y 18,759, para  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  entre 15,634 y 15,723 y para  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  entre los 38,634 y 38,939. Los resultados obtenidos para todas las muestras son muy similares entre ellos, tanto de sulfuros como de la roca caja indicando una misma fuente.

<b>MUESTRA</b>	<b>MATERIAL</b>	<b><math>^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}</math></b>	<b>2SD</b>	<b><math>^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}</math></b>	<b>2SD</b>	<b><math>^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}</math></b>	<b>2SD</b>
LAM1A	Pirita	18,732	0,014	15,688	0,021	38,820	0,028
LAM1B	Pirita	18,759	0,007	15,723	0,007	38,939	0,008
LAM1E	Esfalerita	18,689	0,002	15,635	0,002	38,644	0,002
LAM2E	Esfalerita	18,716	0,008	15,673	0,010	38,762	0,012
LAM2F	Esfalerita	18,684	0,004	15,634	0,004	38,634	0,005
LAM3B	Esfalerita	18,751	0,046	15,715	0,056	38,891	0,069
LAM4	Esquisto	18,705	0,002	15,643	0,003	38,676	0,003
LAM5	Esquisto	18,714	0,006	15,655	0,008	38,717	0,012
LAM1C	Galena	18,702	0,007	15,652	0,010	38,695	0,013
LAM3D	Galena	18,688	0,008	15,641	0,011	38,647	0,015
LAM2B	Galena	18,731	0,012	15,696	0,014	38,829	0,015

---

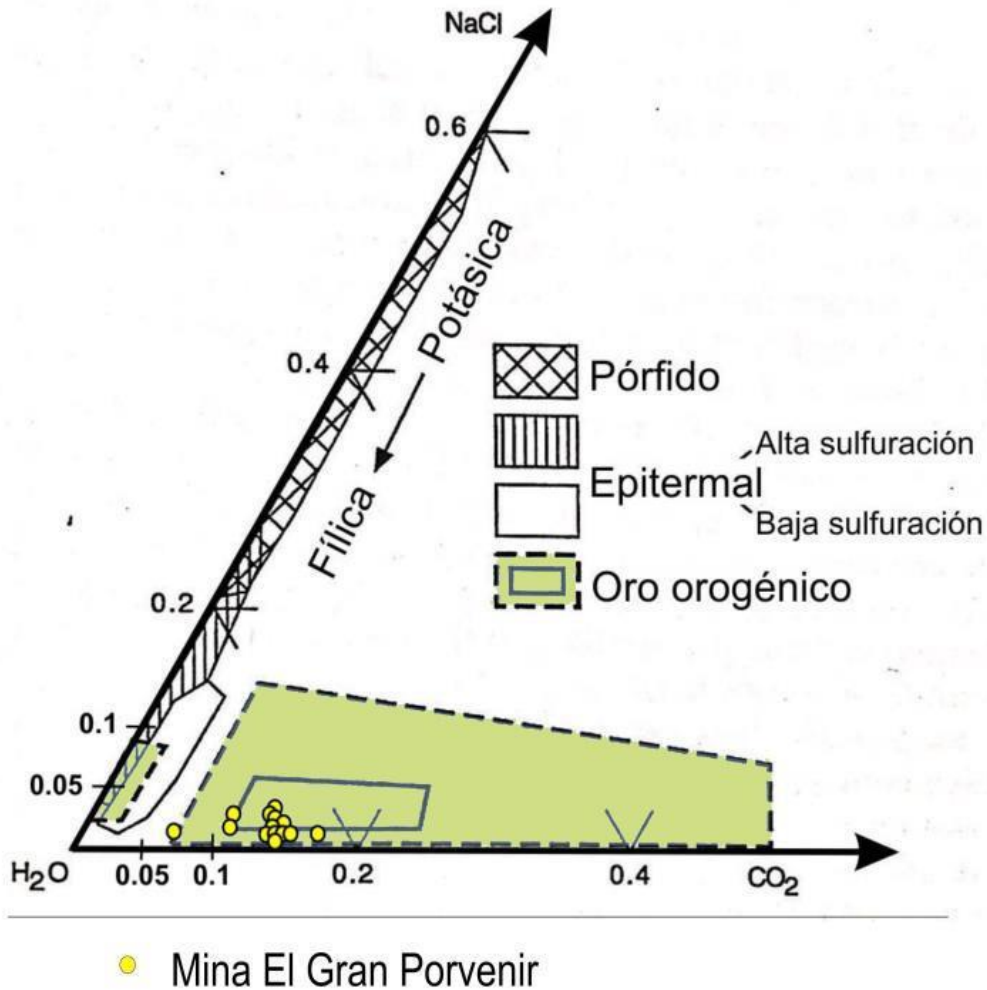
LAM2C	Galena	18,688	0,004	15,642	0,006	38,652	0,008
LAM3C	Galena	18,705	0,020	15,663	0,029	38,719	0,039

## 5. Discusión

### 5.1 Composición y características de formación del fluido mineralizante.

En resumen, los fluidos que formaron la mineralización del oro en El Gran Porvenir están compuestos por CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O, son de baja salinidad (con un promedio de 8,60 wt% NaCl) y tuvieron temperaturas de formación entre los 243.8 hasta 348.2 °C. Esta información, sumado a la mineralogía del depósito, contexto geológico regional y sus características estructurales, nos permiten acercarnos a un modelo de oro orogénico para explicar su génesis, según las características identificadas en estos tipos de depósitos por numerosos autores —citados a lo largo de la investigación— en los últimos años.

Las inclusiones fluidas en depósitos de oro orogénico suelen ser en su mayoría carbónicas de baja salinidad, siendo muy comunes las carbónicas y acuosas de salinidad baja a moderada (Ridley y Diamond, 2000). Su composición más común es de H<sub>2</sub>O – NaCl – CO<sub>2</sub> ± CH<sub>4</sub>, y entre más homogénea sea esta dentro del depósito, se puede asumir que tiene una fuente principal sin mucha evolución durante el tiempo geológico (Goldfarb y Groves, 2015). Los sistemas salinos constan de cationes de Na<sup>+</sup> (principalmente), seguido de K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> en algunos casos y la salinidad de estos depósitos es baja, oscilando entre 1 y 15 wt% NaCl (Ridley y Diamond, 2000).

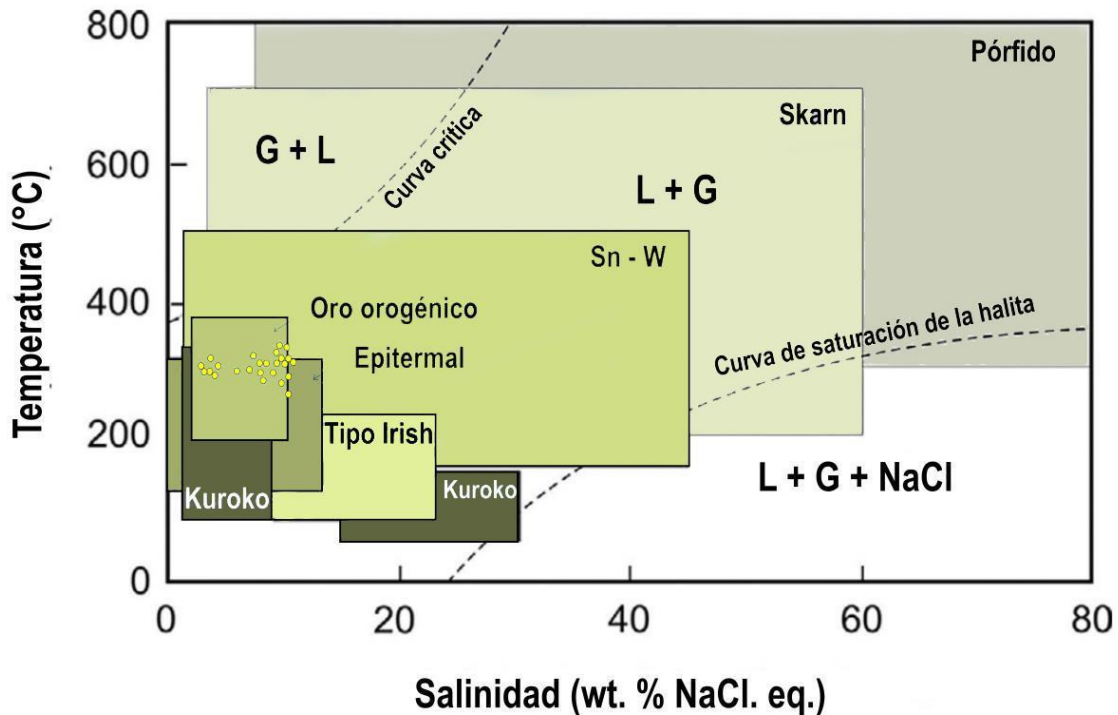


**Figura 25.** Clasificación del Gran Porvenir, según salinidad y cantidades molares de CO<sub>2</sub>. Modificado de Ridley y Diamond (2000).

Como puede observarse en la fig. 24, La composición de los fluidos en diferentes tipos de depósitos de oro se puede expresar en un gráfico de NaCl vs CO<sub>2</sub>, en el que las cantidades molares de CO<sub>2</sub> y la salinidad del depósito El Gran Porvenir se muestran dentro del campo Oro Orogénico en su mayoría, con solo una anomalía proveniente de la cantidad de CO<sub>2</sub> de una de las inclusiones medidas.

Según la profundidad a la que se haya originado el depósito, este puede estar clasificado como epizonal, mesozonal e hipozonal, por ende, puede tener temperaturas de formación diferentes que responden a cada depósito. Estos son respectivamente: de 150°C a 300°C, de 300 a 475°C y entre 475 °C a 700°C. La Mina El Gran Porvenir posee rangos amplios de temperatura que la ubican entre un depósito orogénico mesozonal a hipozonal, con

formaciones desde 6km hasta un poco más de 12km de profundidad. A su vez, la relación entre la temperatura de formación y salinidad puede determinar el origen de los fluidos hidrotermales, y por consiguiente, el tipo de depósito (Hurai et al., 2015), que para El Gran Porvenir resultaría en los siguientes campos:



● Mina El Gran Porvenir

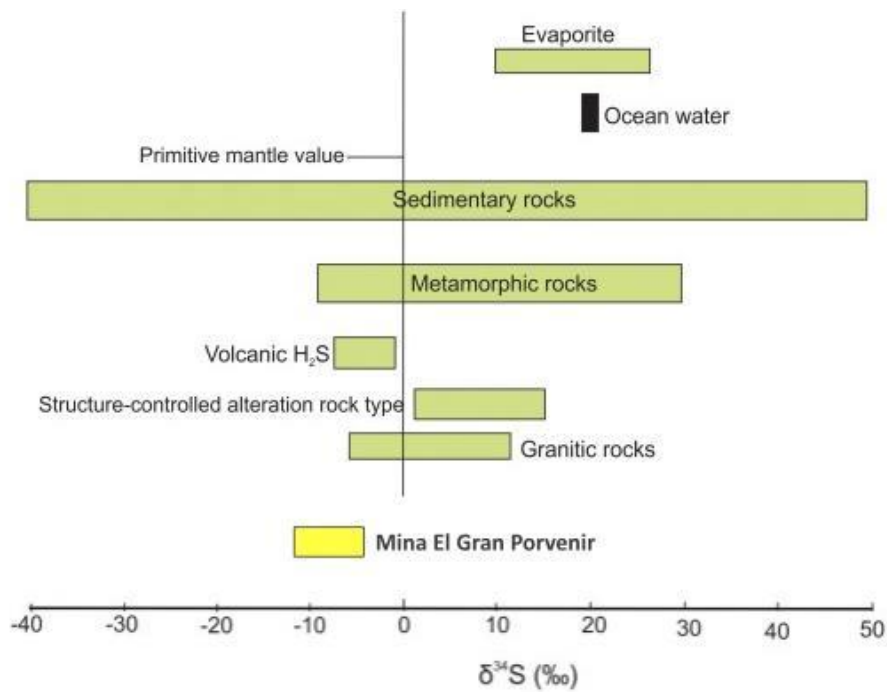
**Figura 26.** Clasificación del Gran Porvenir según temperaturas de formación y salinidad. Modificado de Hurai et al., 2015.

En la fig. 25 puede observarse cómo los datos de salinidad y temperatura de homogeneización caen dentro del campo de oro orogénico. Sin embargo, este gráfico debe complementarse con información adicional como la que se ha presentado hasta el momento, debido a los traslapes que existen entre depósitos como el Epitermal, Sn-W, Orogénico y Skarn.

## 5.2 Fuente del azufre

Las firmas isotópicas de azufre pueden variar radicalmente para depósitos de oro orogénico. Se han llegado a reportar valores de  $\delta^{34}\text{S}$  -20‰ hasta +25‰ en sulfuros, pero

los valores más comunes para todas las edades están entre 0 y 10‰ (Goldfarb y Groves, 2015). Para El Gran Porvenir, los valores de azufre son negativos y coinciden con valores de reservorios sedimentarios, metamórficos, volcánicos y graníticos. Sin embargo, hay una coincidencia mayor con los valores metamórficos y sedimentarios, lo cuál es coherente con la geología del depósito y el contexto geológico del mismo, porque no hay una relación directa con cuerpos magmáticos localmente, y por el contrario, el Complejo Cajamarca (roca caja) como roca metamórfica de protolito pelítico, encaja dentro de la descripción de los resultados obtenidos. Podría inferirse entonces que la fuente del azufre en el depósito es de carácter metamórfico y asociada a los esquistos hospedantes.



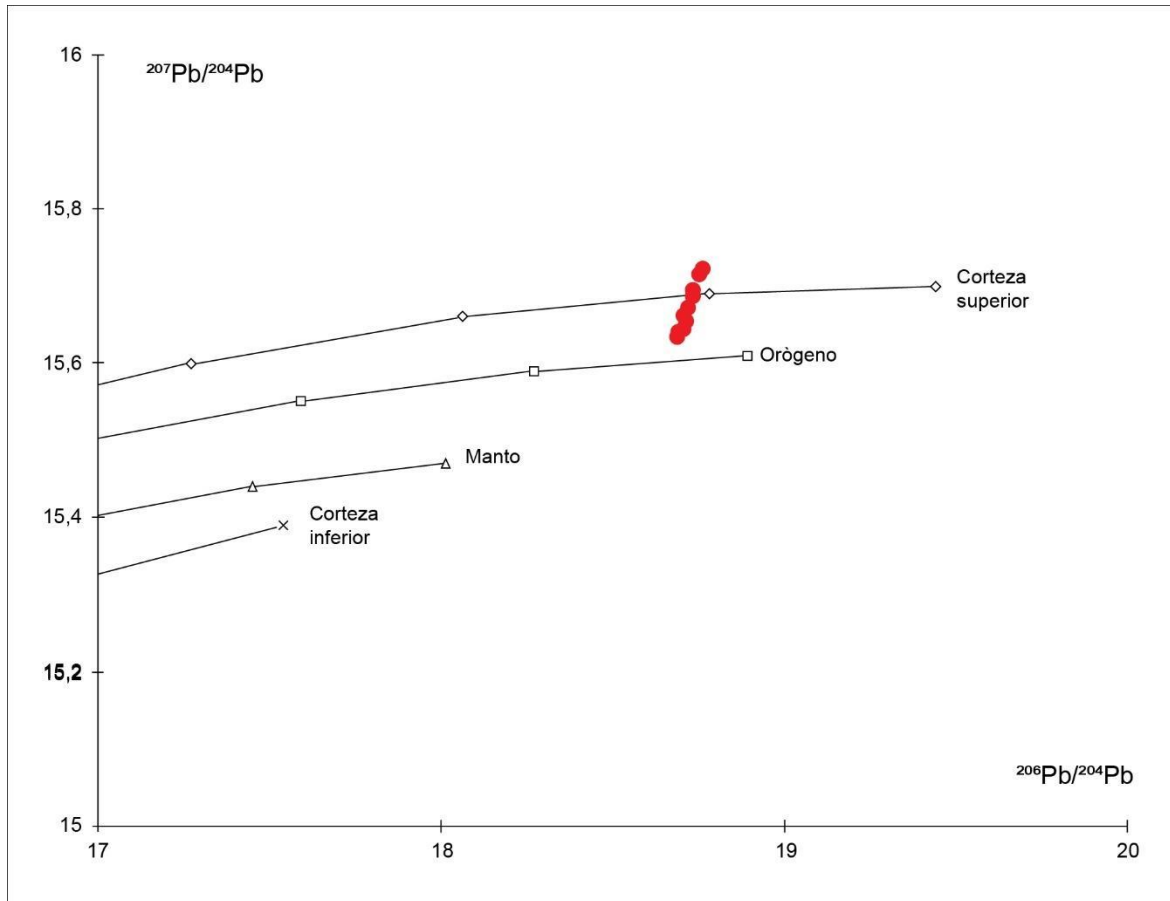
**Figura 27.** Clasificación del Gran Porvenir según la fuente de S. Modificado de Hoefs (2015).

### 5.3 Fuente del plomo

A pesar de la baja cantidad de Pb que suelen tener los sulfuros, es ideal la presencia de galena (PbS) para realizar este análisis en depósitos relacionados a orogenia (Ding et al., 2014), en este caso se pudo comparar los valores de Pb para la roca caja y minerales como galena, pirita y esfalerita.

La composición isotópica de un depósito puede ser homogénea o heterogénea, donde en la primera se da en depósitos lo suficientemente grandes como para obtener un rango de información amplia, o en rocas con las que no hubo mayor interacción con fluidos durante

su evolución (como es el caso de las fuentes magmáticas). Por otro lado, las composiciones heterogéneas de Pb suelen darse en depósitos hospedados por rocas sedimentarias o metamórficas, que han tenido interacción con rocas de diferentes características químicas e isotópicas, y que se han mezclado hasta llegar a depositarse como mena. Para el caso de las orogenias es muy común tener una composición heterogénea, ya que durante este proceso tiene lugar la deformación de la corteza, magmatismo, sedimentación y metamorfismo (Tosdal, 1999).



**Figura 28.** Clasificación del Gran Porvenir según isotopía de Pb. Modificado de Zartman y Doe, 1981.

Por medio del software libre Isoplot de la Universidad de Berkeley, se plotearon los resultados del plomo. En la fig. 27 puede observarse cómo el plomo en la Mina El Gran Porvenir tiene una fuente heterogénea, atribuyéndose claramente a la curva de orógenos con un gran aporte de corteza superior. La composición de Pb de la roca caja, galena, piritita y esfalerita se encuentran en un rango bastante restringido, y sus edades relativas (distancia del eje x) son similares, por lo que puede asumirse

que tienen un mismo origen, o que en este caso el origen de los minerales es orogénico.

## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1 Conclusiones**

1. La génesis de la Mina El Gran Porvenir está asociada a procesos orogénicos, y se formó entre temperaturas de 243 a 348°C, con un fluido mineralizante acuo-carbónico de salinidad baja a moderada y compuesto por H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NaCl, KCl, N<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.

2. El evento geológico que sugiere estar relacionado al origen del Gran Porvenir es la orogénesis de su roca caja, no sólo por la fuente concluida de la composición isotópica de azufre, sino por la similitud en la firma isotópica de plomo tanto de los sulfuros como de la roca caja, que infiere el mismo origen para ambos eventos.
3. La firma isotópica del yacimiento en términos de  $\delta^{34}\text{S}$  está entre los -4,1 y -11 ‰, con un promedio de -6,4‰; Para  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  entre 18,684 y 18,759, para  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  entre 15,634 y 15,723 y para  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  entre los 38,634 y 38,939
4. La Mina El Gran Porvenir puede ser clasificada como un yacimiento de Oro Orogénico, según las características y similitudes que este posee con mineralizaciones estándar alrededor del mundo.

## 6.2 Recomendaciones

Se sugiere estudiar a profundidad las características estructurales del yacimiento, porque es de vital importancia para este tipo de depósitos entender su formación desde este punto de vista. Asimismo, realizar petrografía y dataciones en los diques encontrados cerca de las vetas para tener clara su relación espacial y temporal con la mineralización.

Por último, es ineludible realizar dataciones en las vetas. Durante este estudio la cantidad de sericita encontrada no fue suficiente para hacer análisis de Ar/Ar y es necesario saber las edades de formación de la mineralización de manera más exacta.



## Bibliografía

- Bakker, R. J. (2003). Package FLUIDS 1. computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 23(194).
- Blanco-Quintero, I. F., García-Casco, A., Toro, L. M., Moreno, M., Ruiz, E. C., Vinasco, C. J., Cardona, A., Lazaro, C., & Morata, D. (2014). *Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia)*. February 2015, 37–41. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.963710>
- Bustamante, C., Cardona, A., Archanjo, C. J., Bayona, G., Lara, M., & Valencia, V. (2017). Geochemistry and isotopic signatures of Paleogene plutonic and detrital rocks of the Northern Andes of Colombia: A record of post-collisional arc magmatism. *Lithos*, 277, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.11.025>
- Ding, Q. F., Wu, C. Z., Santosh, M., Fu, Y., Dong, L. H., Qu, X., & Gu, L. X. (2014). H-O, S and Pb isotope geochemistry of the Awanda gold deposit in southern Tianshan, Central Asian orogenic belt: Implications for fluid regime and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 62, 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.02.017>
- Frezzotti, M. L., Tecce, F., & Casagli, A. (2012). Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009>
- Goldfarb, R. J., & Groves, D. I. (2015). Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *LITHOS*, 233, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>
- Gómez, J., Montes, N. E., Nivia, Á., Diedrix, H., & Compiladores. (2015). Mapa Geológico de Colombia. In *Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:1000.000. Servicio Geológico Colombiano*.
- Hoefs, J. (2019). Stable isotope geochemistry. In *Stable Isotope Geochemistry* (Vol. 43). [https://doi.org/10.1016/s0037-0738\(97\)00056-0](https://doi.org/10.1016/s0037-0738(97)00056-0)
- Hurai, V., Huraiová, M., Slobodník, M., & Thomas, R. (2015). Developments in microthermometry, spectroscopy, thermodynamics, and stable isotopes. *Geofluids*, xi–xii. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803241-1.09975-5>

- Julián, J., Ordóñez-carmona, O., Armstrong, R., & Pimentel, M. M. (2011). Triassic metamorphism in the northern part of the Tahamí Terrane of the central cordillera of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 32.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.04.009>
- Nash, J. T. (1976). Fluid-inclusion petrology--data from porphyry copper deposits and applications to exploration: A summary of new and published descriptions of fluid inclusions from 36 porphyry copper deposits and discussion of possible applications to exploration for copp. *US Govt. Print. Off., February*, 104056.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104056>
- Restrepo, J., Ordóñez-Carmona, O., Martens, U., & Correa, A. M. (2009). *Terrenos, complejos y provincias en la cordillera central de colombia*. 9(2), 49–56.
- Ridley, J., & Diamond, L. (2000). *Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models*. January 2000, 141–162.  
<https://doi.org/10.5382/rev.13.04>
- Roedder, E. (2002). *Fluid inclusions*.
- Toro, L. M., Gómez, A. de J., & Bedoya, R. D. (2005). Condiciones de P-T de los esquistos actinolíticos del Complejo Cajamarca al sureste de Montebello, Antioquia. *Boletín de Geología*, 27(2).
- Tosdal, R., Wooden, J., & Bouse, R. (1999). *Pb Isotopes, Ore Deposits and Metallogenic Terranes*. 1–28.
- Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., & Beltrán, A. (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3–4), 875–896.  
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.003>
- Zartman, R. E., & Doe, B. R. (1981). *Plumbotectonics - the model*. 75, 135–162.