

UNIVERSIDAD DE CALDAS
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS GEOLÓGICAS
PROGRAMA DE GEOLOGÍA

**ESTUDIO METALOGRAFICO, PETROGRAFICO Y
MICROTERMOMÉTRICO DEL PROYECTO ESTRELLA-DIAMANTINA, DISTRITO
MINERO REMEDIOS – SEGOVIA – ZARAGOZA, ANTIOQUIA - COLOMBIA**

Por

ISABELLA AGUIRRE MURILLO
ESTEBAN FRANCO HERNÁNDEZ

MANIZALES - COLOMBIA

2023



UNIVERSIDAD DE CALDAS
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS GEOLÓGICAS
PROGRAMA DE GEOLOGÍA

Trabajo de grado para optar por el título de Geólogo
**ESTUDIO METALOGRÁFICO, PETROGRÁFICO Y
MICROTERMOMÉTRICO DEL PROYECTO ESTRELLA-DIAMANTINA, DISTRITO
MINERO REMEDIOS – SEGOVIA – ZARAGOZA, ANTIOQUIA – COLOMBIA.**

Por

ISABELLA AGUIRRE MURILLO
ESTEBAN FRANCO HERNÁNDEZ

Director

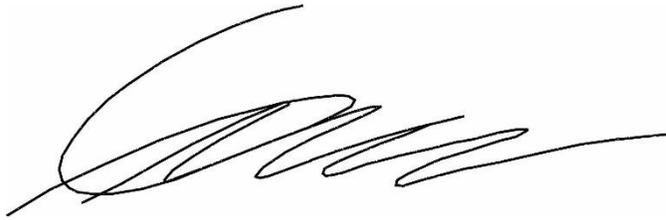
MSc. Edwin Naranjo Sierra

MANIZALES - COLOMBIA

2023



NOTA DE ACEPTACIÓN

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, sweeping initial 'E' followed by several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Firma Director
Edwin Naranjo Sierra

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la compañía Operadora Minera S.A filial de Soma Gold Corp por el financiamiento y el acceso a la información.

A nuestro director Edwin Naranjo Sierra, por su apoyo, asesoría, orientación, dedicación y paciencia en todo este proyecto investigativo. Su acompañamiento fue fundamental para culminarlo con éxito.

A el profesor Diego Loaiza por sus comentarios, recomendaciones y disposición, tiempo y colaboración en la eta de laboratorio.

A Jorge Luis Restrepo por sus recomendaciones y comentarios,

A nuestros compañeros, los cuales muchos e ellos se han convertido en amigos, cómplices y hermanos. Gracias por las horas compartidas, los trabajos realizados en conjunto y las historias vividas.

Infinitos agradecimientos a mi familia y en especial a mis padres Gloria Murillo y William Aguirre y a mi hermano Federico Aguirre Murillo, gracias por ser mi fortaleza y motivación para culminar mis estudios, gracias por su amor, enseñanzas y apoyo.

Agradezco enormemente a mí madre Josefina Franco por ser un ejemplo de perseverancia y trabajo. A mi prima Yaneth Cortés y a mi primo Juan Felipe Tamayo, por acompañarme en cada etapa del proceso y por haberme hecho sentir como si estuviera en casa.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	15
1.INTRODUCCIÓN	17
2. ANTECEDENTES.....	19
3. JUSTIFICACIÓN.....	20
4. OBJETIVOS.....	21
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	21
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
5. METODOLOGÍA.....	22
6. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	24
7. MARCO GEOLÓGICO LOCAL	27
7.1 ROCA HOSPEDANTE	29
7.2. SISTEMAS VETIFORMES	34
8. MINERALIZACIÓN.....	36
9. ALTERACIONES HIDROTERMALES.....	39
10. TEXTURAS DE CUARZO, CARBONATO Y MENA.....	41
10.1 SECUENCIA PARAGENÉTICA	46
11. ANÁLISIS DE INCLUSIONES FLUIDAS.....	48
11.1 PETROGRAFÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS.....	48
11.2 MICROTERMOMETRÍA	52
12. GEOQUÍMICA MULTIELEMENTAL.....	16
13. DISCUSIÓN	19
13.1 EVOLUCIÓN DEL FLUIDO HIDROTERMAL.....	19
13.2 TRANSPORTE Y DEPOSITACIÓN DEL ORO.....	23

13.3 MODELO GENÉTICO PARA LAS VETAS	24
13.4 IMPLICACIONES REGIONALES.....	28
14. CONCLUSIONES.....	34
15. RECOMENDACIONES	36
REFERENCIAS.....	37
ANEXOS.....	46

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** A) Mapa de localización del departamento de Antioquia, en la zona noroccidental de Colombia. B) Mapa de localización del DMRSZ y del municipio de Zaragoza, en el flanco oriental de la Cordillera Central. C) Mapa de localización del proyecto de exploración Estrella-Diamantina y de sus sectores Estrella, El Limón, Alacrán, Delirios y Diamantina. Base cartográfica tomada y modificada de Gómez-Tapias *et al.*, (2015). 18
- Figura 2.** Mapa geológico regional del municipio de Zaragoza, señalando la localización del proyecto de exploración Estrella-Diamantina y de sus sectores Estrella, El Limón, Alacrán, Delirios y Diamantina. Base cartográfica tomada y modificada de Gómez-Tapias *et al.*, (2015). Terrenos Tahamí y Chibcha *sensu* Restrepo *et al.*, (2011). 26
- Figura 3.** Mapa geológico local del área del proyecto de exploración Estrella-Diamantina y localización de las muestras analizadas. Base cartográfica tomada y modificada de Gómez-Tapias *et al.*, (2015). 28
- Figura 4.** Roca hospedante en muestra de mano (UCL-06). A) Vista frontal. B) Vista de perfil. 29
- Figura 5.** Microfotografía con luz transmitida de los principales minerales y texturas que conforman la roca hospedante (UCL-06) A) Porfidoblastos de plagioclasa, cuarzo, moscovita, biotita y clorita en matriz microcristalina compuesta por cuarzo, plagioclasa, moscovita y biotita. 10X. NP. LT. B) Porfidoblastos de plagioclasa, cuarzo, moscovita, biotita y clorita en matriz microcristalina compuesta por cuarzo, plagioclasa, moscovita y biotita. 10X. NX. LT. C) Agregados de cuarzo. 5X. NP LT. D) Agregados de cuarzo. 5X. NX. LT. E) Inclusiones redondeadas de cuarzo en plagioclasa. 5X. NP. LT. F). Inclusiones redondeadas de cuarzo en

plagioclasa. 5X. NX. LT. G) Textura embahiada entre cuarzo y plagioclasa. 20X. NP. LT. H) Textura embahiada entre cuarzo y plagioclasa. 20X. NX. LT..... 31

Figura 6. Microfotografía de los principales minerales y texturas que conforman la roca hospedante (UCL-06) A) Filosilicatos formando una figura sigmoideal propia de la textura milonítica. 10X. NP. LP. B) Filosilicatos formando una figura sigmoideal propia de la textura milonítica. 10X. NX. LP. C) Plagioclasa alternándose a sericita y biotita alterándose a clorita, minerales de alteración encontrados en la muestra. 5X. NP. LP. D) Plagioclasa alternándose a sericita y biotita alterándose a clorita, minerales de alteración encontrados en la muestra. 5X. NX. LP. E) Titanomagnetita alternándose a ilmenita. 50X. NP. LP. F) Pirita alternándose a hematita en los bordes del cristal. 50X. NX. LP..... 33

Figura 7. Características generales de las vetas A) Fotografía tomada en la mina Diamantina donde se evidencia el contacto de la roca hospedante y la veta. B) Fotografía tomada la mina El Limón, en la que se evidencia el halo de alteración hidrotermal. C) Muestra perteneciente al sector El Limón (UCL-03) en el cual se evidencia una veta de cuarzo masivo con mineralización en venillas de pirita y sericita diseminada. D) Muestra perteneciente al sector Diamantina (UCL-10) en el cual se evidencia una veta con mineralización de pirita, galena y esfalerita..... 35

Figura 8. Microfotografía de los principales minerales que conforman la mineralización. A) Pirita subhedral. 5X. NX. LR. B) Intercrecimiento de galena en pirita. 10X. NX. LR. C) Esfalerita con inclusiones de calcopirita y galena. 5X. NX. LR. D) Pirita con inclusiones de pirrotina y calcopirita. 5X. NX. LR. E) Melnikovita con textura coliforme. 10X. NX. LR. F) Inclusión de pirrotina en pirita. 20X. NX. LR. G) Cubanita en exsolución con calcopirita y esfalerita incluida en pirita. 20X. NX. LR. H) Oro asociado a pirita. 10X..... 38

Figura 9. Fotografías y microfotografías de los principales minerales y texturas que conforman la alteración hidrotermal. A-B) Vista frontal de muestra de mano alterada, en la que se resalta la presencia de sericita y el contacto con la alteración. C-D) Vista frontal de muestra de mano en la que se observan oquedades en cuarzo. E) Clorita con hábito acicular radial. 5X. NX. LP. F) Microcristales de sericita. 5X. NX. LP. 40

Figura 10. Microfotografías de las principales texturas de cuarzo que conforman la mineralización, se presentan en luz polarizada y en nicoles cruzados. A) Buck textura (Qz1). B) Aggregate Breccia textura (Qz2). C) Infill Breccia texture o bulging quartz (Qz2). D-E) Fine Comb textura (Qz3). F) Colloform Banded textura (Qz4). **Se observan colores de segundo orden debido a que son secciones doblemente pulidas.* 42

Figura 11. Microfotografías de las generaciones de calcita que conforman la mineralización, se presentan en luz polarizada y en nicoles paralelos. A) Cristal prismático y euhedral con exfoliación tipo 2. B) Venilla con planos de exfoliación tipo 1. **Se observan colores de segundo orden debido a que son secciones doblemente pulidas.*..... 43

Figura 12. Microfotografías de las principales texturas que conforman la mineralización. A) Pirita porosa. 5X. NX. LR. B) Pirita brechada 5X. NX. LR. C) Pirita esqueletal. 5X. NX. LR. D) Calcopirita rellenando fractura en pirita. 20X. NX. LR. E) Relación textural entre oro, esfalerita, galena y pirita. 20X. NX. LR. F) Textura en caries, inclusiones de galena en pirita. 20X. NX. LR. G) Textura coronítica de esfalerita y pirita. 10X. H) Inclusiones de calcopirita siguiendo planos cristalográficos en esfalerita (enfermedad de la esfalerita). 5X. NX. LR. I) Pirrotina y calcopirita incluidas en pirita. 20X. NX. LR. J) Galena incluida en pirita, intercrecimiento con Au 20X. NX. LR. K) Oro incluido en pirita en intercrecimiento con esfalerita. 10X. NX. LR. L) Oro libre 40X. NX. LR. 45

Figura 13. Secuencia paragenética. *Nota: El espesor de las líneas indica la abundancia relativa de los minerales. 47

Figura 14. Características petrográficas de las inclusiones fluidas. A) Morfologías identificadas I. Tabular II. Regular III. Irregular IV. Ovoidal, se señalan además trenes intergranulares e intragranulares. B) Fotomicrografía de inclusiones indicando relación líquido-vapor (LV) y tamaño. C-D) Inclusiones fluidas primarias (P), secundarias (S) y pseudosecundarias (Ps) identificadas en cuarzo y esfalerita, siguiendo la clasificación planteada por Roedder (1984). 49

Figura 15. Secuencia de fotomicrografías tomadas durante el proceso de enfriamiento (A, B) y calentamiento (C, D, E y F) de inclusiones partiendo de temperatura ambiente. A) Relación líquido-vapor inicial, partiendo de temperatura ambiente se inicia el proceso de enfriamiento. B) Proceso de enfriamiento, inclusión en estado de congelamiento, burbuja comprimida. C) Proceso de calentamiento, registro de la temperatura de fusión del primer hielo (Temperatura eutéctica). D) Registro de la temperatura de fusión del último hielo. E) Paso por temperatura ambiente continuando con el proceso de calentamiento F) Registro de la temperatura de homogenización, inclusión homogeniza a líquido. 53

Figura 16. Histograma de frecuencias de las propiedades microtermométricas para las familias de inclusiones fluidas. a) Temperatura eutéctica ($^{\circ}\text{Te}$). b) Temperatura de fusión del último hielo ($^{\circ}\text{Tm-Ice}$). c) Temperatura de homogeneización ($^{\circ}\text{Th}$). 15

Figura 17. Diagramas Bimodales para las principales asociaciones del proyecto Estrella-Diamantina. a) Asociación Au-Ag. b) Asociación Au-Pb. c) Asociación Au-Zn. d) Asociación Au-Cu. e) Asociación Au-As. Los coeficientes de correlación fueron calculados con el valor logarítmico de la concentración de cada elemento. 18

Figura 18. Representación esquemática de las etapas mineralizante y su relación con las familias de inclusiones fluidas. A) Ensamble mineralógico observado en la primera etapa mineralizante con sus condiciones de salinidad y temperatura de homogenización. B) Ensamble mineralógico observado en la segunda etapa mineralizante con sus condiciones de salinidad y temperatura de homogenización. C) Ensamble mineralógico observado en la tercera etapa mineralizante con sus condiciones de salinidad y temperatura de homogenización. D) Ensamble mineralógico observado en la cuarta etapa mineralizante con sus condiciones de salinidad y temperatura de homogenización..... 20

Figura 19. Relación entre la temperatura de homogeneización ($^{\circ}\text{Th}$) con la salinidad (Velasco, 2004). 22

Figura 20. Relación entre la temperatura de homogeneización (Th) con la salinidad (Wilkinson, 2001). 26

Figura 21. Mapa localización de los proyectos de Au-Ag aledaños..... 29

Figura 22. Diagramas ternarios Au-Bi-Te, Au-As-Zn y Au-As-Te dónde se observan los trenes mineralizantes diferentes del Cinturón aurífero del Cauca medio..... 32

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las propiedades de los tipos de inclusiones fluidas identificadas en las vetas analizadas.....	50
Tabla 2. Temperaturas del punto eutéctico para diferentes sistemas salinos a 1 atm (Borisenko, 1977).	54
Tabla 3. Resumen de las propiedades petrográficas y de los datos microtermométricos de los tipos de inclusiones fluidas identificadas en las vetas analizadas.	11
Tabla 4. Resumen de las propiedades petrográficas y de los datos microtermométricos de las familias de inclusiones fluidas identificadas en las vetas analizadas.	12
Tabla 5. Matriz de correlaciones.....	17
Tabla 6. Principales características de los depósitos, epitermal, orogénico y asociado a intrusiones (Intrusion Related Gold Deposits).	27
Tabla 7. Características depósitos aledaños.....	30

RESUMEN

El proyecto de exploración Estrella-Diamantina, se encuentran localizado en el flanco oriental de la Cordillera Central, en el sector Norte del Distrito Minero Remedios-Segovia-Zaragoza (DMRSZ), al Oeste del Sistema de fallas Otú-Pericos. Los depósitos vetiformes se encuentran hospedados en rocas metamórficas agrupadas regionalmente al interior del Complejo Cajamarca. Los análisis de geoquímica multielemental permitieron identificar las asociaciones Au-Ag, Au-Pb, Au-Zn, Au±Cu. Se definieron cuatro etapas mineralizantes al interior del sistema: La primera etapa mineralizante (E1) está caracterizada por la formación de cuarzo (Qz1) + pirita (Py1) + calcopirita (Ccp1) + pirrotina (Po) + cubanita (Cbn). La segunda y principal etapa mineralizante (E2) está caracterizado por cuarzo (Qz2) + calcita (Cal1) + pirita (Py1) + calcopirita (Ccp2) + pirrotina (Po) + galena (Gn1) + esfalerita (Sp) + oro (Au1). La tercera etapa mineralizante (E3) está representada por la asociación cuarzo (Qz3 y Qz4) + galena (Gn2) + oro (Au2) ± melnikovita (Mk). La cuarta etapa mineralizante (E4) está caracterizada por venillas de calcita (Cal2) + pirita (Py3), que corresponden al cierre del sistema hidrotermal. El análisis microtermométrico realizado para cada una de las etapas mineralizantes, permitió identificar para la E1 temperaturas de homogenización entre 188.6°C y 225°C y salinidades entre 3.14% y 12.05% (% wt NaCl equiv). Para la E2, las inclusiones fluidas medidas registraron temperaturas entre 159.2°C y 210°C y salinidades menores a 9.86% (% wt NaCl equiv). Para la E3, se registraron inclusiones con temperaturas que oscilan entre 157°C y 204°C y salinidades de 0.88% y 8.8% (% wt NaCl equiv). Para la E4, se registraron temperaturas desde 103.8°C hasta 140°C y salinidades entre 0.18% y 3.71% (% wt NaCl equiv). El ensamble mineralógico identificado refleja condiciones de pH neutro a ligeramente alcalino, en un ambiente reducido con un rango de temperatura entre 103°C y 225°C, soportado por los datos microtermométricos y por la alteración sericítica como alteración

hidrotermal dominante, características que permiten sugerir los iones H_2S o HS^- como las especies de sulfuro predominante en el fluido hidrotermal, y en consecuencia se plantean los iones complejos $\text{Au}(\text{HS})^{2-}$ o $\text{Au}(\text{HS})$ como el medio más factible para transportar y depositar el oro. Considerando la configuración tectónica y estructural del proyecto, su ubicación en un límite de terrenos acrecionados con deformación frágil-dúctil, las asociaciones químicas y mineralógicas, el tipo de alteración hidrotermal y las propiedades microtermométricas, se propone para el proyecto Estrella-Diamantina un modelo de depósito de oro orogénico en dominiomesozonal.

Palabras clave: Distrito Minero Remedios-Segovia-Zaragoza (DMZSR); Estrella-Diamantina; Microtermometría, Metalografía

ABSTRACT

The Estrella-Diamantina project is located on the Eastern flank of the Central Cordillera, in the Northern sector of the Remedios-Segovia-Zaragoza Mining District (DMRSZ), at the Western side of the Otú-Pericos fault system. The quartz veins are hosted in metamorphic rocks regionally grouped inside the Cajamarca Complex. The multi-elemental geochemical analyzes allowed to identify the association Au-Ag, Au-Pb, Au-Zn, Au±Cu. Four mineralizing stages were defined for the hydrothermal system. The first mineralizing stage (E1) is characterized by the formation of quartz (Qz1) + pyrite (Py1) + chalcopyrite (Ccp1) + pyrrhotite (Po) + cubanite (Cbn). The second and main mineralizing stage (E2) is featured by quartz (Qz2) + calcite (Cal2) + pyrite (Py2) + chalcopyrite (Ccp1) + pyrrhotite (Po) + galena (Gn1) + sphalerite (Sp) + gold (Au1). The third mineralizing stage (E3) is represented by the association quartz (Qz3 and Qz4) + galena (Gn2) + gold (Au2) ± melnikovite (Mk). The fourth mineralizing stage (E4) is characterized by veins of calcite (Cal2) + pyrite (Py3), that correspond to the close of the hydrothermal system. The microthermometric analysis carried out for each one of the mineralizing stages, allowed to identify for E1 homogenization temperatures between 188.6°C and 225°C and salinities between 3.14% and 12.05% (% wt. NaCl equiv). For E2, the measured fluid inclusions registered temperatures between 159.2°C and 210°C and salinities less than 9.86% (% wt. NaCl equiv). For E3, inclusions were recorded with temperatures ranging between 157°C and 204°C and salinities of 0.88% and 8.8% (% wt NaCl equiv). For E4, temperatures from 103.8°C until 140°C and salinities between 0.18% and 3.71% (% wt NaCl equiv). The identified mineralogical assemblage reflects neutral to slightly alkaline pH conditions, in reduced environment, with a temperature range between 103°C and 225°C, supported by microthermometric data and by sericitic alteration as the dominant hydrothermal alteration, characteristics that allow suggest H₂S or HS⁻ ions as the predominant

sulfide species in the hydrothermal fluid, and as a consequence the complex ions $\text{Au}(\text{HS})^{2-}$ or $\text{Au}(\text{HS})$ as the most feasible means of transporting and depositing the gold. Considering the tectonic and structural configuration of the project, its location in a limit of accreted terranes with brittle-ductile deformation, the chemical and mineralogical associations, the hydrothermal alteration type and the microthermometric properties, a model of Lode gold deposit in mesozonal domain with a late epithermal contribution.

Keywords: Remedios-Segovia-Zaragoza Mining District (DMZSR); Estrella-Diamantina; Microthermometry, Metallography.

1.INTRODUCCIÓN

El proyecto Estrella-Diamantina se encuentra localizado en el flanco Oriental de la Cordillera Central, en el Noreste del departamento de Antioquia, Colombia (Figura 1A) a 6 km del municipio de Zaragoza, en la región del Bajo Cauca antioqueño y al interior del Distrito Minero Remedios-Segovia-Zaragoza (DMRSZ) (Figura 1B). Históricamente este distrito ha sido reconocido por sus explotaciones de oro aluvial y manifestaciones vetiformes (Shaw, 2000; Sillitoe, 2008; Shaw *et al.*, 2018; Leal-Mejía, *et al.*, 2019). Este proyecto de exploración está conformado por un corredor mineralizado de ± 7.0 km de longitud, definido de Norte a Sur por los sectores Estrella, El Limón, Alacrán, Delirios y Diamantina (Figura 1C). El área comprendida entre Zaragoza-Machuca, donde se ubican las mineralizaciones vetiformes objeto de análisis de este trabajo, está dominada por gneises cuarzo-feldespáticos pertenecientes al Complejo Cajamarca. Estas rocas metamórficas Permo-triásicas conforman el núcleo de la Cordillera Central y constan de esquistos de bajo a medio grado, intercalados con cuarcitas y localmente con mármoles, gneises alumínicos de medio grado y algunos cuerpos generalmente lenticulares de anfibolitas (Maya & Gonzalez, 1995; Gonzalez, 2001; Gómez-Tapias *et al.*, 2015). Dichas rocas sirven como litología hospedante para las diferentes vetas de Au-Ag en el sector, estas manifestaciones se encuentran asociadas a la dinámica del sistema de fallas Otú-Pericos. Esta zona es el límite tectónico de los terrenos Chibcha y Tahami (Rodríguez & Pernet, 1983; Cediél *et al.*, 2003; Moreno-Sánchez *et al.*, 2020; Restrepo & Toussaint, 2020), y es considerada el rasgo estructural más importante del distrito minero, permitiendo condiciones favorables para la generación de estructuras vetiformes a lo largo de la zona (Feininger *et al.*, 1972; González *et al.*, 2010).

Este estudio presenta una caracterización metalográfica de las mineralizaciones vetiformes que conforman el proyecto, enfocándose en las etapas mineralizantes, secuencia paragenética y alteración hidrotermal. Adicionalmente, se reportan por primera vez las condiciones microtermométricas de estas vetas, con el ánimo de caracterizar la evolución composicional y termal del fluido mineralizante y discutir sus implicaciones en el transporte y precipitación del oro.

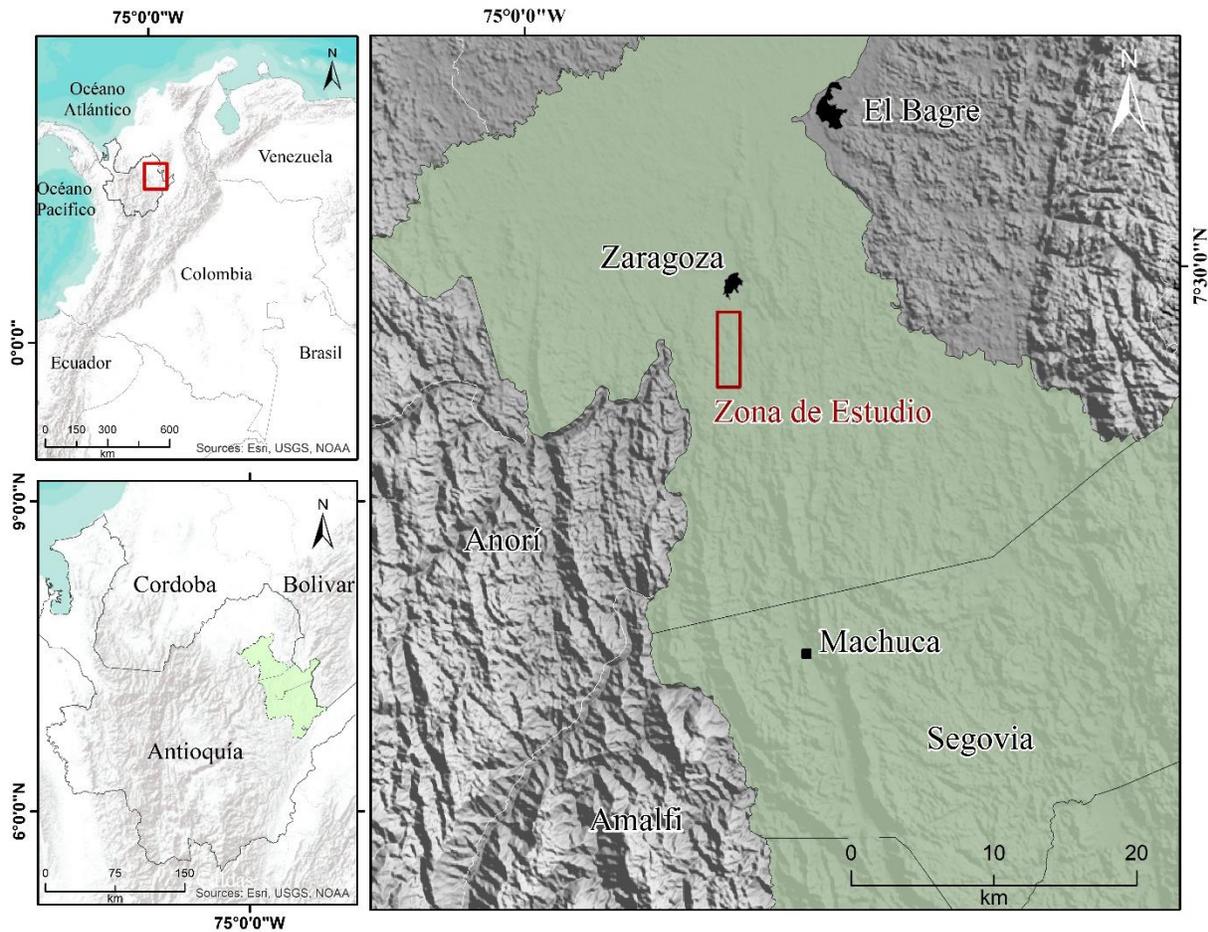


Figura 1. A) Mapa de localización del departamento de Antioquia, en la zona noroccidental de Colombia. B) Mapa de localización del DMRSZ y del municipio de Zaragoza, en el flanco oriental de la Cordillera Central. C) Mapa de localización del proyecto de exploración Estrella-Diamantina y de sus sectores Estrella, El Limón, Alacrán, Delirios y Diamantina. Base cartográfica tomada y modificada de Gómez-Tapias *et al.*, (2015).

2. ANTECEDENTES

El Distrito Minero Remedios-Segovia-Zaragoza (DMRSZ), está ubicado en el Bajo Cauca antioqueño, sobre el flanco Oriental de la Cordillera Central. Este distrito está dividido en dos zonas principales. Al Sur, el área de Segovia-Remedios y al Norte, el área de Segovia-Zaragoza (Rodríguez & Pernet, 1983). La parte Sur del distrito ha sido ampliamente estudiada por diversos autores, entre estos destacan Feininger *et al.*, (1972), Rodríguez & Pernet (1983), Restrepo & Toussaint (1988), González (2001), Ordoñez-Carmona *et al* (2005), Echeverri (2006), Álvarez *et al* (2007) Leal-Mejía (2011) y Manco *et al.*, (2012). Sin embargo, el área Segovia-Zaragoza a pesar de su amplia tradición minera carece de estudios específicos, como metalografía, petrografía y microtermometría, exceptuando las investigaciones de Ayala & Montoya (2004); López (2004); Monterroza (2005); Mendoza & Giraldo (2012); Castaño-Dávila (2017); Castaño-Dávila *et al.*, (2019) y Serna-Peña (2020).

El sistema de fallas Otú-Pericos es el rasgo estructural dominante de las mineralizaciones en esta región del país. Diversos autores como Álvarez *et al.*, (2007); Londoño *et al.*, (2009); Leal-Mejía (2011); Mendoza & Giraldo (2012) y Shaw *et al.*, (2018) reportaron el control estructural del sistema de fallas Otú-Pericos para sobre las manifestaciones vetiformes en el DMRSZ. Además, se ha interpretado por diversos autores (Rodríguez & Pernet, 1983; Cediél *et al.*, 2003; Moreno-Sánchez *et al.*, 2020; Restrepo & Toussaint, 2020) como un límite entre los terrenos tectónicos Chibcha (Ch) al Oeste y Tahami (Th) al Este. En el sector de la mina El Limón, López (2004) estableció un componente sinistral para la falla Otú. Guarín *et al.*, (1970), Hall *et al.*, (1970) y Ayala & Montoya (2004) determinaron un modelo de filón de fisura mesotermal para la mineralización aurífera de El Limón.

3. JUSTIFICACIÓN

El Distrito Minero Remedios-Segovia-Zaragoza se ha caracterizado por su producción de oro (González, 2001; Ordoñez-Carmona *et al.*, 2005; Echeverri, 2006; Álvarez *et al.*, 2007 y Manco *et al.*, 2012). Esta investigación se centra en el sector Zaragoza-Machuca al Norte del área Segovia-Zaragoza, en el proyecto de exploración Estrella-Diamantina. Este proyecto ha estado en operación intermitente desde 1938. Sin embargo, tiene una historia mucho más grande, datando operaciones artesanales desde la época colonial (Álvarez *et al.*, 2007). A pesar de su rica historia de explotación, este conjunto de manifestaciones vetiformes no han sido estudiadas en detalle y cuentan con pocos estudios metalográficos y carecen de estudios microtermométricos.

Por este motivo, este estudio se enfoca en analizar la composición, asociaciones mineralógicas, texturales y condiciones microtermométricas de los sistemas vetiformes que conforman el proyecto, con el objetivo de aportar conocimientos científicos sobre este depósito y conocer mejor las condiciones de formación de esta mineralización para relacionarlas en un contexto regional.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

- Realizar un análisis metalográfico y microtermométrico para el proyecto Estrella-Diamantina en el Distrito Minero Remedios-Segovia-Zaragoza, Antioquia-Colombia.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis metalográfico para los sectores del proyecto Estrella-Diamantina, definidos de Norte a Sur por Estrella, El Limón, Alacrán, Delirios y Diamantina.
- Determinar las asociaciones mineralógicas y establecer una secuencia paragenética.
- Identificar el tipo de alteración hidrotermal de la mineralización.
- Determinar la salinidad, temperatura ($^{\circ}\text{Te}$, $^{\circ}\text{Tm-Ice}$ y $^{\circ}\text{Th}$), sistema salino y densidad del fluido mineralizante.
- Proponer el mecanismo de transporte y depositación del oro.
- Proponer un modelo geológico para el depósito.
- Relacionar las características del depósito con proyectos aledaños.

5. METODOLOGÍA

Para la etapa inicial del proyecto, se llevó a cabo la recolección de datos, estudios de caso y registros bibliográficos de la zona de estudio. Fue fundamental el acceso a la base de datos de exploración de la compañía Operadora Minera S.A filial de Soma Gold Corp.

Se recolectaron once muestras de diferentes sectores que conforman el proyecto, diez de ellas corresponden a vetas y una a roca encajante, las muestras fueron enviadas a MinerLab Ltda, en la ciudad de Bogotá, para la elaboración de once secciones delgadas doblemente pulidas (de 80-100 μ m de espesor). Las muestras fueron cortadas utilizando una cortadora de disco diamantado y sometidas posteriormente a un proceso de pulido con carburo de silicio, comenzando con un tamaño de grano pasante de malla 120, luego 240,400,600 y finalmente malla 1000, al final del proceso de elaboración las secciones fueron pulidas con pasta de diamante de 6 μ m y 1 μ m.

El análisis petrográfico y metalográfico de las secciones delgadas pulidas se realizó para identificar los minerales de mena y ganga, asociaciones mineralógicas y texturales, el tipo de alteración hidrotermal, la ocurrencia, asociación y tamaño de granos de oro. Estos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de Metalografía del programa de Geología de la Universidad de Caldas en los microscopios de referencia Nikon 50i POL y Carl Zeiss PRIMOTECH, acompañados de fotografías digitales utilizando las cámaras de alta resolución Nikon y Hayear adaptadas a ambos microscopios respectivamente. Las abreviaturas para la descripción de minerales fueron tomadas de Whitney & Evans (2010). Los resultados del estudio metalográfico fueron complementados con un análisis multielemental de 32 elementos en 396 muestras, llevados a cabo en el laboratorio ALS con tratamiento de cuatro ácidos y posterior análisis ICP-MS, utilizando un equipo Perkin Elmer Sciex ELAN 9000.

Por último, diez secciones doblemente pulidas fueron analizadas petrográficamente para definir la temporalidad de las inclusiones fluidas usando los microscopios Nikon 50i POL y Carl Zeiss PRIMOTECH del laboratorio de Metalografía de la Universidad de Caldas. Una vez realizada la petrografía de inclusiones fluidas e identificadas las zonas de interés se procedió a separar las secciones de la lámina de vidrio en segmentos de 1cm x 1cm, estos segmentos fueron analizados utilizando una platina de enfriamiento-calentamiento LINKAM THMS 600, acoplada a un microscopio Carl Zeiss AXIO SCOPE A1 y a una cámara de alta resolución Hayear. La etapa de enfriamiento-calentamiento, fue calibrada usando inclusiones fluidas sintéticas, con una temperatura máxima de calentamiento de 600°C y una temperatura mínima de enfriamiento -196°C, la precisión estimada de las mediciones es $\pm 0.1^\circ\text{C}$ a $\pm 1^\circ\text{C}$. Para el análisis microtermométrico fueron utilizados los principios definidos por Roedder (1984), Barnes (1997) y el concepto de *Fluid Inclusion Assemblage (FIA)* definido por Goldstein *et al.*, (2003). Las mediciones realizadas fueron: temperatura eutéctica ($^\circ\text{Te}$), temperatura de fusión del último hielo ($^\circ\text{Tm-Ice}$) y temperaturas de homogeneización ($^\circ\text{Th}$), verificando que las inclusiones fluidas medidas presentaran una relación L/V constante y no tuvieran evidencias de *leaking o decrepitation*. Los diferentes cálculos en el análisis microtermométrico fueron estimados usando las ecuaciones resumidas en Bodnar & Vityk (1994) para el sistema H₂O-NaCl planteadas en el módulo Aqso1 del software FLUIDS de Bakker (2003).

Finalmente se realizó la recopilación, interpretación, discusión y análisis de los resultados obtenidos y se utilizaron los softwares CorelDRAW[®], IoGAS[®] y Orange[®] para procesar, editar y presentar los datos y gráficos del informe final.

6. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Las mineralizaciones vetiformes que conforman el proyecto Estrella-Diamantina al igual que las manifestaciones auríferas del DMRSZ están controladas estructuralmente por el sistema de fallas Otú-Pericos (Álvarez *et al.*, 2007; Leal-Mejía, 2011; Mendoza & Giraldo, 2012 y Shaw *et al.*, 2018). Feininger *et al.*, (1972), determinaron para esta zona de falla un componente sinestro lateral con tendencia NS, con una longitud de 120km y un desplazamiento lateral izquierdo de 66km. El sistema de fallas Otú-Pericos es considerado como un límite de terrenos (Figura 2A), los nombres de estos terrenos varían según los autores, al Este el terreno Chibcha (Ch) y al Oeste el terreno Tahamí (Ta) según Rodríguez & Pernet (1983) y Restrepo & Toussaint (2020), que corresponden al Terreno Andino Central (CAT) y al Terreno Andino Oriental (EAT) de acuerdo con Restrepo & Toussaint (1988), al terreno Cajamarca-Valdivia (CA-VA) y al Bloque San Lucas (SL) según Cediél *et al.*, (2003) y al terreno Chibcha Occidental y al terreno Cajamarca-Tahamí según Moreno-Sánchez *et al.*, (2020).

El proyecto Estrella-Diamantina, se encuentra localizado en el municipio de Zaragoza (Figura 2B). Las rocas más antiguas en este sector pertenecen al gneis de San Lucas (Bogotá & Aluja, 1981; Gómez-Tapias *et al.*, 2015). Estas rocas metamórficas del Proterozoico (Esteniano-Toniano) se localizan al Este del sistema de fallas Otú-Pericos en donde predominan rocas de alto grado de metamorfismo como gneises cuarzo-feldespáticos con hornblenda y biotita, migmatitas y granulitas pertenecientes a la Serranía de San Lucas (González, 2001).

El sistema de fallas Otú-Pericos, en la zona Norte del DMRSZ divide rocas metamórficas Permo-Triásicas pertenecientes al Complejo Cajamarca de rocas ígneas Carboníferas del Stock El Carmen (Leal-Mejía, 2011; Gómez-Tapias *et al.*, 2015) y de rocas Jurásicas del Batolito de Segovia (Gómez-Tapias *et al.*, 2015; Spikings *et al.*, 2015). El Complejo Cajamarca es un conjunto

de rocas metamórficas de bajo grado hasta alto grado de metamorfismo, en las que se destacan esquistos cuarzo-sericíticos, gneises feldespáticos y alumínicos, anfibolitas, skarn, mármoles y cuarcitas (Maya & Gonzalez, 1995; Gómez-Tapias *et al.*, 2015). Varona-Bravo *et al.*, (2016), clasificaron las rocas del stock El Carmen como diorita/cuarzodiorita y tonalita/granodiorita, proponiendo una afinidad calcoalcalina para las más ácidas y una afinidad toleítica para las más básicas y clasificándolas geoquímicamente como gabros/dioritas gabroicas y cuarzodioritas/granitos. Según González (2001), el batolito de Segovia se compone principalmente por dioritas, con variación a dioritas cuarzosas y gabros horbléndicos, cerca del sistema de fallas Otú-Pericos resaltan agregados máficos fino-granulares clasificados como noritas acompañados de pequeñas fallas. De acuerdo con este autor, en una pequeña extensión afloran rocas volcano-sedimentarias de origen marino principalmente basaltos, y lodolitas negras intercaladas con limolitas, arenitas y conglomerados de edad Cretácica. Al Norte y cubriendo discordantemente parte de la zona de falla Otú-Pericos se encuentran aflorando los denominados sedimentos del Plioceno de origen continental, compuestos por conglomerados y arenas poco consolidadas con matriz ferruginosa y arcillosa, además de arcillolitas con intercalaciones de limolitas, lodolitas arenosas y arenitas (Gómez-Tapias *et al.*, 2015). Los depósitos aluviales presentes en la zona son de edad Holoceno según lo planteado por González (2001) y están principalmente constituidos por gravas y arcillas con mala selección, no estratificadas y de diferentes litologías.

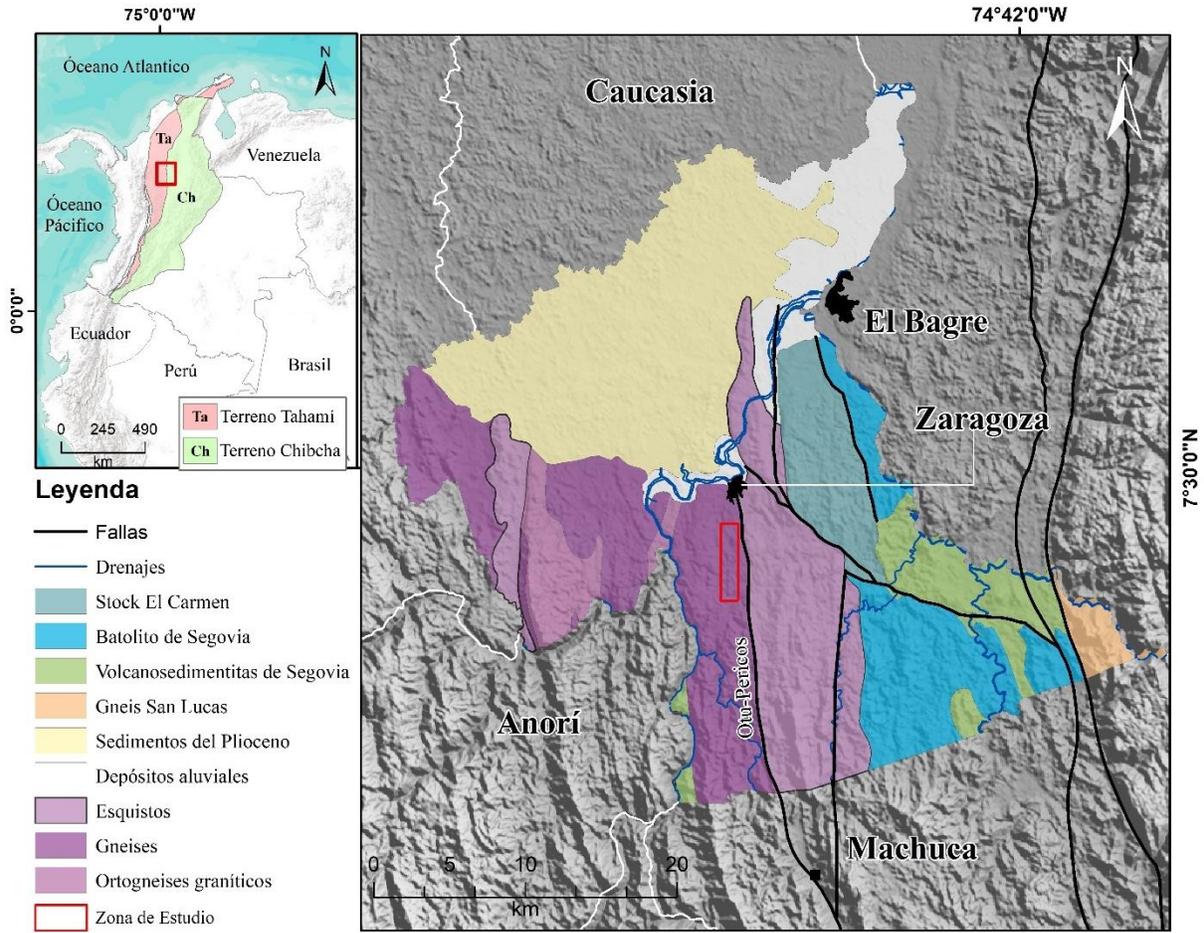


Figura 2. Mapa geológico regional del municipio de Zaragoza, señalando la localización del proyecto de exploración Estrella-Diamantina y de sus sectores Estrella, El Limón, Alacrán, Delirios y Diamantina. Base cartográfica tomada y modificada de Gómez-Tapias *et al.*, (2015). Terrenos Tahamí y Chibcha *sensu* Restrepo *et al.*, (2011).

7. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

Dos tipos de litologías metamórficas propias del Complejo Cajamarca y separadas por el trazo del sistema de fallas Otú-Pericos afloran en el área de estudio (Gómez-Tapias *et al.*, 2015). Al Oeste del sistema de fallas Otú-Pericos se presentan gneises feldespáticos y alumínicos, principales hospedantes de las vetas en el proyecto Estrella-Diamantina. Al Este de esta zona de falla afloran esquistos grafitosos y cuarzo-moscovíticos. Monterroza (2005), describe la presencia de esquistos verdes fino-granulares, compuestos principalmente por actinolita, clorita, epidota y plagioclasa sódica. Según Ayala & Montoya (2004), al Oeste de la zona de falla afloran también rocas de tamaño de grano de medio a grueso, compuestas principalmente por cuarzo, plagioclasa, feldespato, moscovita, biotita y clorita.

El proyecto Estrella-Diamantina está conformado de Norte a Sur por las manifestaciones vetiformes Estrella, El Limón, Alacrán, Delirios y Diamantina (Figura 3). Para este corredor mineralizado de aproximadamente 7km Ayala & Montoya (2004) describieron una mineralización hospedada en gneises feldespáticos y alumínicos con lentes de cuarcita y anfibolita, con una dirección general de N10°E/50°W con espesores de 50 cm, constituidas principalmente por pirita, galena, esfalerita, calcopirita, tetraedrita, oro, plata y oro electrum, y como minerales de ganga cuarzo y calcita. Estos autores de igual manera reportaron la presencia de oro diseminado en forma individual e irregular. Mendoza & Giraldo (2012), describieron para El Limón vetas de cuarzo con espesores entre 10cm y 50cm, rumbo NS y buzamientos desde los 17° hasta los 40° al Oeste, cuya mineralización principal es pirita, galena y esfalerita encajadas en un gneis cuarzo-feldespático.

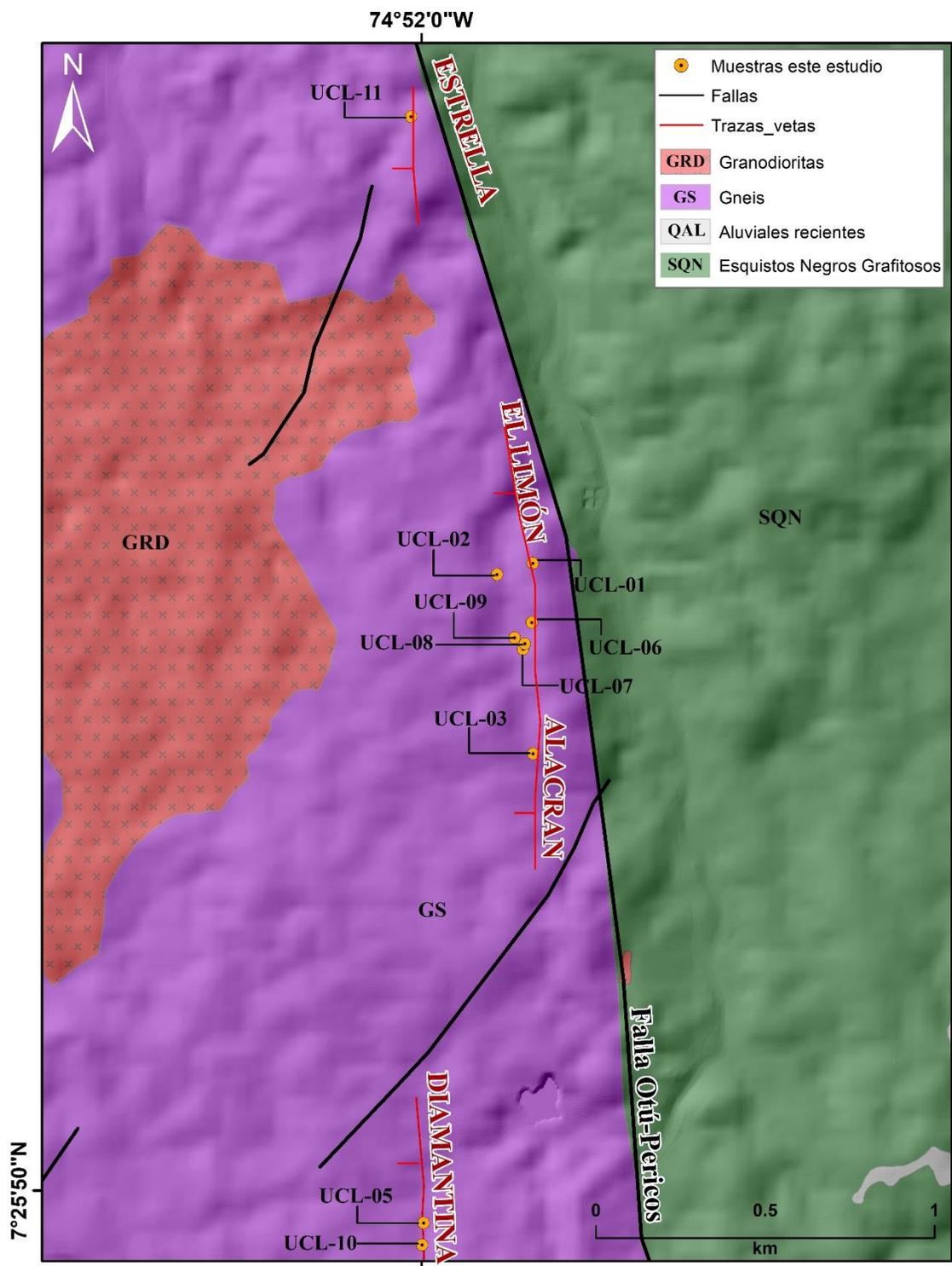


Figura 3. Mapa geológico local del área del proyecto de exploración Estrella-Diamantina y localización de las muestras analizadas. Base cartográfica suministrada por Operadora Minera S.A.S.

7.1 ROCA HOSPEDANTE

La descripción de la roca hospedante se realizó a partir de una muestra recolectada en el sector El Limón e identificada como UCL-06 (Figura 4). Esta muestra corresponde a una milonita, según la clasificación propuesta por Sibson (1977), siendo esta a su vez el tipo de litología más representativo a lo largo del proyecto.

A nivel macroscópico se presenta como una roca cristalina moteada con orientación mineral no penetrativa, con tamaños de grano fino a medio, que varían entre 0.1cm y 0.3cm de longitud. La relación porcentual entre la fracción leucocrática (i.e. cuarzo, plagioclasa y moscovita) y la fracción melanocrática (i.e. biotita y clorita) se estableció como 45% y 55% respectivamente. La fracción leucocrática presenta formas lenticulares y mayor tamaño de grano. La relación porcentual entre la matriz y los porfidoblastos es de 60% y 40% en ese orden.

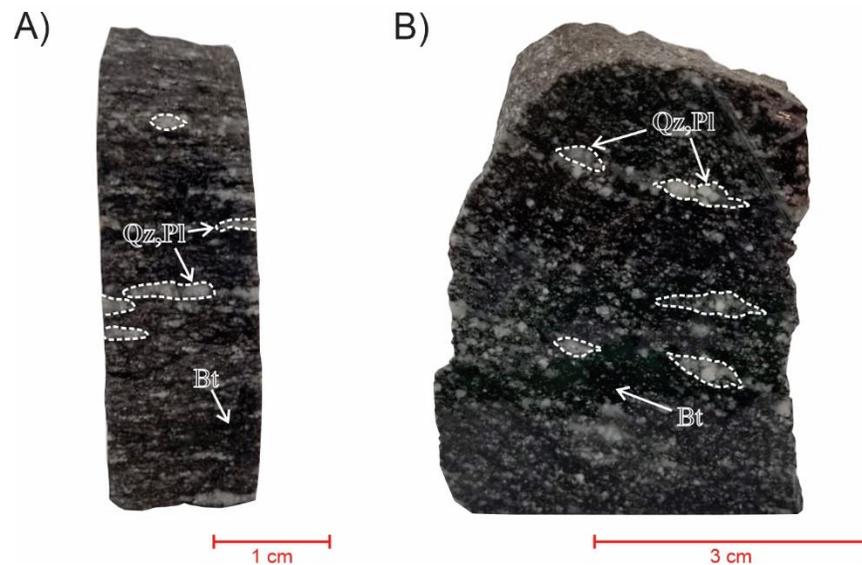


Figura 4. Roca hospedante en muestra de mano (UCL-06). **A)** Vista frontal. **B)** Vista de perfil.

Microscópicamente se reconocieron las texturas milonítica, granoblástica y lepidoblástica. Se identificaron porfiroclastos de cuarzo, plagioclasa, ortoclasa, biotita y moscovita con tamaños variables entre 0.5mm y 1mm, envueltos en una matriz microcristalina (Figura 5A, 5B). El cuarzo, se presenta en tres formas: a) recristalizado formando agregados (Figura 5C y 5D), b) en inclusiones redondeadas sobre plagioclasa (Figura 5E y 5F) y c) en textura embafiada (Figura 5G y 5H), la presencia de esta textura se enlaza a un protolito ortogneísico de tipo pre-cinemático, sobre el cual se desarrollan formas sigmoidales en clorita, moscovita y biotita, indicadoras de metamorfismo dinámico (Figura 6A y 6B).

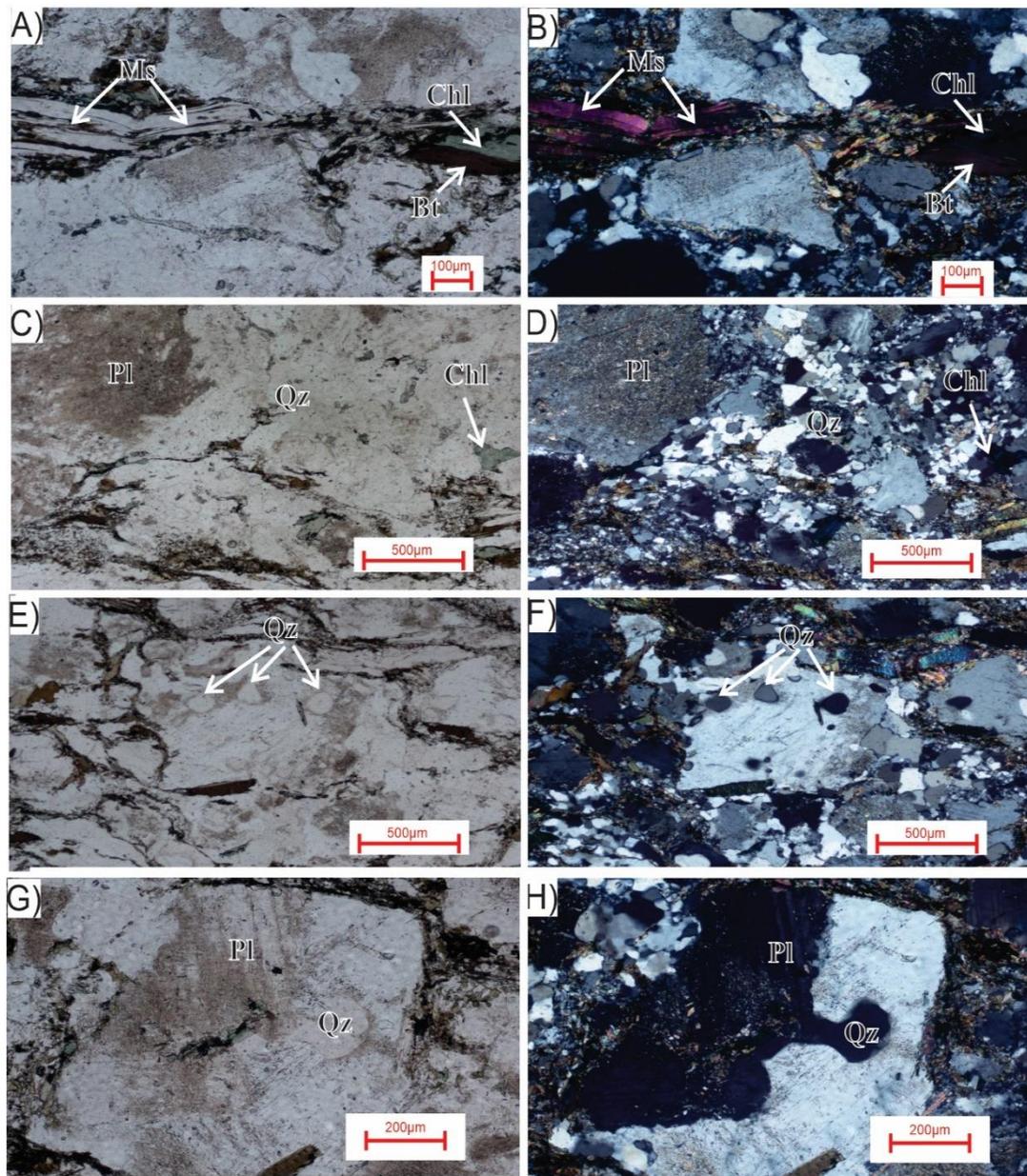


Figura 5. Microfotografía con luz transmitida de los principales minerales y texturas que conforman la roca hospedante (UCL-06) **A)** Porfidoblastos de plagioclasa, cuarzo, moscovita, biotita y clorita en matriz microcristalina compuesta por cuarzo, plagioclasa, moscovita y biotita. 10X. NP. LT. **B)** Porfidoblastos de plagioclasa, cuarzo, moscovita, biotita y clorita en matriz microcristalina compuesta por cuarzo, plagioclasa, moscovita y biotita. 10X. NX. LT. **C)** Agregados de cuarzo. 5X. NP. LT. **D)** Agregados de cuarzo. 5X. NX. LT. **E)** Inclusiones redondeadas de cuarzo en plagioclasa. 5X. NP. LT. **F)** Inclusiones redondeadas de cuarzo en plagioclasa. 5X. NX. LT. **G)** Textura embahada entre cuarzo y plagioclasa. 20X. NP. LT. **H)** Textura embahada entre cuarzo y plagioclasa. 20X. NX. LT.

La sericita se presenta como mineral de alteración, a nivel microscópico se presenta reemplazando plagioclasa y feldespato en forma de agregados laminares microcristalinos con colores de interferencia de tercer orden. También se evidencia clorita a partir de biotita, algunos cristales totalmente alterados y otros parcialmente alterados, la clorita presenta coloración verde en nicoles paralelos y azul berlín en nicoles cruzados, hábito laminar y tamaños que varían desde $7\mu\text{m}$ hasta $520\mu\text{m}$ (Figura 6C y 6D). Como minerales accesorios se encontraron apatitos, circones y minerales opacos como pirita, titanomagnetita, ilmenita y hematita (Figura 6E y 6F). A partir de sus características mineralógicas y texturales, esta roca encajante se clasifica como una milonita a partir de un ortogneis.

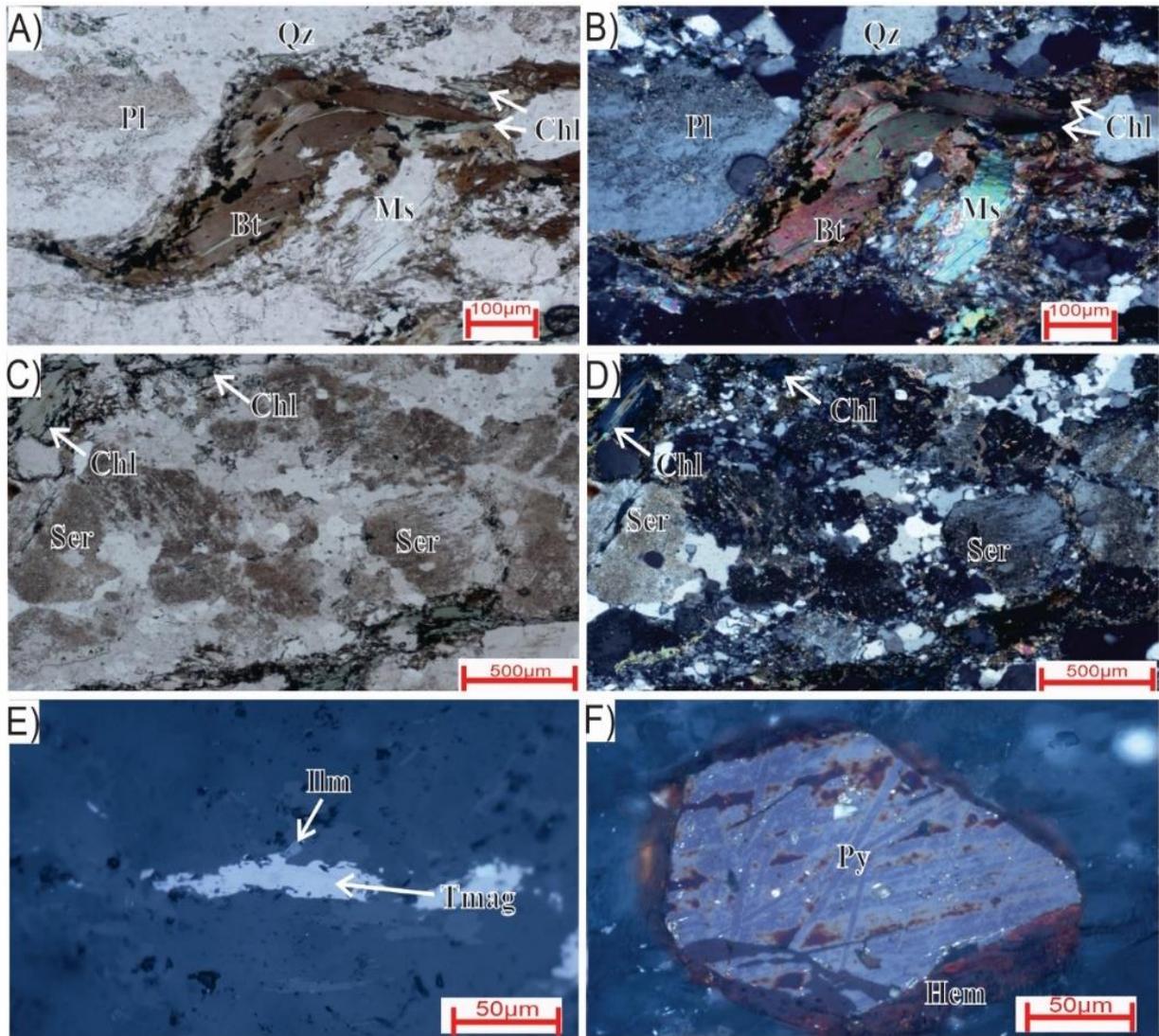


Figura 6. Microfotografía de los principales minerales y texturas que conforman la roca hospedante (UCL-06) **A)** Filosilicatos formando una figura sigmoideal propia de la textura milonítica. 10X. NP. LP. **B)** Filosilicatos formando una figura sigmoideal propia de la textura milonítica. 10X. NX. LP. **C)** Plagioclasa alternándose a sericita y biotita alterándose a clorita, minerales de alteración encontrados en la muestra. 5X. NP. LP. **D)** Plagioclasa alternándose a sericita y biotita alterándose a clorita, minerales de alteración encontrados en la muestra. 5X. NX. LP. **E)** Titanomagnetita alternándose a ilmenita. 50X. NP. LP. **F)** Pirita alternándose a hematita en los bordes del cristal. 50X. NX. LP.

7.2. SISTEMAS VETIFORMES

Vetas de cuarzo con una tendencia general N-S, paralelos al trazo del sistema de fallas Otú-Pericos, se encuentran hospedados en rocas metamórficas del Complejo Cajamarca presentes en la parte Norte del DMRSZ, en la zona Segovia-Zaragoza (Rodríguez & Pernet, 1983).

Ayala & Montoya (2004) describieron la mina El Limón (Figura 7Ay 7C) como un sistema de vetas en forma de filones de fisura de forma tabular y pseudoestratificada, ocasionalmente en pequeñas bolsas compuestas principalmente de cuarzo y en menores cantidades de carbonatos, con oro asociado principalmente a pirita, galena y esfalerita, con una tendencia general N10°E/50°W con un espesor promedio de 50cm. Para esta misma mina, López (2004) describió una estructura de cuarzo lechoso, encajada en gneises cuarzofeldespáticos y moscovíticos de edad Paleozoica al Oeste del sistema de fallas Otú-Pericos, con tendencia N10°E con un buzamiento de 30° a 50°W y un espesor promedio de 40cm con variaciones que van desde 12cm hasta 110cm. Este autor mencionó además una zona de plegamiento, cuyo eje se dispone N20°W/28° y produce cambios en la disposición de la veta. Mendoza & Giraldo (2012) definieron para la mina El Limón, una veta con tendencia general NS/40°-45°W, encajada en un gneis cuarzo-feldespático, con espesores variables entre 30cm y 50cm, con pirita, galena y esfalerita como sulfuros principales, estos autores mencionan para esta zona la presencia de estructuras tipo *ribbons* bien definidas, en las que se concentra la mineralización y zonas de cizalla con presencia de salbanda tanto en el techo como en la base de la veta, estructuras sigmoidales definidas por sistemas de fracturas y fallas que reducen localmente los espesores de la veta y causan truncamientos. Para el sector Estrella, Mendoza & Giraldo (2012) describieron una veta cuya tendencia general es NS/40°W, con una mineralización principal compuesta por pirita y galena.

Para el sector de Diamantina (Figura 7B y 7D), Ayala & Montoya (2004) describieron una mineralización vetiforme encajada en estructuras satélites mineralizadas, con una tendencia generalizada N15°-30°W al costado izquierdo del sistema de fallas Otú-Pericos.

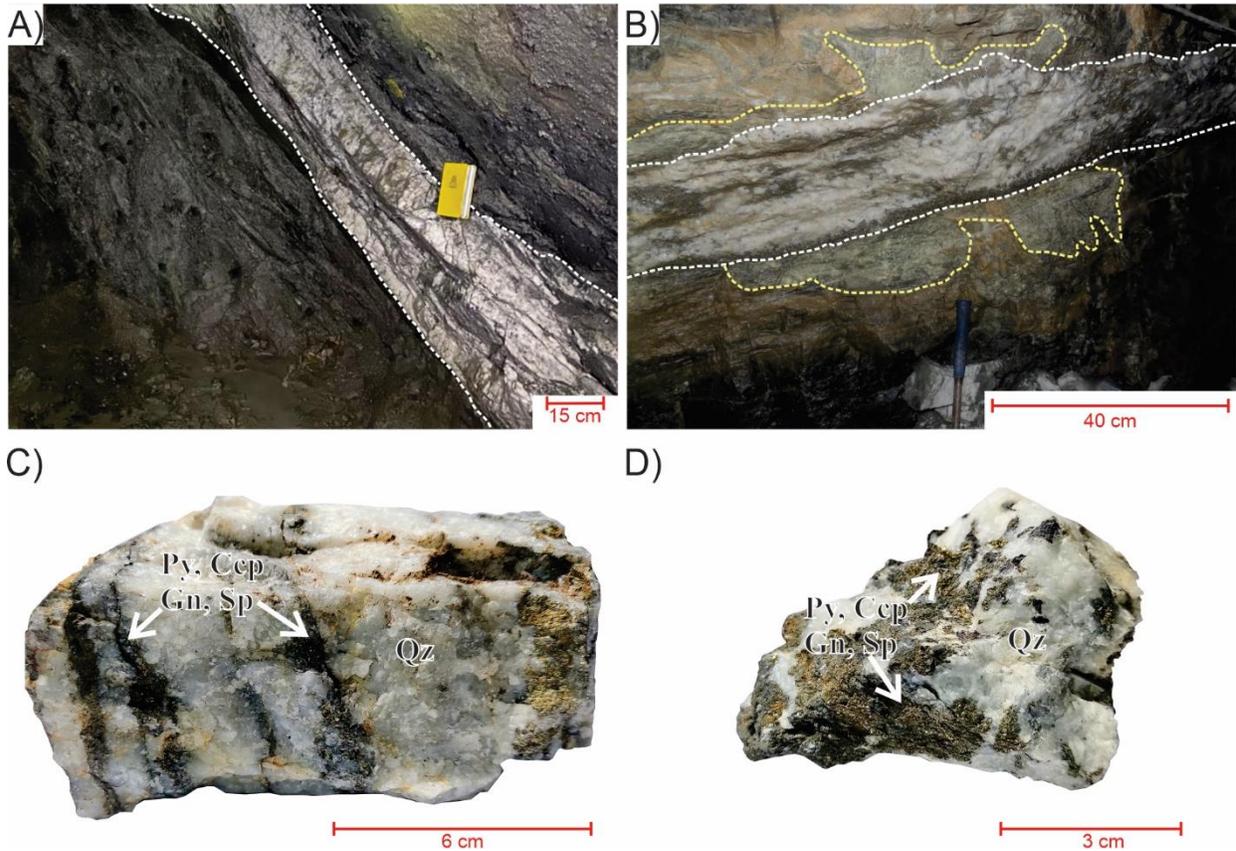


Figura 7. Características generales de las vetas **A)** Fotografía tomada en la mina Diamantina donde se evidencia el contacto de la roca hospedante y la veta. **B)** Fotografía tomada la mina El Limón, en la que se evidencia el halo de alteración hidrotermal. **C)** Muestra perteneciente al sector El Limón (UCL-03) en el cual se evidencia una veta de cuarzo masivo con mineralización en venillas de pirita y sericita diseminada. **D)** Muestra perteneciente al sector Diamantina (UCL-10) en el cual se evidencia una veta con mineralización de pirita, galena y esfalerita.

8. MINERALIZACIÓN

La mineralización en el proyecto Estrella-Diamantina presenta una composición homogénea, con vetas compuestas principalmente por cuarzo y una variedad de sulfuros reducida que compone aproximadamente el 12% de las vetas. Los principales minerales de ganga observados a nivel macroscópico en las vetas fueron cuarzo, calcita, sericita y los minerales metálicos identificados fueron pirita, galena, esfalerita y calcopirita (Figura 7C y 7D). El cuarzo se observa con tamaños desde 0.2cm hasta 3.5cm, hábitos prismáticos, masivos y granulares, brillo vítreo y colores blancos, siendo este el mineral más abundante dentro de las vetas. La calcita presenta hábitos masivos y granulares, con colores blancos y grises y brillo vítreo, se presenta en forma de venillas con espesores de 2mm dentro de las vetas de cuarzo o como agregados granulares. La sericita presenta tamaños desde < 0.1cm y hasta de 0.3cm, con hábito laminar, con colores blancos y amarillos y se observó también de manera diseminada en algunos sectores de la veta o formando pequeños cúmulos. La pirita es el sulfuro más abundante, aportando en promedio un 10% en volumen a las vetas, presenta tamaños hasta de 0.6cm, con hábito masivo y cúbico, color amarillo latón pálido, brillo metálico y comúnmente asociada con otros sulfuros (i.e. galena, esfalerita y calcopirita). La galena exhibe tamaños desde 0.1cm hasta 0.4cm, con hábito cúbico y masivo, color gris plomo y brillo metálico. La esfalerita variedad marmatita, presenta tamaños desde 0.1cm hasta 0.4cm, con hábito masivo, color pardo oscuro y brillo submetálico. La calcopirita presenta tamaños desde >0.1cm hasta 0.2cm, con hábito masivo, color amarillo latón y brillo metálico. Microscópicamente se identificaron cuarzo, calcita, sericita y clorita como minerales de ganga. Los minerales metálicos identificados fueron pirita, galena, esfalerita, calcopirita, pirrotina, cubanita, melnikovita y oro. El cuarzo (Qz) se observó en venillas y agregados granulares a lo largo de las muestras. La calcita (Cal) se presenta como cristales

subhaciales, con tamaños desde 60 μ m hasta 500 μ m y en forma de venillas con espesores aproximados de 100 μ m cortando la mineralización. La sericita (Ser) se encuentra de manera diseminada y en agregados laminares. La clorita (Chl) presenta hábito acicular radial, con coloración verdosa y tamaños hasta de 670 μ m. La pirita (Py) se encuentra con tamaños desde 40 μ m hasta 2.6mm, hábitos cúbico y masivo, formas euhaciales, subhaciales y anhaciales, color crema, reflectancia alta, intensa fracturación y leve anisotropía en nicols cruzados indicando un posible contenido de arsénico en su estructura (Figura 8A). La galena (Gn) se observó con tamaños desde 120 μ m hasta 500 μ m, hábitos cúbico y masivo, formas euhaciales, subhaciales y anhaciales, color gris claro, reflectancia moderadamente alta, pits triangulares deformados y no deformados y fracturación moderada (Figura 8B). La esfalerita (Sp) presenta tamaños desde 25 μ m hasta 1.8mm, hábito masivo, formas anhaciales, color gris medio con tonalidad café, alto fracturamiento, reflectancia baja, reflexiones internas rojo-anaranjado, sugiriendo un posible contenido de hierro en su estructura mineral (variedad marmatita) (Figura 8C). La calcopirita (Ccp) se observó con tamaños desde 12.5 μ m hasta 560 μ m, hábito masivo, formas subhaciales y anhaciales, color amarillo, reflectancia alta y baja fracturación (Figura 8D). La melnikovita (Mk) muestra tamaños hasta de 220 μ m, hábito coloforme, formas anhaciales, color blanco crema y reflectancia alta (Figura 8E). La pirrotina (Po) presenta tamaños desde 37.5 μ m hasta 75 μ m, hábito masivo, formas subhaciales, color rosado con tonalidad amarilla, reflectancia media y baja fracturación (Figura 8F). La cubanita (Cbn) presenta tamaños entre 60 μ m y 90 μ m con color violáceo (Figura 8G). El oro (Au) se observa con tamaños desde 5 μ m hasta 338 μ m, hábito masivo, formas subhaciales y anhaciales, color amarillo intenso y alta reflectancia (Figura 8H).

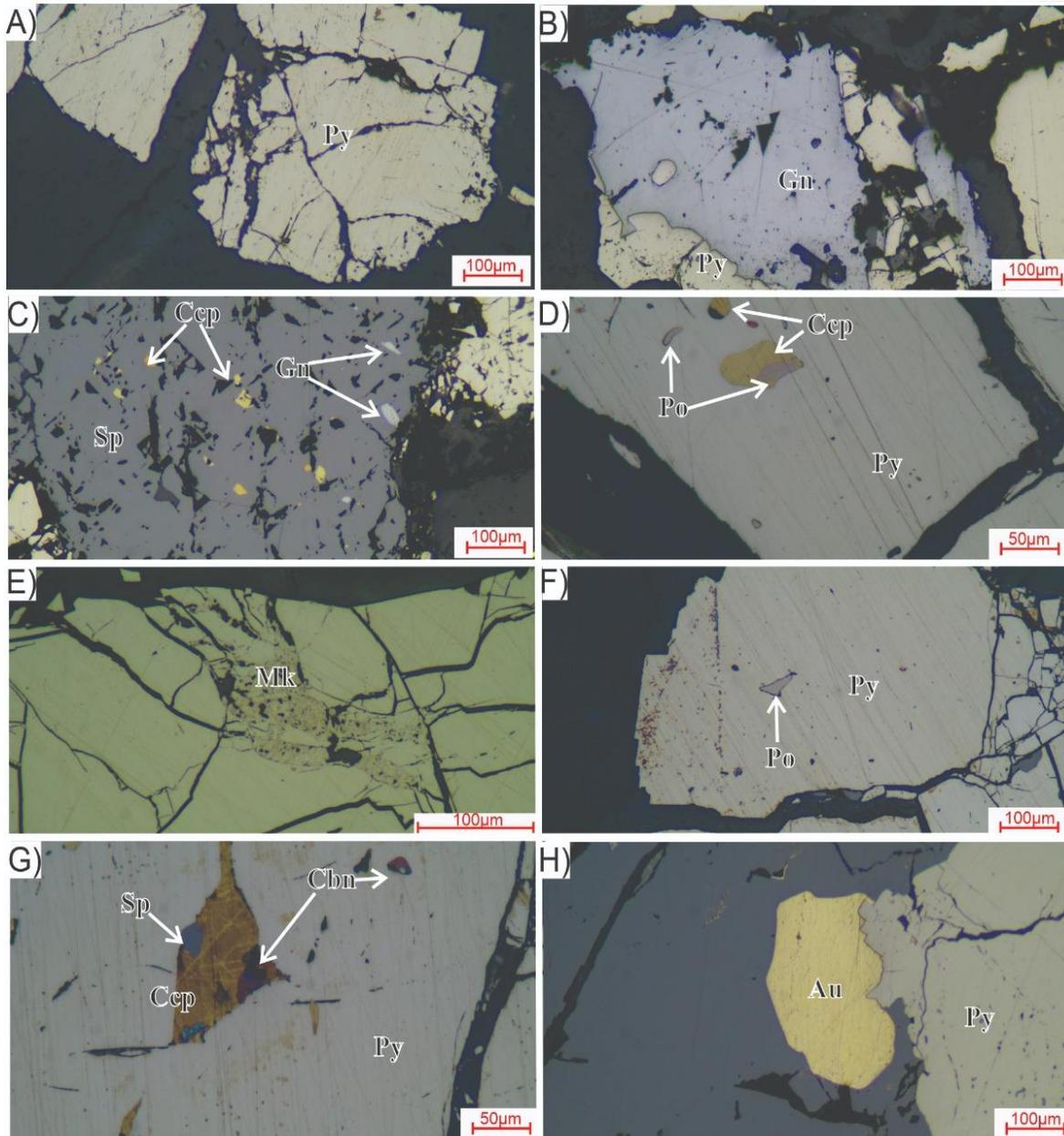


Figura 8. Microfotografía de los principales minerales que conforman la mineralización. **A)** Pirita subhedral. 5X. NX. LR. **B)** Intercrecimiento de galena en pirita. 10X. NX. LR. **C)** Esfalerita con inclusiones de calcopirita y galena. 5X. NX. LR. **D)** Pirita con inclusiones de pirrotina y calcopirita. 5X. NX. LR. **E)** Melnikovita con textura coliforme. 10X. NX. LR. **F)** Inclusión de pirrotina en pirita. 20X. NX. LR. **G)** Cubanita en exsolución con calcopirita y esfalerita incluida en pirita. 20X. NX. LR. **H)** Oro asociado a pirita. 10X.

9. ALTERACIONES HIDROTERMALES

El mineral de alteración dominante es la sericita, acompañado de cuarzo y clorita. A nivel macroscópico la sericita se observó principalmente entre los contactos de las vetas y la roca hospedante. Este mineral se presenta de forma diseminada, con cristales de tamaños milimétricos de color amarillento y brillo terroso (Figura 9A y 9B). A nivel microscópico la sericita se presenta como pequeños cristales tabulares con colores de interferencia de tercer orden a partir de la alteración de los feldespatos. El cuarzo se presenta con hábitos masivos, prismáticos y granulares, con tamaños desde 0.2mm hasta 12mm, brillo vítreo y colores blancos y traslucidos, en algunas zonas se observan oquedades (Figura 9C y 9D). A nivel microscópico se evidencian hábito granular con tamaños que van desde 22 μ m hasta 700 μ m. La clorita no se evidenció en las muestras de mano, pero a nivel microscópico presenta hábito acicular radial, tamaños hasta de 670 μ m, asociada a los carbonatos y concentrada en pequeñas secciones. (Figura 9E y 9F).

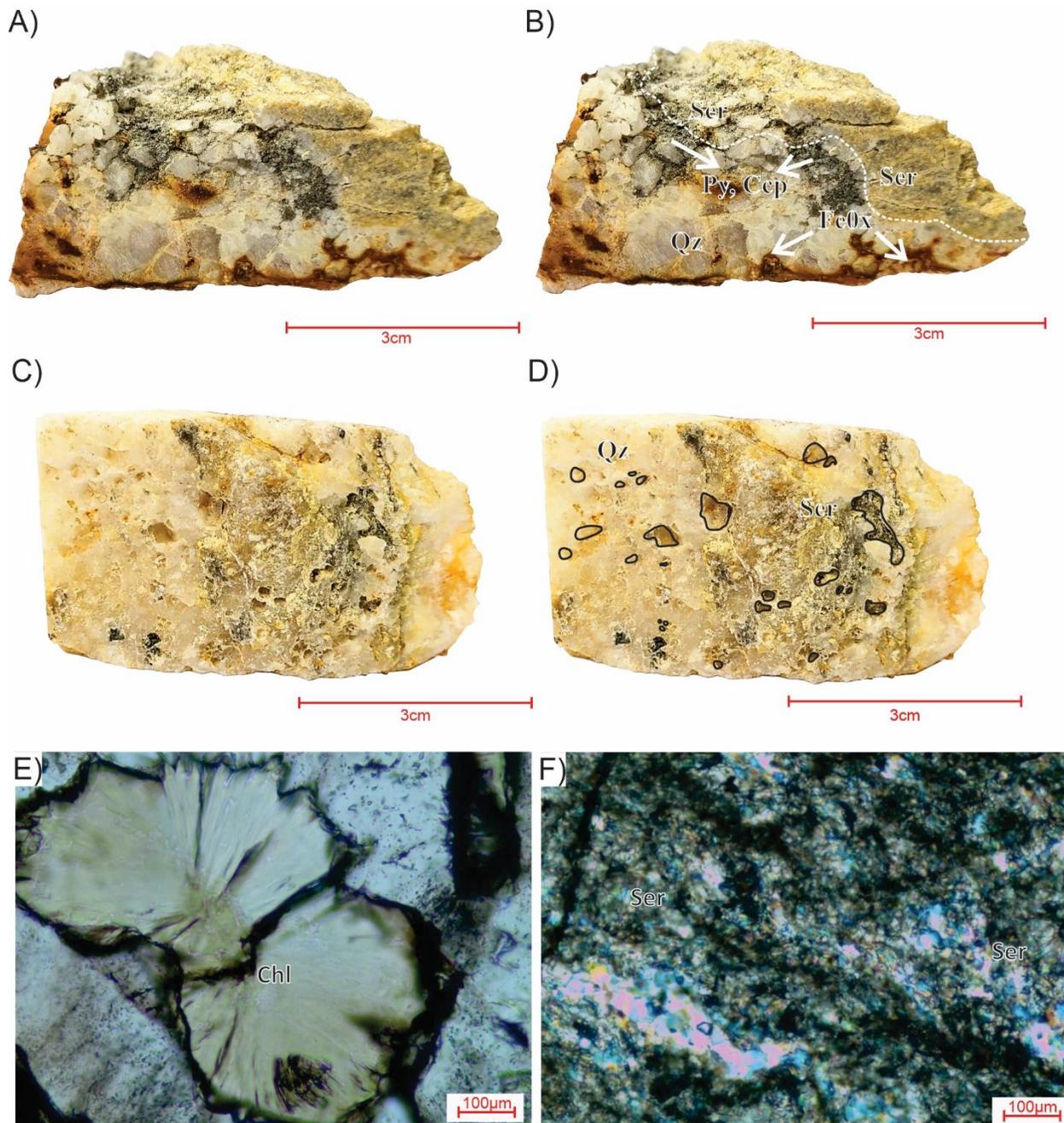


Figura 9. Fotografías y microfotografías de los principales minerales y texturas que conforman la alteración hidrotermal. **A-B)** Vista frontal de muestra de mano alterada, en la que se resalta la presencia de sericita y el contacto con la alteración. **C-D)** Vista frontal de muestra de mano en la que se observan oquedades en cuarzo. **E)** Clorita con hábito acicular radial. 5X. NX. LP. **F)** Microcristales de sericita. 5X. NX. LP.

10. TEXTURAS DE CUARZO, CARBONATO Y MENA

El cuarzo es el mineral de ganga dominante en las vetas analizadas. En muestra de mano, este se observó principalmente con hábito masivo y prismático con tamaños desde los 2mm hasta los 12mm.

La descripción de las texturas de cuarzo se estableció a partir de las clasificaciones propuestas por Dowling & Morrison (1989). Se identificaron al menos 4 generaciones de cuarzo, desarrollando texturas primarias (e.g. *Buck texture*, *Comb texture*, y *Banded texture*) y secundarias (e.g. *Breccia texture*).

La primera generación de cuarzo (Qz1) se observó desarrollando una textura *Buck* con hábito masivo, cristales de tamaños de hasta 2mm, con bordes irregulares y extinción ondulante, evidencia de deformación (Figura 10A). La segunda generación de cuarzo (Qz2) presentó texturas de recristalización a partir de Qz1, desarrollando: a) texturas tipo *Aggregate Breccia*, con agregados cristalinos, bordes irregulares con tamaños desde 22 μ m hasta las 700 μ m (Figura 10B) y b) texturas tipo *Infill Breccia* o *bulging quartz* (Stipp *et al.*, 2002 y Owona *et al.*, 2013) desarrollando agregados a lo largo de los espacios intercristalinos con tamaños desde 10 μ m hasta 50 μ m (Figura 10C). La tercera generación de cuarzo (Qz3) se caracterizó por presentar texturas tipo *Fine Comb* desarrollando prismas euhedrales con un tamaño promedio de 550 μ m de largo y 140 μ m de ancho, que en ocasiones se mostraron orientados (Figura 10D, E). La cuarta generación de cuarzo (Qz4) presentó texturas tipo *Colloform Banded*, con un ancho de hasta 3 μ m en sus bandas, con hábito coloforme y asociado a Qz3, también se presentó asociado a cristales de calcedonia (Figura 10F).

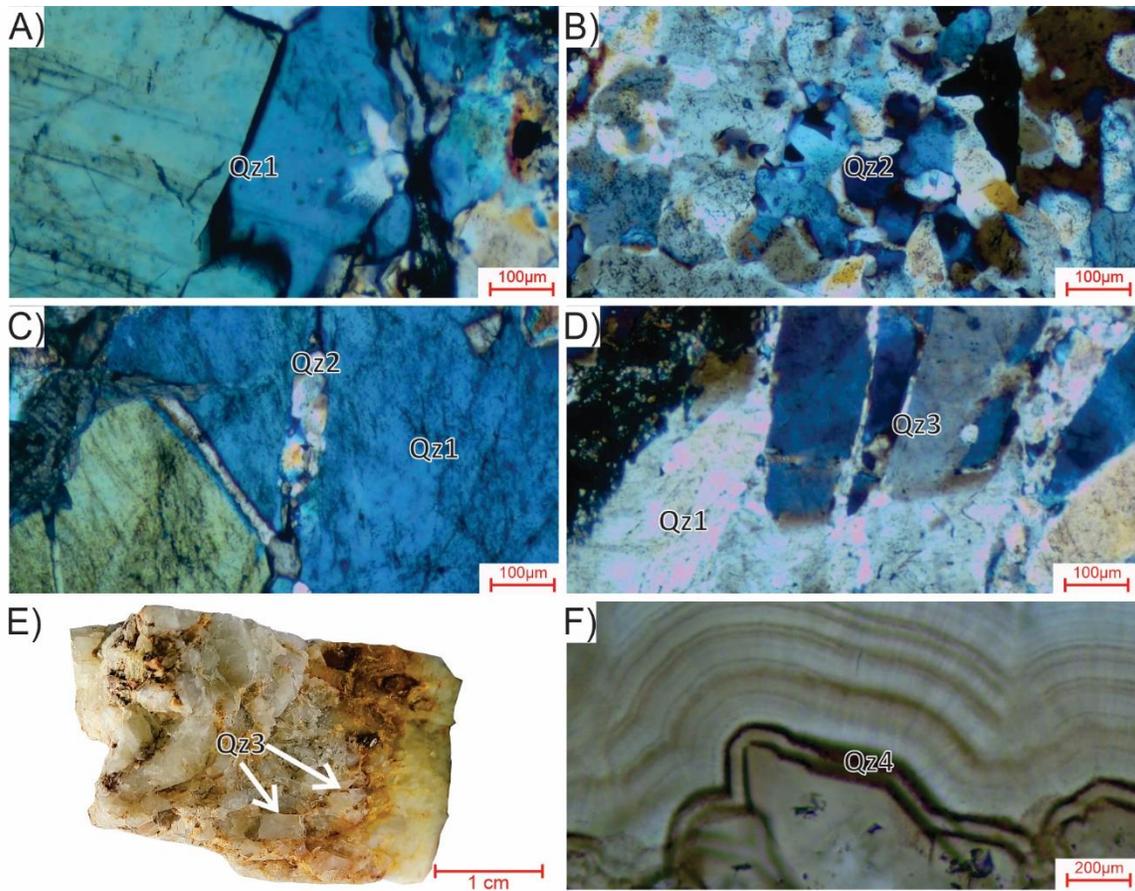


Figura 10. Microfotografías de las principales texturas de cuarzo que conforman la mineralización, se presentan en luz polarizada y en nicols cruzados. **A)** Buck textura (Qz1). **B)** Aggregate Breccia textura (Qz2). **C)** Infill Breccia texture o bulging quartz (Qz2). **D-E)** Fine Comb textura (Qz3). **F)** Colloform Banded textura (Qz4). *Se observan colores de segundo orden debido a que son secciones doblemente pulidas.

La calcita (Cal) a nivel macroscópico presentó hábitos masivos y granulares, con colores blancos y grises, brillo vítreo, en forma de cristales subhedrales con tamaños desde 0.2mm y 0.5mm y venillas con espesores de ~2mm. A nivel microscópico se identificaron cristales subhedrales, con tamaños desde 60µm hasta 500µm y venillas con espesores aproximados de 100µm cortando la mineralización.

La clasificación de las texturas de calcita, se realizó a partir de su forma y tipo de macla según la propuesta de Ferrill *et al.*, (2004). Se identificaron dos generaciones de calcita: la primera (Cal1), presentó hábitos prismáticos y euhedrales y planos de exfoliación gruesos, *Tipo 2* (Figura

10) y la segunda generación (Cal2) se observó relleno de fracturas y espacios vacíos, con planos de exfoliación delgados, *Tipo 1* y asociada a un evento tardío por su relación de corte con los demás minerales (Figura 11).

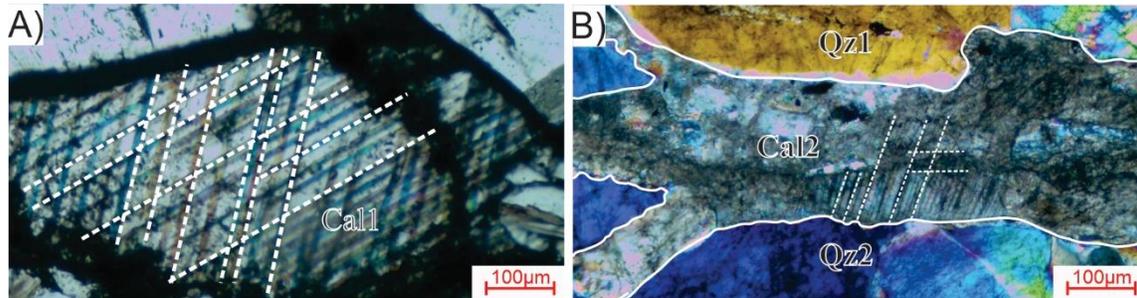


Figura 11. Microfotografías de las generaciones de calcita que conforman la mineralización, se presentan en luz polarizada y en nicoles paralelos. **A)** Cristal prismático y euhedral con exfoliación tipo 2. **B)** Venilla con planos de exfoliación tipo 1. *Se observan colores de segundo orden debido a que son secciones doblemente pulidas.

Las principales texturas de mena identificadas en la mineralización corresponden a texturas de reemplazamiento, intercrecimiento, exsolución y relleno de fracturas.

La pirita (Py) fue el mineral más abundante en las vetas, se presentó de tres maneras. La primera generación de pirita (Py1) se desarrolló de forma masiva con cristales anhedrales y subhedrales, con tamaños hasta de 2.6mm, con alto grado de fracturamiento, desarrollando texturas porosas, de brechamiento y esqueletales (Figura 12A). Este mineral se encontró asociado a galena, esfalerita, calcopirita, pirrotina, cubanita y oro, minerales que se observaron relleno de fracturas o como inclusiones (Figura 12B, C). La segunda generación de pirita (Py2) se presentó en cristales cúbicos con formas euhedrales y subhedrales con tamaños hasta de 40µm, con poca o nula deformación. La tercera generación de pirita (Py3) se presentó en cristales anhedrales y subhedrales asociada a las venillas de Cal2. La galena (Gn) se presentó relleno de fracturas y como inclusión en la Py1, con pits triangulares deformados (Gn1) y no deformados (Gn2), se encontró en intercrecimiento con esfalerita y asociada a oro (Figura 12D). La esfalerita (Sp) se

presentó como cristales anhedrales y subhedrales relleno de fracturas de Py1, también desarrolló bordes irregulares y presentó texturas de reemplazamiento como textura coronítica con Py1 y asociada a calcopirita, galena y oro (Figura 12E). La calcopirita (Ccp) se presentó de dos maneras. La primera generación de calcopirita (Ccp1) como inclusiones en Py1, asociada a pirrotina y cubanita y la segunda generación de calcopirita (Ccp2) como inclusiones orientadas según los planos cristalográficos en esfalerita, desarrollando la textura conocida como enfermedad de la esfalerita y asociada a oro relleno de fracturas en Py1 (Figura 12F). La pirrotina (Po) se presentó como cristales anhedrales y subhedrales en inclusiones en Py1 y asociada a Ccp1 (Figura 12G). La melnikovita (Mk) presentó textura coliforme y a partir de la Py1. La cubanita (Cbn) se presentó en cristales anhedrales como exsolución en Ccp1. El oro (Au) se depositó de dos formas, la primera generación de oro (Au1) presentó cristales anhedrales y subhedrales como inclusiones y relleno de fracturas en Py1 y asociado principalmente con galena, esfalerita y calcopirita (Figura 12H, I). La segunda generación de oro (Au2) se presentó de manera libre en Qz3 (Figura 12J).

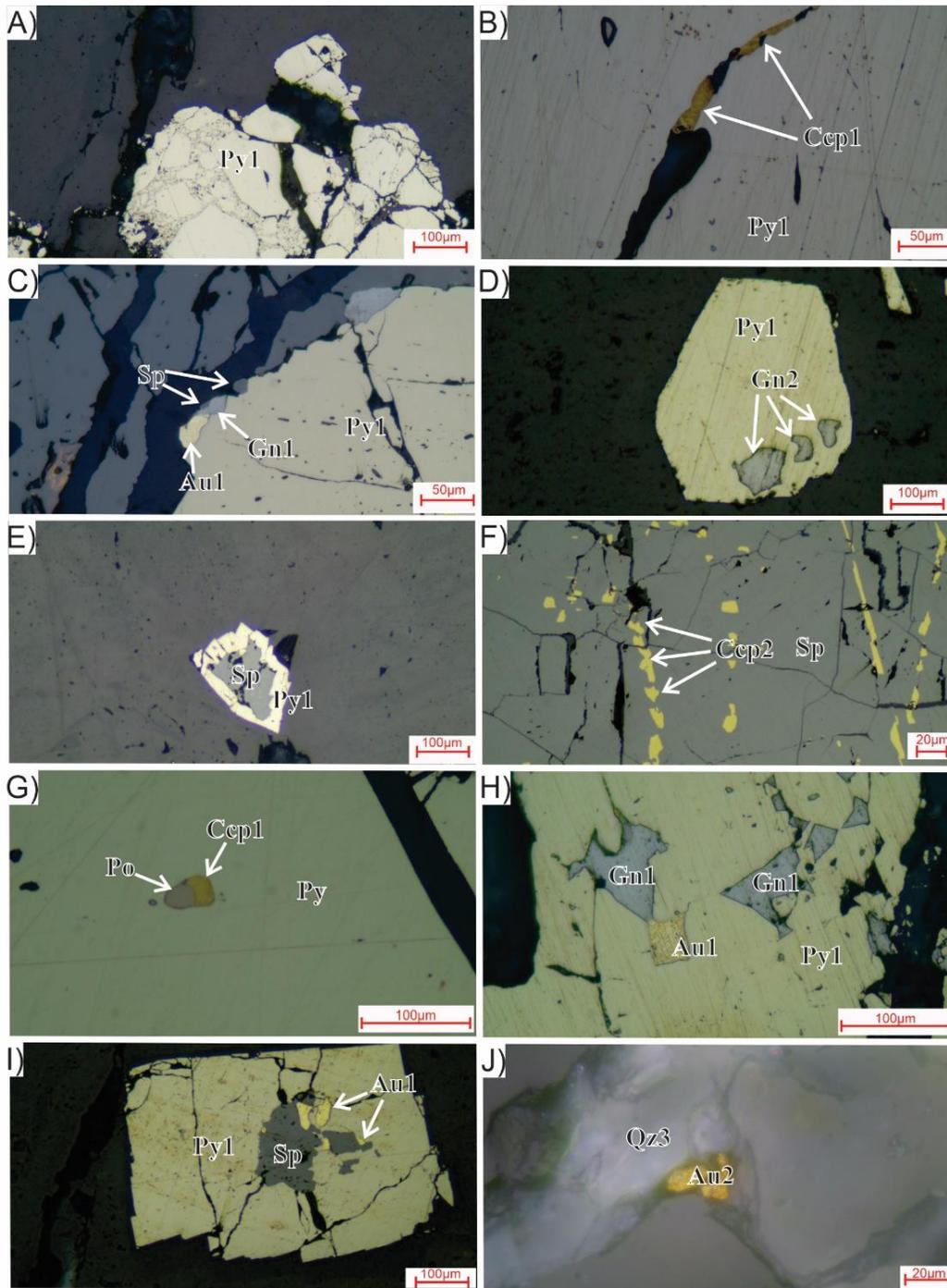


Figura 12. Microfotografías de las principales texturas que conforman la mineralización. **A)** Pirita porosa. 5X. NX. LR. **B)** Pirita brechada 5X. NX. LR. **C)** Pirita esquelética. 5X. NX. LR. **D)** Calcopirita relleno de fractura en pirita. 20X. NX. LR. **E)** Relación textural entre oro, esfalerita, galena y pirita. 20X. NX. LR. **F)** Textura en caries, inclusiones de galena en pirita. 20X. NX. LR. **G)** Textura coronítica de esfalerita y pirita. 10X. **H)** Inclusiones de calcopirita siguiendo planos cristalográficos en esfalerita (enfermedad de la esfalerita). 5X. NX. LR. **I)** Pirrotina y calcopirita incluidas en pirita. 20X. NX. LR. **J)** Galena incluida en pirita, en intercrecimiento con Au 20X. NX. LR. **K)** Oro incluido en pirita en intercrecimiento con esfalerita. 10X. NX. LR. **L)** Oro libre 40X. NX. LR.

10.1 SECUENCIA PARAGENÉTICA

Las asociaciones minerales y texturales identificadas, permitieron determinar cuatro etapas mineralizantes y la secuencia paragenética para el corredor mineralizado Estrella-Diamantina (Figura 13).

La etapa I corresponde a un evento de cristalización de Qz1, acompañado de Py1, Ccp1, Po y Cbn, los minerales de esta etapa posteriormente se ven afectados por el evento deformativo D1.

La etapa II es la principal etapa mineralizante y se caracteriza por la recristalización de Qz2 a partir de Qz1, la formación de carbonatos tipo Cal1 y por el aprovechamiento de fracturas y espacios vacíos resultantes del evento deformativo D1. Los minerales que rellenan las fracturas son Py2, Sp, Gn1, Ccp2 y Au1 (en ese orden de abundancia). Un segundo evento deformativo D2 afecta los minerales de esta etapa.

La etapa III representa un evento tardío de mineralización. El inicio de esta etapa está determinado por la cristalización de Qz3 y Qz4 a partir de los espacios vacíos generados en el evento D2, estos espacios también son aprovechados por minerales como Gn2, Au2 y Mk.

La etapa IV está representada por venillas de Cal2 con Py3 que cortan la secuencia anteriormente descrita e indican el cierre del sistema hidrotermal.

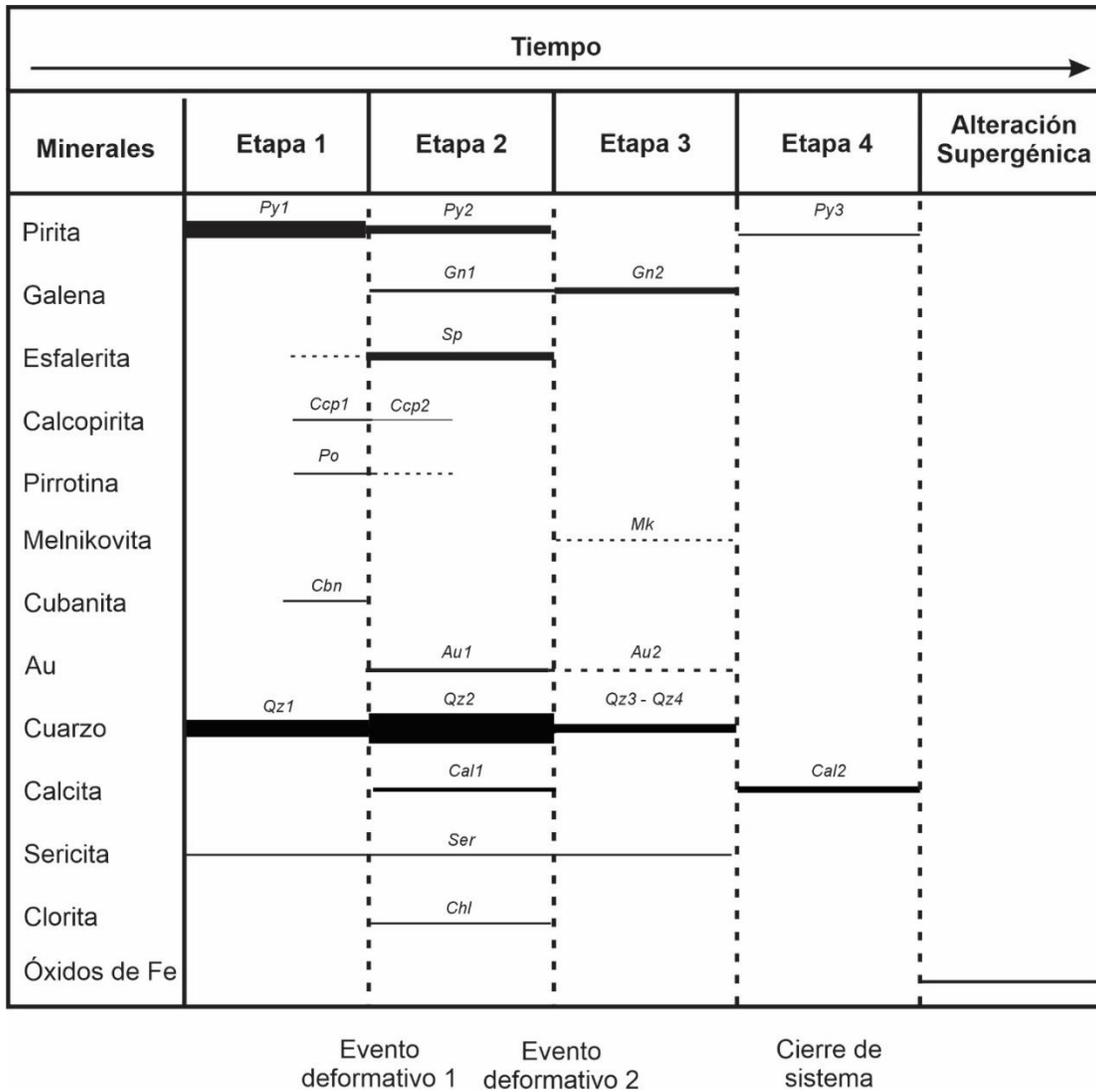


Figura 13. Secuencia paragenética. *Nota: El espesor de las líneas indica la abundancia relativa de los minerales.

11. ANÁLISIS DE INCLUSIONES FLUIDAS

Diez secciones doblemente pulidas fueron analizadas petrográficamente para definir la temporalidad y su posición en la secuencia paragenética. Una vez realizada la petrografía de inclusiones fluidas e identificadas las zonas de interés se procedió con el análisis microtermométrico, utilizando los principios definidos por Roedder (1984), Barnes (1997) y el concepto de *Fluid Inclusion Assemblage (FIA)* definido por Goldstein *et al.*, (2003). Las mediciones realizadas en la etapa de enfriamiento-calentamiento fueron: temperatura eutéctica ($^{\circ}\text{Te}$), temperatura de fusión del último hielo ($^{\circ}\text{Tm-Ice}$) y temperaturas de homogeneización ($^{\circ}\text{Th}$), verificando que las inclusiones fluidas medidas presentaran una relación L/V constante y no tuvieran evidencias de *leaking* o *decrepitation*.

11.1 PETROGRAFÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS

Se observaron inclusiones fluidas hospedadas en tres minerales diferentes (i.e, cuarzo, calcita y esfalerita). Las inclusiones presentan tamaños que van desde 11.86 μm hasta 109.38 μm , con formas tabulares, regulares, irregulares y ovoidales, desarrollándose de manera aislada, en trenes intragranulares o intergranulares (Figura 14A). Son principalmente inclusiones bifásicas (LV) con una relación promedio líquido-vapor (L/V) de 0.72, predominando la fase líquida (Figura 14B). De acuerdo a las fases observadas a temperatura ambiente (22 $^{\circ}\text{C}$) las inclusiones fluidas analizadas fueron clasificadas de acuerdo a Nash (1976) como inclusiones fluidas Tipo I. Siguiendo los criterios definidos por Nash & Theodore (1971) fueron clasificadas como inclusiones tipo B. Con base en la propuesta de Roedder (1984), las inclusiones fluidas fueron clasificadas como: primarias, secundarias y pseudosecundarias (Figura 14C, D).

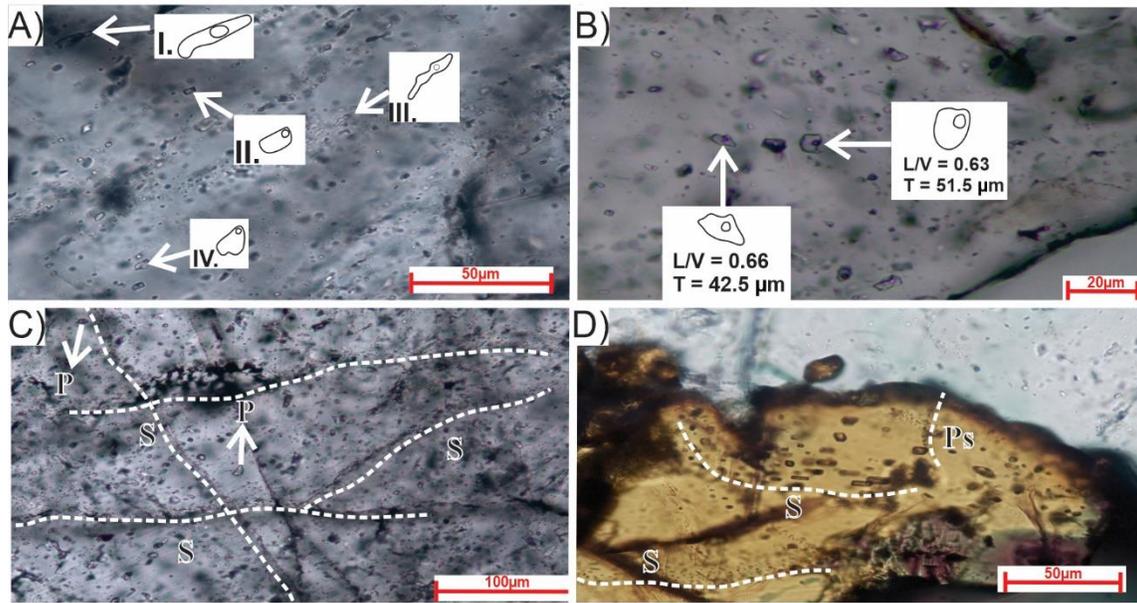


Figura 14. Características petrográficas de las inclusiones fluidas. **A)** Morfologías identificadas I. Tabular II. Regular III. Irregular IV. Ovoidal, se señalan además trenes intergranulares e intragranulares. **B)** Fotomicrografía de inclusiones indicando relación líquido-vapor (LV) y tamaño. **C-D)** Inclusiones fluidas primarias (P), secundarias (S) y pseudosecundarias (Ps) identificadas en cuarzo y esfalerita, siguiendo la clasificación planteada por Roedder (1984).

En este trabajo se identificaron cuatro tipos de inclusiones fluidas subdivididos en ocho clases (Tabla 1), con base en el mineral hospedante (i.e. Qz1, Qz2, Qz3, Cal1, Cal2 y Sp), su posición en la secuencia paragenética (Figura 13) y sus características petrográficas.

Tabla 1. Resumen de las propiedades de los tipos de inclusiones fluidas identificadas en las vetas analizadas.

Tipo	Composición sistema (Borisenko, 1977)	Fases	Formas	Relación (L/V)	Tipo de inclusión (Boedder, 1984)	Mineral Hospedante	Etapas mineralizante
Tipo Ia	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Ovoidales, irregular y regulares aisladas	0.60 a 0.90	Primaria	Qz1	E1
Tipo Ib	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Trenes irregulares, ovoidales y regulares	0.56 a 0.90	Secundaria	Qz1	E1
Tipo IIa	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Ovoidales, irregulares y regulares aisladas	0.57 a 0.78	Primaria	Qz2	E2
Tipo IIb	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Trenes irregulares, tabulares, regulares y ovoidales	0.53 a 0.90	Secundaria	Qz2	E2
Tipo IIc	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Ovoidales, tabulares y regulares aisladas	0.59 a 0.72	Primaria	Sp	E2
Tipo IId	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Irregulares y regulares aisladas	0.71 a 0.85	Primaria	Cal1	E2
Tipo III	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Irregulares, tabulares, regulares y ovoidales aisladas	0.53 a 0.90	Primaria	Qz3	E3
Tipo IV	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Ovoidales, irregulares y regulares aisladas	0.66 a 0.79	Secundaria	Cal2	E4

Tipo Ia, son inclusiones primarias, hospedadas en Qz1 y asociadas a la primera etapa de mineralización. Se presentan aisladas, con formas ovoidales, irregulares y regulares, son inclusiones bifásicas (LV) con una relación líquido-vapor (L/V) entre 0.60 y 0.90 evidenciando predominio de la fase líquida y tamaños que varían entre 18.16µm y 68.27µm.

Tipo Ib, son inclusiones secundarias, hospedadas en Qz1, caracterizadas por presentarse en trenes intergranulares, con formas ovoidales, regulares e irregulares, son inclusiones bifásicas (LV), con una relación líquido-vapor (L/V) entre 0.56 y 0.90 evidenciando predominio de la fase líquida y tamaños que varían entre 13.57µm y 109.38µm.

Tipo IIa, son inclusiones primarias, hospedadas en Qz2 y asociadas a la segunda etapa de mineralización. Se presentan aisladas con formas ovoidales, irregulares y regulares, son

inclusiones bifásicas (LV) con una relación líquido-vapor (L/V) entre 0.57 y 0.78 evidenciando predominio de la fase líquida y tamaños que varían entre 18.54 μm y 64.72 μm .

Tipo IIb, son inclusiones secundarias, hospedadas en Qz2, se presentan en forma de trenes intergranulares con formas irregulares, tabulares, regulares y ovoidales, son inclusiones bifásicas (LV) con una relación líquido-vapor (L/V) entre 0.53 y 0.90 evidenciando predominio de la fase líquida y tamaños que varían entre 11.86 μm y 54.11 μm .

Tipo IIc, son inclusiones primarias hospedadas en esfalerita y relacionadas directamente a la segunda etapa de mineralización. Se presentan aisladas con formas ovoidales, tabulares y regulares, son inclusiones bifásicas (LV), con una relación líquido-vapor (L/V) entre 0.59 y 0.72 evidenciando predominio de la fase líquida y tamaños que varían entre 16.54 μm y 63.87 μm .

Tipo IIId, son inclusiones primarias hospedadas en Cal1 y asociadas a la segunda etapa de mineralización. Se presentan aisladas con formas irregulares y regulares, son inclusiones bifásicas (LV) con una relación líquido-vapor (L/V) entre 0.71 y 0.85 evidenciando predominio de la fase líquida y tamaños que varían entre 14.89 μm y 27.77 μm .

Tipo III, son inclusiones primarias hospedadas en Qz3 y asociadas a la tercera etapa de mineralización. Se presentan aisladas con formas ovoidales e irregulares, son inclusiones bifásicas (LV) con una relación líquido-vapor (L/V) entre 0.61 y 0.69 evidenciando predominio de la fase líquida y con perímetros que varían entre 18.06 μm y 30.82 μm .

Tipo IV, son inclusiones secundarias hospedadas en Cal2 y relacionadas al cierre del sistema hidrotermal. Se presentan aisladas con formas ovoidales, irregulares y regulares, son inclusiones bifásicas (LV), con una relación líquido-vapor (L/V) entre 0.66 y 0.79 evidenciando predominio de la fase líquida y con tamaños que varían entre 15.85 μm y 26.66 μm .

11.2 MICROTERMOMETRÍA

El análisis microtermométrico realizado tuvo en cuenta los cuatro parámetros básicos propuestos por Barnes (1997):

- 1) La inclusión atrapa un fluido hidrotermal homogéneo antes de enfriarse, dentro de una inclusión fluida actual hay un conjunto de fases, pero fue solo un fluido en el momento del atrapamiento a temperaturas elevadas.
- 2) $m = K$; el sistema es cerrado, no hay pérdidas de fluido y la masa ha permanecido constante.
- 3) $v = K$; el volumen ha permanecido constante.
- 4) En ambientes sedimentarios y metamórficos el volumen o masa de inclusiones fluidas pueden haber variado, lo que inutiliza o complica su utilización para determinar condiciones físicas de atrapamiento en estos casos. Asimismo, en ocasiones se observa que inclusiones en minerales hidrotermales se han estrangulado después de su formación, lo cual también las inutiliza para determinaciones termométricas.

En total se analizaron 78 inclusiones fluidas, considerando el tipo de mineral hospedante, (29) están atrapadas en Qz1, (28) en Qz2, (4) Qz3, (3) en Cal1, (6) en Cal2 y (8) en Sp. Según la clasificación de Roedder (1984), se determinaron 38 primarias y 40 secundarias. Se realizaron mediciones microtermométricas para determinar el comportamiento y cambios de fase de las inclusiones fluidas al someterlas a enfriamiento y calentamiento partiendo de una temperatura ambiente promedio de 22°C. Las temperaturas que se registraron fueron, temperatura eutéctica ($^{\circ}T_e$), temperatura de fusión de fusión del último hielo ($^{\circ}T_{m-Ice}$) y temperatura de homogeneización ($^{\circ}T_h$).

Las mediciones registraron temperaturas eutécticas promedio de -22.74°C , una temperatura de fusión del último hielo entre -8.3°C y -0.1°C con -3.36°C como promedio, temperatura de homogeneización entre 103.8°C y 241.3°C , con un promedio de 171.3°C (Figura 15).

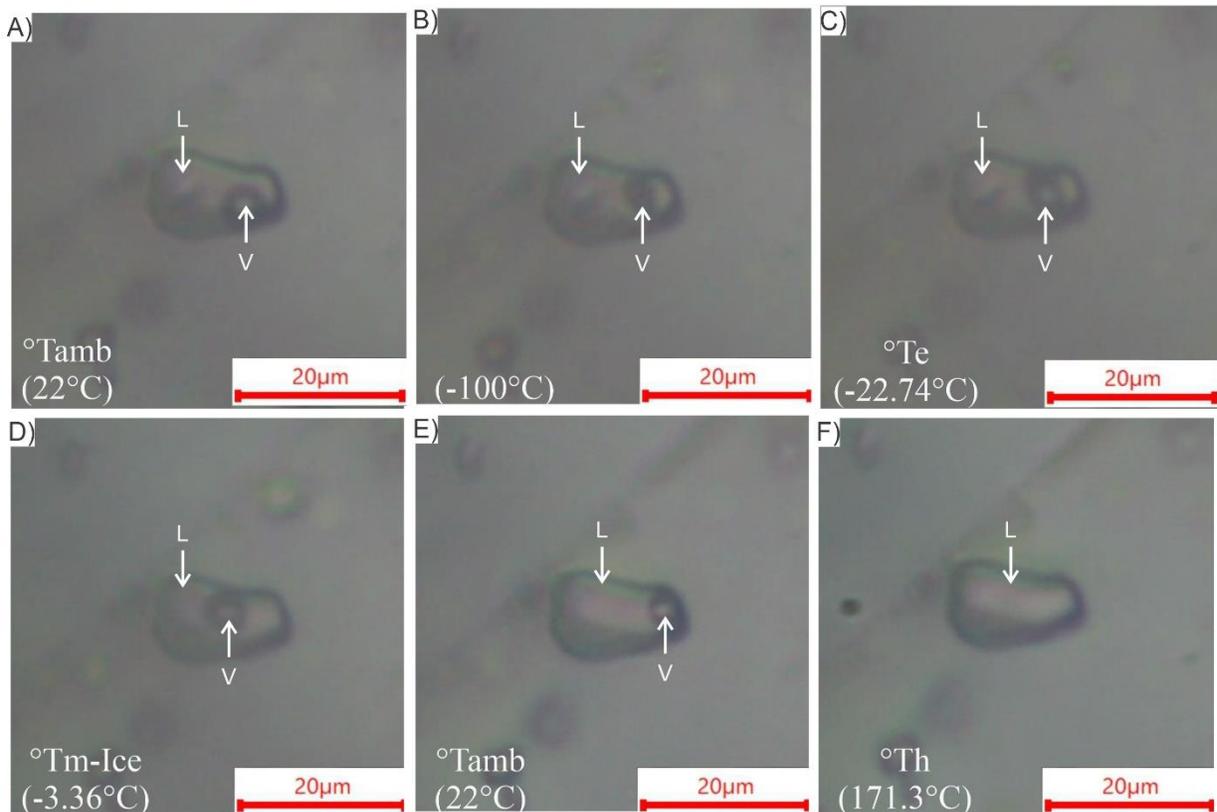


Figura 15. Secuencia de fotomicrografías tomadas durante el proceso de enfriamiento (A, B) y calentamiento (C, D, E y F) de inclusiones partiendo de temperatura ambiente. **A)** Relación líquido-vapor inicial, partiendo de temperatura ambiente se inicia el proceso de enfriamiento. **B)** Proceso de enfriamiento, inclusión en estado de congelamiento, burbuja comprimida. **C)** Proceso de calentamiento, registro de la temperatura de fusión del primer hielo (Temperatura eutéctica). **D)** Registro de la temperatura de fusión del último hielo. **E)** Paso por temperatura ambiente continuando con el proceso de calentamiento **F)** Registro de la temperatura de homogeneización, inclusión homogeniza a líquido.

Con base en las temperaturas eutécticas registradas y siguiendo la propuesta de Borisenko (1977) en Shepherd *et al.*, (1985) (Tabla 2), se identificó como sistema salino más aproximado $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ para todas las inclusiones fluidas analizadas.

Tabla 2. Temperaturas del punto eutéctico para diferentes sistemas salinos a 1 atm (Borisenko, 1977).

Sistema salino	Temperatura eutéctica (°C)	Fases sólidas
H ₂ O - NaCl - CaCl ₂	-55 (-52)	hielo + NaCl.2H ₂ O + CaCl ₂ .6H ₂ O
H ₂ O - MgCl ₂ - CaCl ₂	-52.2	hielo + MgCl ₂ .12H ₂ O + CaCl ₂ .6H ₂ O
H ₂ O - KCl - CaCl ₂	-50.5	hielo + CaCl ₂ .6H ₂ O
H ₂ O - CaCl ₂	-49.8	hielo + CaCl ₂ .6H ₂ O
H ₂ O - Na ₂ CO ₃ - K ₂ CO ₃	-37.0	hielo + (Na, K) ₂ CO ₃ .6H ₂ O + K ₂ CO ₃ .6H ₂ O
H ₂ O - NaCl - FeCl ₂	-37.0	hielo + NaCl.2H ₂ O + FeCl ₂ .6H ₂ O
H ₂ O - FeCl ₂	-35.0	hielo + FeCl ₂ .6H ₂ O
H ₂ O - NaCl - MgCl ₂	-35.0	hielo + NaCl.2H ₂ O + MgCl ₂ .12H ₂ O
H ₂ O - MgCl ₂	-33.6	hielo + MgCl ₂ .12H ₂ O
H ₂ O - NaCl - KCl	-23.5 (-22.9)	hielo + NaCl.2H ₂ O + KCl.nH ₂ O
H ₂ O - NaCl - NaSO ₄	-21.7	hielo + NaCl.2H ₂ O + Na ₂ SO ₄ .5H ₂ O
H ₂ O - NaHCO ₃	-21.8	hielo + NaCl.2H ₂ O + NaHCO ₃
H ₂ O - NaCl - Na ₂ CO ₃	-21.4	hielo + NaCl.2H ₂ O + Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O
H₂O - NaCl	-21.2 (-21.8)	hielo + NaCl.2H₂O
H ₂ O - KCl	-10.6	hielo + KCl.nH ₂ O
H ₂ O - NaHCO ₃ - Na ₂ CO ₃	-3.3	hielo + NaHCO ₃ + Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O
H ₂ O - NaHCO ₃	-2.3	hielo + NaHCO ₃
H ₂ O - Na ₂ CO ₃	-2.1	hielo + Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O
H ₂ O - NaSO ₄	-1.2	hielo + Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O

Considerando la composición del sistema salino y la temperatura de fusión del último hielo, se determinó la salinidad y la densidad del fluido mineralizante, utilizando el módulo Aqso 1 del paquete FLUIDS de Bakker (2003).

Para el cálculo de salinidad se utilizó la ecuación de Bodnar (1993):

[Salinidad (% wt) = $1.78 \times (T^{\circ}\text{ffh}) - 0.0442 \times (T^{\circ}\text{ffh})^2 + 0.000557 \times (T^{\circ}\text{ffh})^3$], donde $T^{\circ}\text{ffh}$ corresponde a la temperatura de fusión final del hielo ($^{\circ}\text{Tm-Ice}$). Los resultados registraron salinidades bajas con rangos entre 0.178% y 12.048% (wt % NaCl), con un promedio de 5.35% (wt % NaCl) y se determinó una densidad que oscila entre 1.007g/cc y 1.516g/cc, utilizando la ecuación de Oakes *et al.*, (1990). Las propiedades petrográficas y microtermométricas para los diferentes tipos de inclusiones identificados están resumidas en la tabla 3.

Tabla 3. Resumen de las propiedades petrográficas y de los datos microtermométricos de los tipos de inclusiones fluidas identificadas en las vetas analizadas.

Tipo	Sistema (Borisenko, 1977)	Fases	Formas	Relación (L/V)	Tipo de inclusión (Boedder, 1984)	Mineral Hospedante	# Inclusiones	Datos microtermométricos			Salinidad (Bodnar, 1993) (wt % NaCl)	Densidad (Oakes, 1980) (g/cc)
								Te (°C)	Tm- Ice (°C)	Th (°C)		
Tipo Ia	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Ovoidales, irregular y regulares aisladas	0.60 a 0.90	Primaria	Qz1	9	-29.8 a -18	-8.3 a -2	188.6 a 225	3.14 a 12.05	1.031 a 1.516
Tipo Ib	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Trenes irregulares, ovoidales y regulares	0.56 a 0.90	Secundaria	Qz1	20	-26.7 a - 17.2	-6.8 a - 0.3	111.8 a 164	0.53 a 10.23	1.01 a 1.09
Tipo IIa	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Ovoidales, irregulares y regulares aisladas	0.57 a 0.78	Primaria	Qz2	8	-28.8 a - 17.5	-6 a -3	159.2 a 200.4	4.96 a 9.2	1.04 a 1.08
Tipo IIb	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Trenes irregulares, tabulares, regulares y ovoidales	0.53 a 0.90	Secundaria	Qz2	20	-30.6 a -18	-7 a -1.3	142.1 a 241.3	2.24 a 10.5	1 a 1.15
Tipo IIc	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Ovoidales, tabulares y regulares aisladas	0.59 a 0.72	Primaria	Sp	8	-25.8 a - 15.2	-6.5 a -1	187.2 a 210	1.75 a 9.86	1.02 a 1.08
Tipo IIId	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Irregulares y regulares aisladas	0.71 a 0.85	Primaria	Cal1	3	-25 a -23.5	-1.8 a -1	181.6 a 185.7	1.74 a 3.06	1.02 a 1.03
Tipo III	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Irregulares, tabulares, regulares y ovoidales aisladas	0.53 a 0.90	Primaria	Qz3	4	-24.1 a - 18.4	-5.7 a - 0.5	157 a 204	0.88 a 8.8	1.012 a 1.073
Tipo IV	H ₂ O - NaCl	Bifásica	Ovoidales, irregulares y regulares aisladas	0.66 a 0.79	Secundaria	Cal2	6	-28.3 a - 27.3	-2.2 a - 0.1	103.8 a 140	0.18 a 3.71	1.01 a 1.03

Utilizando el concepto de FIA (Familia de inclusiones fluidas, por sus siglas en inglés *Fluid Inclusion Assemblage*) introducido por Goldstein *et al.*, (2003), donde se asocian inclusiones fluidas a una misma temporalidad, considerando los tipos de inclusiones fluidas identificadas y las etapas planteadas en la secuencia paragenética (Figura 13), se identificaron cuatro familias de inclusiones fluidas, cuyas propiedades microtermométricas están resumidas en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen de las propiedades petrográficas y de los datos microtermométricos de las familias de inclusiones fluidas identificadas en las vetas analizadas.

FIA	Composición sistema (Borisenko, 1977)	Fases	Relación (L/V)	Tipo de inclusión (Boedder, 1984)	Mineral Hospedante	Datos microtermométricos			Salinidad (Bodnar, 1993) (wt % NaCl)	Densidad (Oakes, 1980) (g/cc)
						Te (°C)	Tm-Ice (°C)	Th (°C)		
I	H ₂ O - NaCl	Bifásica	0.60 a 0.90	Primaria	Qz1	-29.8 a -18	-8.3 a -2	188.6 a 225	3.14 a 12.05	1.031 a 1.516
			0.57 a 0.78		Qz2	-28.8 a -17.5	-6 a -3	159.2 a 200.4	4.96 a 9.2	1.04 a 1.08
II	H ₂ O - NaCl	Bifásica	0.59 a 0.72	Primaria	Sp	-25.8 a -15.2	-6.5 a -1	187.2 a 210	1.75 a 9.86	1.02 a 1.08
			0.71 a 0.85		Cal1	-25 a -23.5	-1.8 a -1	181.6 a 185.7	1.74 a 3.06	1.02 a 1.03
III	H ₂ O - NaCl	Bifásica	0.53 a 0.90	Primaria	Qz3	-24.1 a -18.4	-5.7 a -0.5	157 a 204	0.88 a 8.8	1.012 a 1.073
IV	H ₂ O - NaCl	Bifásica	0.66 a 0.79	¿Primaria?	Cal2	-28.3 a -27.3	-2.2 a -0.1	103.8 a 140	0.18 a 3.71	1.01 a 1.03

La Tabla 5 muestra la relación entre las etapas de mineralización, el mineral hospedante y las familias de inclusiones fluidas.

Tabla 5. Relación entre las etapas de mineralización, el tipo de mineral hospedante y las familias de inclusiones fluidas.

Etapa mineralizante	Mineral hospedante	FIA
Etapa I (Qz1 + Py1 + Ccp1 + Po)	Qz1	FIA I
Etapa II (Qz2 + Py2 + Sp + Gn1 + Ccp2 + Au + Cal1)	Qz2 + Sp + Cal1	FIA II
Etapa III (Qz3 + Qz4 + Au - Gn2 + Mk)	Qz3	FIA III
Etapa IV (Cal2 + Py3)	Cal2	FIA IV

FIA I, corresponden a inclusiones primarias atrapadas en Qz1, identificadas como inclusiones tipo Ia. En total se registraron 9 inclusiones, las cuales presentaron una temperatura de homogeneización entre 188.6°C y 225°C, con un promedio de 203.5°C, una temperatura de fusión del último hielo entre -8.3°C y -2°C con -4.75°C como promedio. Las estimaciones de salinidad y densidad determinadas a partir de la fusión del último hielo oscilan entre 3.14% y 12.05% (% wt NaCl equiv), lo cual corresponde a salinidad baja a media, y una densidad entre 1.03g/cc a 1.516g/cc.

FIA II, corresponden a inclusiones primarias atrapadas en Qz2, Sp y Cal1, directamente relacionadas al principal evento mineralizante, e identificadas como inclusiones tipo IIa, IIc, IID.

Se analizaron 8 inclusiones en Qz2, las cuales presentaron una temperatura de homogeneización entre 159.2°C y 200.4°C, con un promedio de 165.6°C, una temperatura de fusión del último hielo entre -6°C y -3°C con -4.7°C como promedio. Las estimaciones de salinidad y densidad determinadas a partir de la fusión del último hielo oscilan entre 4.96% y 9.2%

(% wt NaCl equiv), lo cual corresponde a salinidad baja a media, y una densidad entre 1.04g/cc a 1.08g/cc.

Se registraron en total 8 inclusiones en Sp, registraron una temperatura de homogeneización entre 187.2°C y 210°C, con un promedio de 199.5°C, una temperatura de fusión del último hielo entre -6.5°C y -1°C con -3.4°C como promedio. Las estimaciones de salinidad y densidad determinadas a partir de la fusión del último hielo oscilan entre 1.75% y 9.86% (% wt NaCl equiv), lo cual corresponde a salinidad baja a media, y una densidad entre 1.02g/cc a 1.08g/cc.

Se registraron en total 3 inclusiones en Cal1, estas inclusiones registraron una temperatura de homogeneización entre 181.6°C y 185.7°C, con un promedio de 183.6°C, una temperatura de fusión del último hielo entre -1.8°C y -1°C con -1.4°C como promedio. Las estimaciones de salinidad y densidad determinadas a partir de la fusión del último hielo oscilan entre 1.74% y 3.06% (% wt NaCl equiv), lo cual corresponde a salinidad baja a media, y una densidad entre 1.02g/cc a 1.03g/cc.

FIA III, corresponden a inclusiones primarias atrapadas en Qz3, identificadas como inclusiones tipo III, en total se registraron 4 inclusiones. Estas presentan una temperatura de homogeneización entre 157°C y 204°C, con un promedio de 180.5°C, una temperatura de fusión del último hielo entre -5.7°C y -0.5°C con -3.3°C como promedio. Las estimaciones de salinidad y densidad determinadas a partir de la fusión del último hielo oscilan entre 0.88% y 8.8% (% wt NaCl equiv), lo cual corresponde a salinidad baja a media, y una densidad entre 1.012g/cc a 1.073g/cc.

FIA IV, corresponden a inclusiones atrapadas en Cal2, identificadas como inclusiones tipo IV, se registraron en total 6 inclusiones. Estas inclusiones registraron una temperatura de

homogeneización entre 103.8°C y 140°C, con un promedio de 128.6°C, una temperatura de fusión del último hielo entre -2.2°C y -0.1°C con -0.825°C como promedio. Las estimaciones de salinidad y densidad determinadas a partir de la fusión del último hielo oscilan entre 0.18% y 3.71% (% wt NaCl equiv), lo cual corresponde a salinidad baja a media, y una densidad entre 1.01g/cc a 1.03g/cc.

La Figura 16 ilustra la relación entre las temperaturas registradas y su frecuencia.

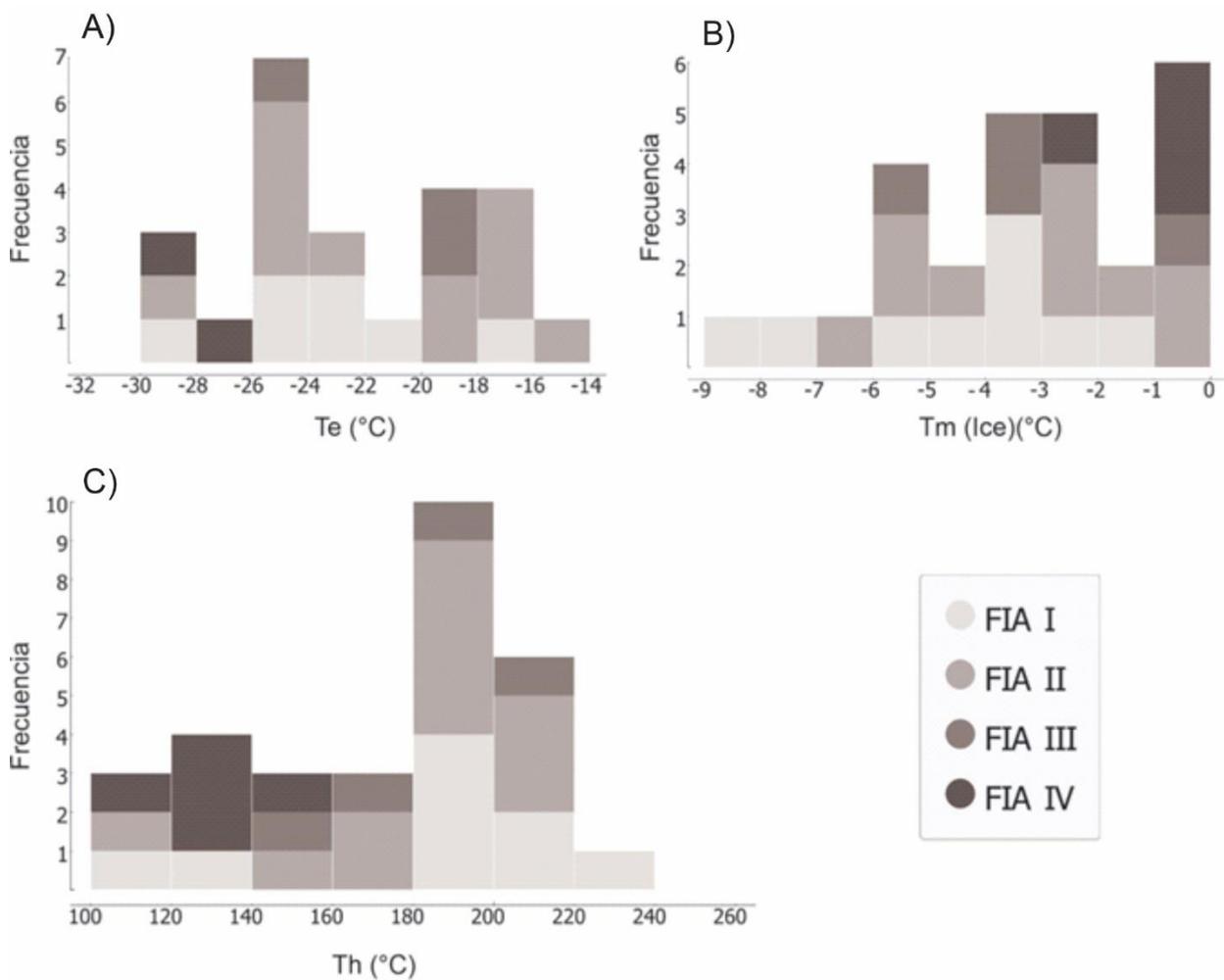


Figura 16. Histograma de frecuencias de las propiedades microtermométricas para las familias de inclusiones fluidas. **a)** Temperatura eutéctica (°Te). **b)** Temperatura de fusión del último hielo (°Tm-Ice). **c)** Temperatura de homogeneización (°Th).

12. GEOQUÍMICA MULTIELEMENTAL

Se procesaron 396 muestras correspondientes a la mineralización en los diferentes sectores del proyecto Estrella-Diamantina, para realizar un análisis multielemental de 32 elementos. Estas muestras fueron distribuidas de la siguiente manera: 11 muestras para Estrella, 13 muestras para Alacrán, 148 muestras para El Limón, 48 muestras para Delirios y 179 muestras para Diamantina. Las mineralizaciones de este corredor se caracterizan por presentar las asociaciones Au-Ag, Au-Pb, Au-Zn, Au±Cu (Tabla 5), asociaciones que se ven reflejadas en la mineralogía observada en las diferentes etapas mineralizantes identificadas.

Las concentraciones de Pb, Zn, Cu y As son elevadas (>100 ppm) presentando valores promedio de 887.4ppm, 1080ppm, 104.7ppm y 310ppm respectivamente y se ven representadas por la presencia de minerales como galena, esfalerita, calcopirita y arsenopirita. Las concentraciones promedio en Te, Hg y Sb son bajas presentando valores promedio de 0.08487ppm, 0.11386ppm y 4.8557ppm respectivamente, descartando la presencia de telururos, cinabrio y estibina en la mineralización.

Como se evidencia en los gráficos bimodales (Figura 17) la asociación Au-Ag presenta una tendencia homogénea a lo largo del proyecto a excepción del sector de Estrella, donde la correlación entre estos dos elementos es menor. La asociación Au-As presenta una tendencia homogénea a lo largo del proyecto a excepción del sector de Delirios, donde la correlación entre estos dos elementos es mayor.

La asociación Au-Cu presenta dos tendencias, para los sectores al Sur del proyecto (Alacrán y Diamantina) presenta mayor afinidad que para los sectores ubicados al Norte (Estrella,

El Limón y Delirios). Las asociaciones Au-Pb y Au-Zn presentan tendencias homogéneas en cada uno de los sectores. Los resultados del análisis multielemental permitieron complementar y confirmar la información obtenida en el estudio metalográfico.

Tabla 5. Matriz de correlaciones

	<i>Au</i>	<i>Ag</i>	<i>As</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>
<i>Au</i>	1					
<i>Ag</i>	0.68	1				
<i>As</i>	0.14	0.26	1			
<i>Cu</i>	0.29	0.32	0.06	1		
<i>Pb</i>	0.53	0.72	0.26	0.12	1	
<i>Zn</i>	0.58	0.69	0.10	0.27	0.70	1

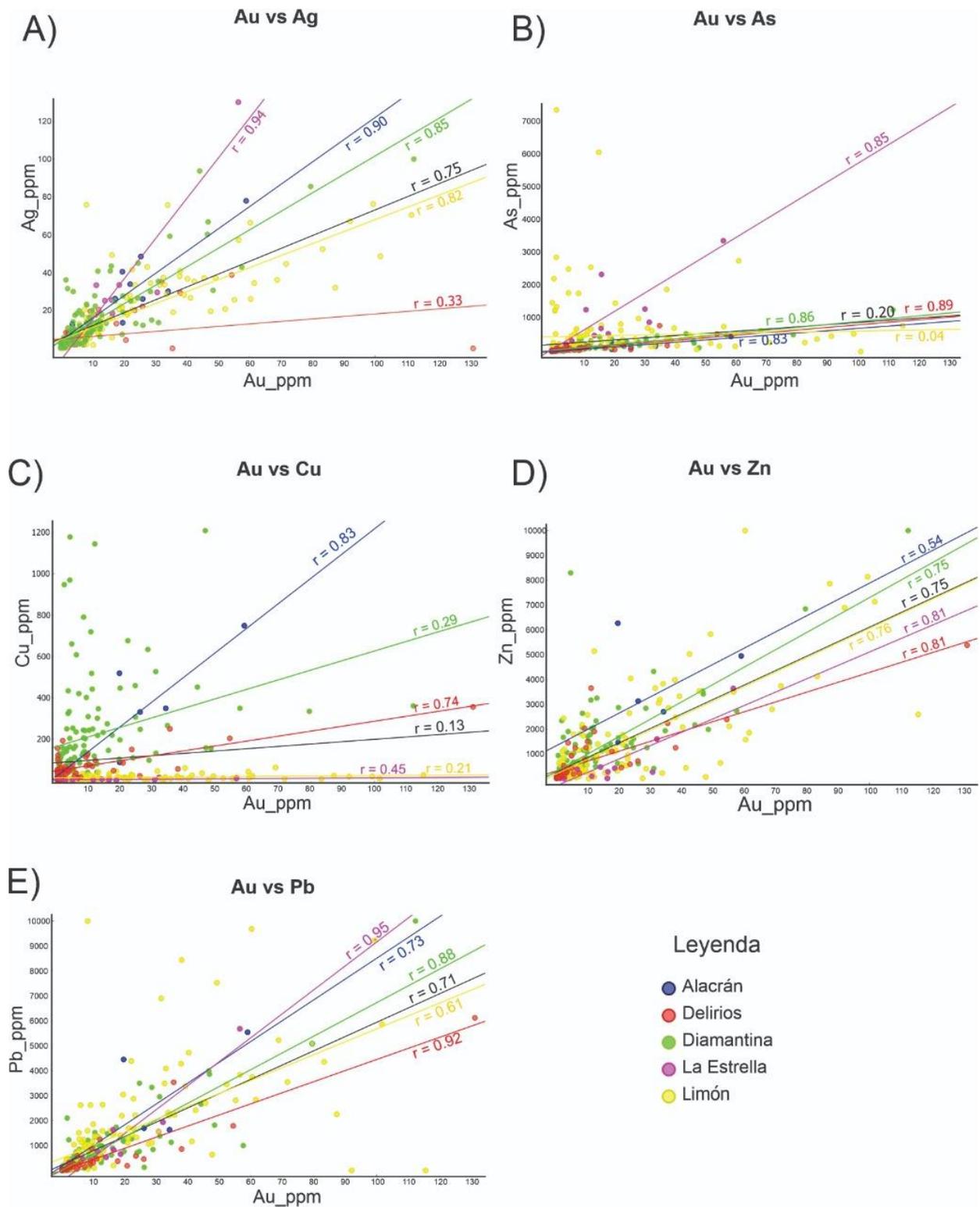


Figura 17. Diagramas Bimodales para las principales asociaciones del proyecto Estrella-Diamantina. **a)** Asociación Au-Ag. **b)** Asociación Au-Pb. **c)** Asociación Au-Zn. **d)** Asociación Au-Cu. **e)** Asociación Au-As. Los coeficientes de correlación fueron calculados con el valor logarítmico de la concentración de cada elemento.

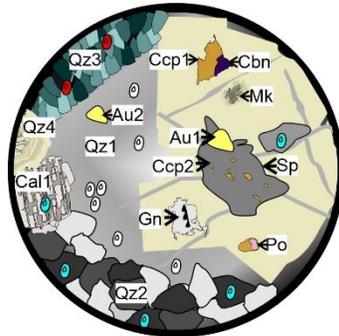
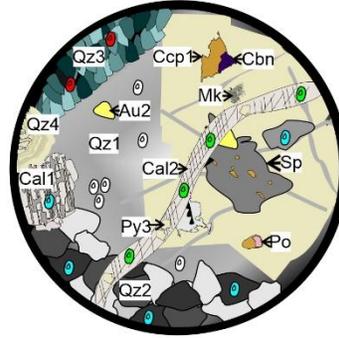
13. DISCUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos en los estudios petrográficos, el tipo de roca encajante, el ensamble de minerales metalográficos, la alteración hidrotermal, las texturas en cuarzo, calcita y sulfuros, la secuencia paragenética, las propiedades microtermométricas de las inclusiones fluidas y las asociaciones químicas, se planteó la evolución del fluido mineralizante, el transporte y depositación del oro, un modelo genético y las implicaciones regionales de las vetas analizadas en el proyecto de exploración Estrella-Diamantina.

13.1 EVOLUCIÓN DEL FLUIDO HIDROTHERMAL

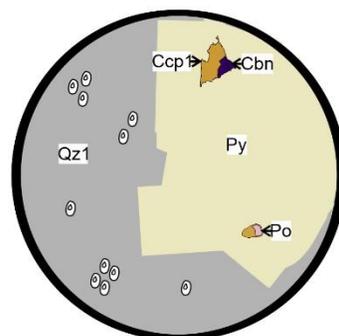
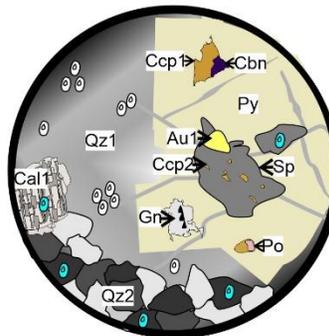
De acuerdo con la secuencia paragenética, los minerales de alteración, la geoquímica multielemental y los resultados microtermométricos se identificaron cuatro etapas en la evolución del fluido mineralizante (Figura 18). La etapa I corresponde a un evento pre-mineralización aurífera con cristalización de Qz1, acompañado de un ensamble de Py1, Ccp1, Po y Cbn. Las inclusiones medidas en Qz1 (FIA I) reportan valores de $^{\circ}\text{Th}$ que oscilan entre 188.6°C y 225°C y salinidades entre 3.14% y 12.05% (% wt NaCl equiv). La etapa I fue un evento rico en sílice y el equilibrio pirita/pirrotina y cubanita/calcopirita/esfalerita, sugieren condiciones de pH ligeramente ácido y un ambiente oxidado con temperaturas menores a 325°C (Marshall *et al.*, 2004; Ramdohr, 2013).

ETAPA IV
FIA IV ●
 (103.8 - 140)°C
 (0.18 - 3.71) %wt NaCl equiv



ETAPA III
FIA III ●
 (157 - 204)°C
 (3.14 - 12.05) %wt NaCl equiv

ETAPA II
FIA II ●
 (187.2 - 210)°C
 (1.75 - 9.86) %wt NaCl equiv



ETAPA I
FIA I ●
 (188.6 - 225)°C
 (3.14 - 12.05) %wt NaCl equiv

Figura 18. Representación esquemática de las etapas mineralizante y su relación con las familias de inclusiones fluidas. **A)** Ensamble mineralógico observado en la cuarta etapa mineralizante con sus condiciones de salinidad y temperatura de homogenización. **B)** Ensamble mineralógico observado en la tercera etapa mineralizante con sus condiciones de salinidad y temperatura de homogenización. **C)** Ensamble mineralógico observado en la segunda etapa mineralizante con sus condiciones de salinidad y temperatura de homogenización. **D)** Ensamble mineralógico observado en la primera etapa mineralizante con sus condiciones de salinidad y temperatura de homogenización.

La segunda y principal etapa mineralizante está caracterizada por la recristalización de Qz2 a partir de Qz1, formación de Cal1 con maclas gruesas tipo 2 descritas por Ferrill *et al.*, (2004) que según este autor se asocian a temperaturas entre 200°C y 250°C. En esta etapa el ascenso de fluido hidrotermal permitió la cristalización de sulfuros de metales base como Py2, Sp, Gn1, Ccp2 y la depositación de Au1. Los valores reportados en inclusiones de Qz2, Sp y Cal1 (FIA II) presentan valores de °Th entre 159.2°C y 210°C y salinidades de 1.74% y 9.86% (% wt NaCl equiv). La presencia de calcita, clorita y sericita muestra condiciones de pH neutro a ligeramente alcalino y un ambiente reducido para el fluido mineralizante (Camprubí & Albinson, 2006).

La tercera etapa mineralizante está definida por la cristalización de Qz3 y Qz4. La presencia de cuarzo colofome y calcedonia Qz4 sugiere un ambiente epitermal para esta etapa mineralizante (Dowling & Morrison, 1989). La mineralización en esta etapa está caracterizada por un bajo volumen de sulfuros como Gn2, Mk y Au2. Las inclusiones en Qz3 (FIA III) presenta valores de °Th que oscilan entre 157°C y 204°C y salinidades de 0.88% y 8.8% (% wt NaCl equiv). El cierre del sistema está definido por la cuarta etapa mineralizante por venillas de Cal2 que cortan las secuencias anteriores y transportan cristales de Py3. Estas venillas presentan maclas delgadas tipo 1 descritas por Ferrill *et al.*, (2004) correspondientes a temperaturas < 170°C. y las inclusiones fluidas en Cal2 (FIA IV) presentan valores de °Th entre 103°C y 140 °C y salinidades de 0.18% y 3.71% (% wt NaCl equiv). Para esta etapa el fluido hidrotermal presenta condiciones de pH neutro a ligeramente alcalino y un ambiente reducido (Camprubí & Albinson, 2006).

Los datos microtermométricos permitieron identificar H₂O-NaCl de baja salinidad como el sistema predominante en las inclusiones fluidas analizadas en todas las etapas mineralizantes (Tabla 3). La relación entre la temperatura de homogeneización (°Th) y la salinidad se observa en la Figura 19. Esta figura presenta valores de °Th que oscilan entre 103.8°C y 225°C y salinidades

bajas, menores a 12.05% (% wt NaCl equiv). Estas variaciones en la temperatura de homogeneización y en la salinidad para cada etapa mineralizante y la presencia de texturas coloformes en la última etapa mineralizante, permiten sugerir que la evolución del fluido hidrotermal es resultado de una evolución progresiva del fluido a condiciones más someras y refleja la dilución del fluido al mezclarse con un fluido superficial, posiblemente aguas meteóricas.

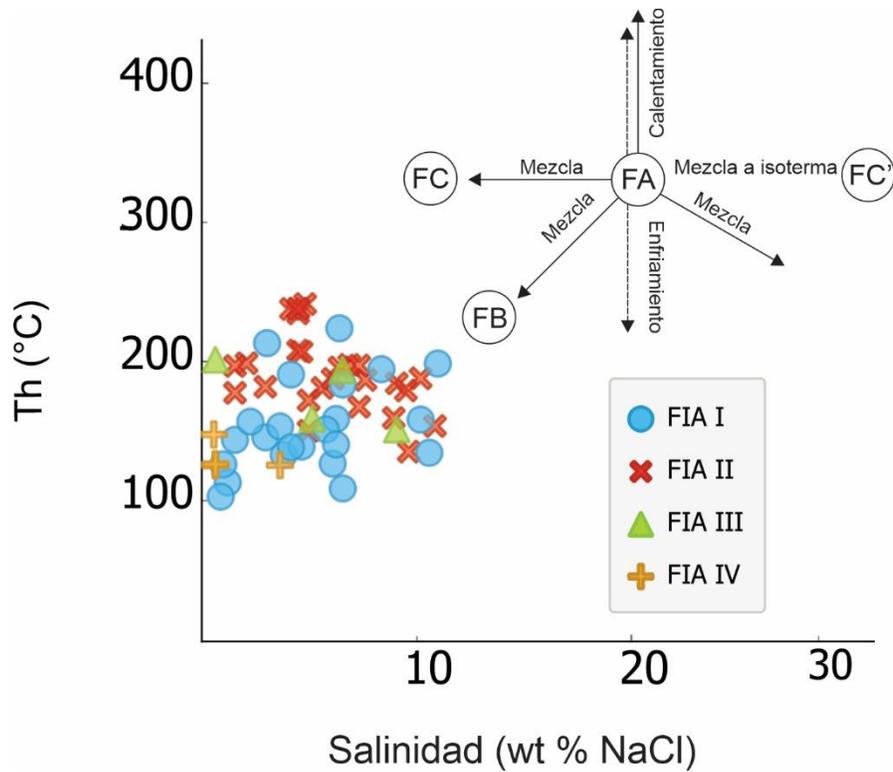


Figura 19. Relación entre la temperatura de homogeneización ($^{\circ}\text{Th}$) con la salinidad (Velasco, 2004).

13.2 TRANSPORTE Y DEPOSITACIÓN DEL ORO

Las inclusiones fluidas, el ensamble mineralógico observado y la alteración hidrotermal son una evidencia directa de las condiciones de temperatura, pH y redox del fluido mineralizante (Camprubí & Albinson, 2006). La presencia de la asociación pirita-pirrotina en la etapa pre-mineralizante, sugiere unas condiciones oxidantes y pH ligeramente ácido. La coexistencia de pirita-clorita y la alteración fílica dominante indican unas condiciones relativamente reducidas. Adicionalmente, la presencia de calcita-sericita indican unas condiciones neutrales ligeramente alcalinas. Por otra parte, las inclusiones fluidas analizadas presentan baja salinidad en un sistema H₂O-NaCl que, bajo las condiciones de pH neutral anteriormente mencionadas, sugieren que las especies ligantes son sulfuradas como H₂S o HS⁻ y permiten suponer los iones complejo Au (HS)²⁻ o Au (HS) como el medio más factible para transportar el oro; un mecanismo de transporte común en los depósitos de oro orogénico (Shenberger & Barnes, 1989; Benning & Seward, 1996; Mortiz, 2000; Ridley & Diamond, 2000; Groves *et al.*, 2003; Goldfarb *et al.*, 2005; Phillips & Powell, 2010; Seward *et al.*, 2014; Saunders *et al.*, 2014).

La presencia de calcita sugiere un fluido con CO₂. La remoción del CO₂ del fluido mineralizante por disociación para formar carbonatos elevaría el pH de la solución y la actividad del ion CO₃ favorecería la precipitación de calcita (Rimstidt, 1997). Adicionalmente, la remoción de CO₂ del fluido decrecería la temperatura del sistema y la actividad del complejo bisulfurado (Drummond & Ohmoto, 1985; Ridley & Diamond, 2000; Seward *et al.*, 2014) Al mismo tiempo, la disminución del S decrece debido a la volatización del H₂S y la precipitación de sulfuros. Esta condición es un mecanismo efectivo para alcanzar la supersaturación de oro en el sistema, desestabilizando el complejo Au (HS)²⁻ o Au (HS), alcanzado de este modo la depositación del oro (Shenberger & Barnes, 1989; Rimstidt, 1997; Benning & Seward, 1996; Saunders *et al.*, 2014).

13.3 MODELO GENÉTICO PARA LAS VETAS

Antes de los años 90's, había una amplia variedad de términos para clasificar depósitos hidrotermales de solo oro en terrenos metamórficos (Phillips & Powell, 2010), de acuerdo a términos geográficos: (i) *mother-lode* (ej. Bendigo), términos con base en la roca caja: (ii) *greenstone* y términos con base en la profundidad y temperatura relativa de formación: (iii) *mesothermal*. El término mesothermal en depósitos de oro es un término ampliamente usado y distintivo que tipifica características en espacio (Groves *et al.*, 1998). La característica más consistente de estos depósitos es la asociación a terrenos metamórficos deformados de diferentes edades (Groves *et al.*, 1998). El control estructural de estos depósitos es marcado y ampliamente documentado (Groves *et al.*, 1998; Goldfarb *et al.*, 2005; Hart & Goldfarb, 2005; Mortiz, 2000; Goldfarb & Groves, 2015). Las estructuras hospedantes de estos depósitos de oro (zonas de cizalla, estructuras extensionales, brechas, entre otras) son típicamente discordantes (Moritz, 2000). Las estructuras mineralizadas por lo general se encuentran en zonas de deformación frágil-dúctil y al interior de estructuras de 2-3 orden en terreno acrecionados (Mortiz, 2000; Groves *et al.*, 2003 y Goldfarb & Groves, 2015).

Considerando las asociaciones mineralógicas y geoquímicas, los minerales observados en el análisis metalográfico, el tipo de alteración hidrotermal y las propiedades microtermométricas medidas, se pretende plantear un ambiente metalogénico para las manifestaciones vetiformes a lo largo del proyecto Estrella-Diamantina, teniendo en cuenta el contexto geológico y tectónico del DMRSZ (Tabla 6).

Los depósitos metalíferos de la Cordillera Central de Colombia, están asociados a un modelo metalogénico de subducción clásica, controlado por características tectono-magmáticas (Shaw *et al.*, 2018). El proyecto Estrella-Diamantina, se encuentra ubicado en un límite de terrenos

acrecionados (Rodríguez & Pernet, 1983; Cediél *et al.*, 2003; Moreno-Sánchez *et al.*, 2020; Restrepo & Toussaint, 2020), en una zona de cizalla con deformación frágil-dúctil, que controla la mineralización. Para el área de estudio diversos autores mencionan que las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca que hospedan la mineralización, se presentan fisuradas y cizalladas por fallas satélites del sistema de fallas Otú-Pericos, cortando la dirección principal de foliación de la roca encajante y actuando como conductos mineralizantes (Hall *et al.*, 1970; Feininger *et al.*, 1972; López, 2004; Londoño *et al.*, 2009). De acuerdo con Ayala & Montoya (2004) la mineralización en el sector El Limón aprovechó los espacios vacíos generados por las fallas, formando así “*filones de fisura*”. Según lo observado en este estudio y los reportes de otros autores en el DMRSZ, el contacto entre las vetas y la roca caja es neto y se encuentra asociado a una alteración predominantemente sericítica al interior de las vetas (López, 2004; Ayala & Montoya, 2004; Castaño-Dávila, 2017; Serna-Peña, 2020). La relación de corte entre la roca encajante y las vetas indica que la formación de la roca y sus principales eventos deformativos fueron anteriores a la depositación de los fluidos mineralizantes. Los resultados microtermométricos obtenidos a partir de inclusiones fluidas de las diferentes etapas mineralizantes identificadas, sugieren un ambiente de depositación asociado a depósitos orogénicos y/o epitermales (Figura 20)

Las características geológicas, estructurales, los resultados microtermométricos, las texturas de cuarzo y mena identificadas, la ausencia de adularia y estibina en la mineralización, la no identificación de zonas de ebullición en el análisis de inclusiones fluidas y el estilo de mineralización (vetas controladas estructuralmente, emplazadas en estructuras de 2-3 orden, en regímenes frágil-dúctil) del tren mineralizado Estrella-Diamantina permite proponer un modelo de Oro Orogénico para estas mineralizaciones de Au-Ag, en el sentido de Groves *et al.*, (1998), Mortiz, (2000), Goldfarb *et al.*, (2005); Hart & Goldfarb, (2005), y Goldfarb & Groves, (2015).

Aunque autores como Castaño-Dávila, (2017) y Serna-Peña, (2020) proponen modelos relacionados a intrusivos (*Intrusion-related*) para las mineralizaciones vetiformes de La Aurora, al Sur de este estudio, las características geológico-estructurales y el estilo de mineralización permiten descartar por el momento este modelo.

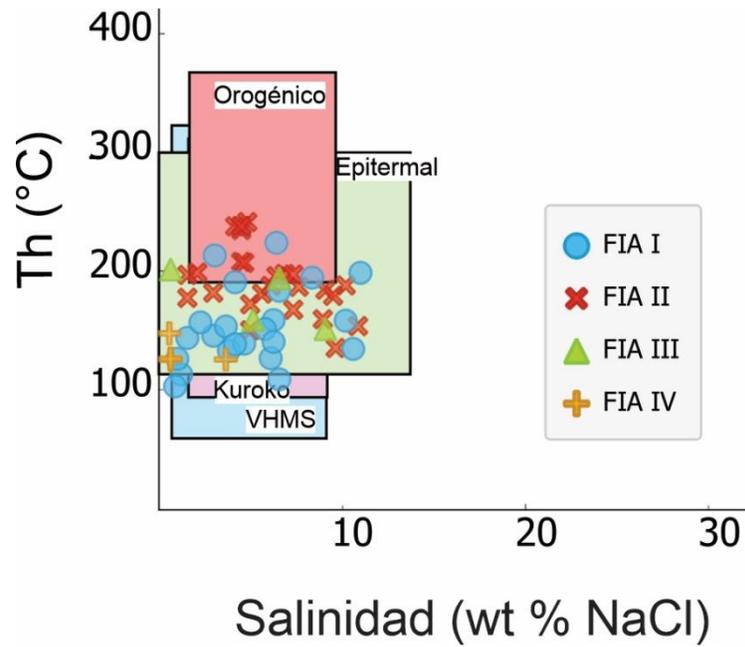


Figura 20. Relación entre la temperatura de homogeneización (Th) con la salinidad (Wilkinson, 2001).

Tabla 6. Principales características de los depósitos, epitermal, orogénico y asociado a intrusiones (Intrusion Related Gold Deposits).

	Depósitos de oro orogénico (Groves <i>et al.</i> , 2003; Goldfarb <i>et al.</i> , 2005)	Depósitos relacionados a intrusiones (Sillitoe & Thompson, 1998; Groves <i>et al.</i> , 2003)	Depósitos epitermales (Camprubí & Albinson, 2006; John <i>et al.</i> , 2018)
Configuración tectónica y estructural	Márgenes convergentes, zonas de subducción, acreción y colisión de terrenos metamórficos. Formados sincrónicamente durante las últimas etapas de la orogenia. Fuerte control estructural (Fallas, zonas de cizalla, pliegues). Régimen frágil-dúctil de alta deformación.	Dentro de límites tectónicos de placas convergentes, en márgenes de cratón de arco posterior. Terrenos pericratónicos. Régimen relativamente frágil.	Contextos extensionales, transpresionales, transtensionales y compresionales. En condiciones extensionales y zonas de fracturas dilataciones
Tipo de roca encajante y su relación con la mineralización	Principalmente rocas volcánicas o intrusivas máficas. Mineralización postardía.	Intrusiones granitoides, rocas sedimentarias. La mineralización presenta una relación espacial, temporal y genética con cuerpos intrusivos.	Rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Se encuentran normalmente hospedados en rocas volcánicas e hipoabisales.
Asociaciones químicas	Au-Ag±As±B±Bi±Sb±Te±W	Au-Ag±As±B±Bi±Sb±Sn±Te±W (Pb-Zn distal)	Au-Ag±As±Pb±Zn±Hg±Se±Te
Alteración hidrotermal	Mica- Carbonatos-Sulfuro de hierro	Mica-feldespatos potásico-carbonato-clorita-sulfuro de hierro	Zeolítica, propilítica, argílica avanzada, argílica intermedia, potásica y silicificación.
Condiciones de presión, temperatura y composición del fluido mineralizante	Fluidos de baja salinidad, casi neutros, H ₂ O-CO ₂ ±CH ₄ ±-N ₂ . Ricos en CO ₂ 220°C-600°C	Fluidos de salinidad variable H ₂ O-CO ₂ y en menor cantidad CH ₄ ±-N ₂ 200°C-400°C	Fluidos de salinidad variable con %wt NaCl de 0% a 23%, 100°C-300°C

13.4 IMPLICACIONES REGIONALES

El proyecto Estrella-Diamantina se encuentra localizado en el sector Norte de la Provincia Metalogénica Andina Central (PMAC) (Sepúlveda, 2020), zona que se destaca por ser la mayor productora de oro en Colombia, agrupando depósitos de Au-Ag tipo Intrusión Related (IRGD), orogénico y epitermal con operaciones mineras de pequeña a gran escala (Sepúlveda, 2020).

El sistema de fallas Otú-Pericos es considerado como un límite de terrenos tectónicos (Rodríguez & Pernet, 1983; Cediél *et al.*, 2003; Moreno-Sánchez *et al.*, 2020; Restrepo & Toussaint, 2020), con un fuerte control estructural sobre las manifestaciones vetiformes en los depósitos del sector (Álvarez *et al.*, 2007; Londoño *et al.*, 2009; Leal-Mejía, 2011; Mendoza & Giraldo, 2012; Naranjo-Sierra *et al.*, 2016; Naranjo-Sierra & Alvarán-Echeverri, 2018; Shaw *et al.*, 2018; Naranjo-Sierra, 2019; Naranjo-Sierra & Alvarán-Echeverri, 2020). Comparando las características identificadas en este estudio con proyectos cercanos de Au-Ag se plantea una comparación regional con los depósitos al Este del del sistema de fallas Otú-Pericos: (i) El Bagre (Naranjo-Sierra *et al.*, 2016; Naranjo-Sierra & Alvarán-Echeverri, 2018; Naranjo-Sierra, 2019 y Naranjo-Sierra & Alvarán-Echeverri, 2020) y (ii) Nechí (Osorio, Andrés & Loaiza Quiceno, 2021) y al Occidente de la zona de falla: (iii) este estudio (Estrella-Diamantina) y (iv) Machuca (Castaño-Dávila, 2017; Castaño-Dávila *et al.*, 2019; Serna-Peña, 2020) (Figura 21 y Tabla 7).

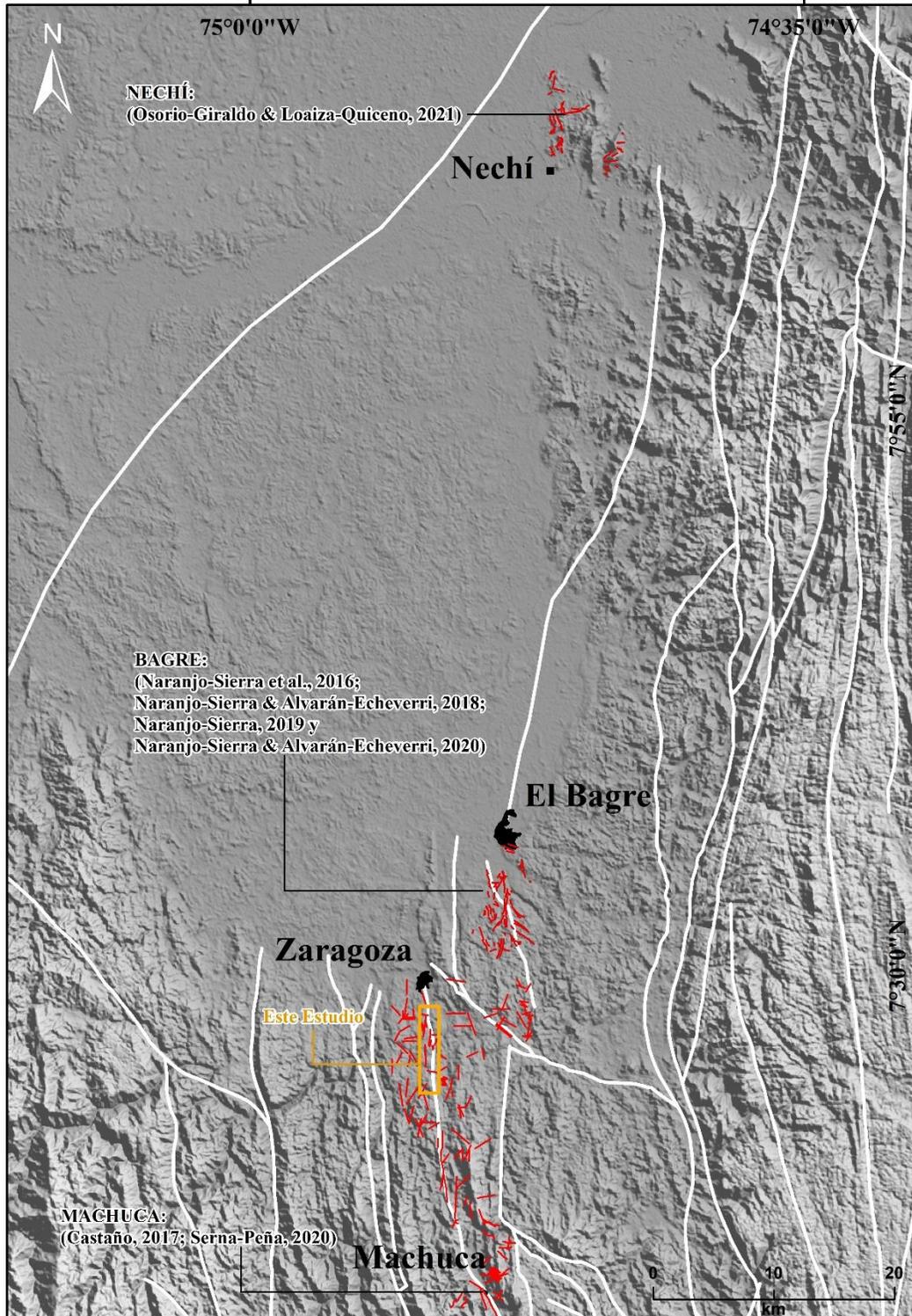


Figura 21. Mapa localización de los proyectos de Au-Ag aledaños.

Tabla 7. Características depósitos aledaños

Depósito	Ubicación	Asociaciones químicas	Etapas mineralizantes	Propiedades microtermométricas		Modelo genético propuesto
				Th (°C)	Salinidades (% wt NaCl) y Sistema salino	
Proyecto Estrella-Diamantina (Este estudio)	Zaragoza DMRSZ Parte Norte (Rodríguez & Pernet, 1983)	Au-Ag, Au-Pb, Au-Zn, Au-Cu	3 etapas Fase I: Qz+Py+Ccp+Po±Cbn+Ser Fase II: Qz+Cal+Py+Ccp+Po+Gn+Sp+Au+Ser±Chl Fase III: Qz+Cal+Py+Gn+Au±Mk+Ser	103.8°C – 225°C	0.18 - 8.8 H ₂ O-NaCl	Oro orogénico en dominiomesozonal, con un aporte epitermal tardío
Mina Santa Elena-Santa María (Osorio-Giraldo & Loaiza-Quiceno, 2021)	Nechí DMBCN (Rodríguez & Pernet 1983)	Au-Ag, Au-Pb, Au-Te, Au-Cu, Te-(Se-Bi), Te-(Au-Ag), Te-Pb	3 etapas Fase I: Qz+Py Fase II Py+Gn+Ccp+Te (Au-Ag)+Te (Pb)+Qz+Au Fase III: Py+Gn+Sp+Te (Pb)+Qz	-----	-----	Oro orogénico
Mina La Ye (Naranjo-Sierra <i>et al.</i> , 2016; Naranjo-Sierra & Alvarán-Echeverri, 2018; Naranjo-Sierra, 2019 y Naranjo-Sierra & Alvarán-Echeverri, 2020)	El Bagre DMBCN (Rodríguez & Pernet 1983)	Ag, Au-Te-Bi, Bi-Te; Pb-Te, Hg-Te y Au-Hg	2 etapas Fase I: Qz+Py±Au Fase II: Qz+Py+Ccp+Gn+Teluros de Au-Ag, Pb, Au y Hg	103.3°C - 297.1°C	1.5 - 11.09 H ₂ O-NaCl H ₂ O-NaCl-CO ₂ ±CH ₄	Oro orogénico
Mina La Aurora (Castaño, 2017; Serna-Peña, 2020)	Machuca DMRSZ Parte Norte (Rodríguez & Pernet 1983)	Au-Ag, Au-Pb, Au-Zn, Au-Cd; Ag-Bi, Ag-Pb	3 etapas Fase I: Qz+Py+Ccp+Po Fase II: Qz+Chl+Ser+Cal+Py+Ccp+Gn+Au+Sp+Ant Fase III: Qz+Ser+Cal+Py+Ccp+Gn+Au+Rt+Sp+Gth+Mrc.	170.3°C - 225.8°C	4.34 – 20 H ₂ O-MgCl ₂ ,	Epitermal de baja sulfuración asociado a metales base

Se observa que los depósitos que se encuentran al lado Este del sistema de fallas (i.e. El Bagre y Segovia) presentan características diferentes a las manifestaciones presentes al Oeste (i.e. proyecto Estrella-Diamantina y La Aurora). Para El Bagre, Naranjo-Sierra *et al.*, (2016); Naranjo-Sierra & Alvarán-Echeverri (2018); Naranjo-Sierra (2019); Naranjo-Sierra & Alvarán-Echeverri (2020), reportan la asociación Au-Te-Bi, la presencia de CO₂ medible en las inclusiones fluidas, mayores temperaturas de homogeneización (130.3°C y 297.1°C) y edades Permo-Triásicas (Leal-Mejía, 2011 y Naranjo-Sierra, 2019) para la mineralización. Similarmente, Osorio-Giraldo & Loaiza-Quiceno (2021) reportan la asociación Au-Te-Bi para las mineralizaciones de Santa Elena y Santa María, en el sector de Nechí. Aunque, proponen una edad post-Triásica para estas mineralizaciones con base en relaciones de corte. Aunque no es claro un posible vínculo genético entre las mineralizaciones de El Bagre y Nechí, es evidente que comparten una misma huella química Au-Te-Bi (Figura 22).

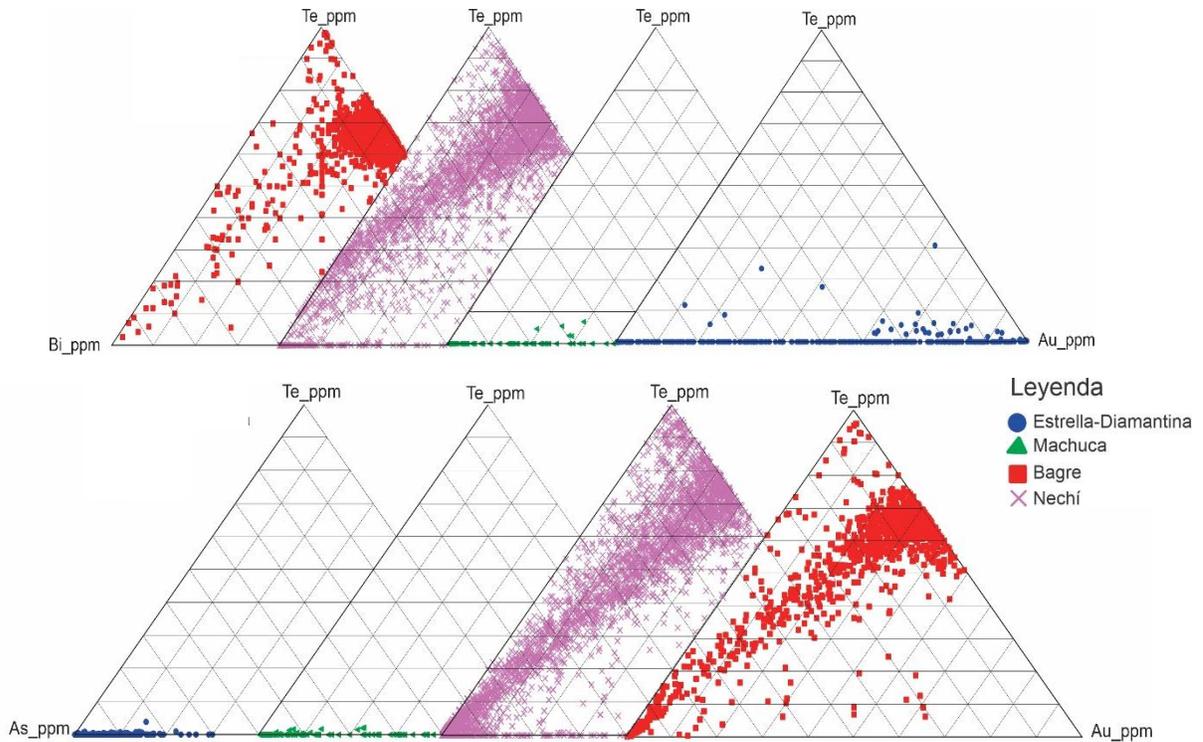


Figura 22. Diagramas ternarios Au-Bi-Te, Au-As-Zn y Au-As-Te dónde se observan los trenes mineralizantes diferentes del Cinturón aurífero del Cauca medio.

Existen también, similitudes químicas entre las mineralizaciones de Machuca con las mineralizaciones de este estudio (al norte de Machuca). Ambos sectores comparten la asociación Au-Zn-Pb. Adicionalmente, los datos microtermométricos reportados por Castaño-Dávila (2017) y Castaño-Dávila *et al.*, (2019) para el sector de Machuca (Th, Salinidad) son similares a los obtenidos en este estudio. También es notoria la similitud de las etapas mineralizantes para ambos sectores y la presencia de altos contenidos de As en las mineralizaciones (marcasita y arsenopirita).

Si bien los proyectos del DMRSZ comparten similitudes en las características geológicas y estructurales, se observan diferencias entre la parte Norte del distrito (Segovia-Zaragoza) y la parte Sur (Segovia-Remedios) (Rodríguez & Pernet, 1983).

Para todo el distrito se reportan tres etapas mineralizantes con un ensamble mineralógico similar (pirita, calcopirita, galena, esfalerita), con inclusiones fluidas de baja salinidad sin

presencia de CO₂ medible, con reportes de mineralización de edad Cretácico (Echeverri, 2006; Ordoñez-Carmona *et al.*, 2005; Álvarez *et al.*, 2007; Manco *et al.*, 2012; Castaño-Dávila, 2017; Castaño-Dávila *et al.*, 2019; Serna-Peña, 2020). El sector Segovia-Zaragoza, se encuentra al lado Oeste del sistema de fallas Otú-Pericos y tiene como litología hospedante rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, las inclusiones fluidas medidas en las vetas del tren mineralizado Estrella-Diamantina (este estudio) reportan temperaturas de homogeneización entre 103.8°C y 225.8°C. La parte Sur del distrito está ubicada al Este del sistema de fallas y las mineralizaciones se encuentran emplazadas en dioritas, a dioritas cuarzosas a gabros horbléndicos del Batolito de Segovia, reportando temperaturas de homogeneización más altas con valores entre 150°C y 400°C (Manco *et al.*, 2012).

El origen de los depósitos vetiformes del DMRSZ ha sido discutido por varios autores, como: Ordoñez-Carmona *et al.*, (2005) plantean una génesis orogénica para las vetas de la parte Sur del Distrito Segovia-Remedios, a partir del control estructural del sistema de fallas Otú-Pericos. Echeverri, 2006; Álvarez *et al.*, (2007); Manco *et al.*, (2012) sugieren un origen relacionado con intrusiones graníticas (IRGD) para este sector. Para el sector Segovia-Zaragoza, se proponen diferentes ambientes metalogénicos, por un lado, Castaño (2017) y Castaño-Dávila *et al.*, (2019), sugieren un origen epitermal de baja sulfuración asociado a metales base y Serna-Peña (2020) propone una génesis relacionada a intrusiones (*intrusion-related*) y este estudio propone modelo de depósito de oro orogénico para el extremo norte del distrito Segovia-Zaragoza.

14. CONCLUSIONES

1. Las estructuras vetiformes del proyecto de exploración Estrella-Diamantina, se encuentran hospedadas principalmente en milonitas a partir de ortogneises del Complejo Cajamarca.
2. El análisis multielemental permitió identificar las asociaciones químicas Au-Ag, Au-Pb, Au-Zn, Au±Cu para el tren mineralizante Estrella-Diamantina.
3. De acuerdo, a los ratios Au/As, As/Cu, Au/Zn y Au/Pb indican condiciones más someras para el sector norte (Estrella) y un poco más profundas para el sector sur (Diamantina).
4. En este depósito se evidencian cuatro etapas mineralizantes. El primer evento mineralizante está caracterizado por la formación de Qz1+Py1+Ccp1+Po1±Cbn minerales precipitados durante un evento con pH ligeramente ácido, con temperaturas menores a 225°C y salinidades entre 3.14% y 12.05% (% wt NaCl equiv). La segunda y más importante etapa mineralizante está representada por Qz2+Cal1+Py2+Ccp2+Po2+Gn1+Sp+Au1, esta asociación mineralógica sugiere condiciones de pH neutro a alcalino (Camprubí & Albinson, 2006) con temperaturas entre 159.2°C y 210°C y salinidades menores a 9.86% (% wt NaCl equiv). La tercera etapa mineralizante está dominada por la asociación Qz3+Qz4+Gn2+Au2±Mk reflejando condiciones ligeramente alcalinas, con temperaturas que oscilan entre 157°C y 204°C y salinidades de 0.88% y 8.8% (% wt NaCl equiv). La cuarta etapa mineralizante, marca el cierre de sistema con venillas de Cal2+Py3, registrando temperaturas entre 103°C y 140°C y salinidades de 0.18% y 3.71% (% wt NaCl equiv). Para toda la secuencia, se identificó como alteración hidrotermal dominante la alteración fílica.
5. Las inclusiones fluidas, el ensamble mineralógico observado y la alteración hidrotermal sugieren unas condiciones neutrales a ligeramente alcalinas para el fluido mineralizante. Bajo

estas condiciones, las especies ligantes como H₂S o HS⁻ son dominantes y, por consiguiente, permiten proponer que los iones complejo Au (HS)²⁻ o Au (HS) son el medio más factible para transportar el oro. Este es un mecanismo de transporte común en los depósitos de oro orogénico (Shenberger & Barnes, 1989; Rimstidt, 1997; Benning & Seward, 1996; Saunders *et al.*, 2014).

6. Las características geológicas, estructurales, los resultados microtermométricos, las texturas de cuarzo y mena identificadas, la ausencia de adularia y estibina en la mineralización, la no identificación de zonas de ebullición en el análisis de inclusiones fluidas y el estilo de mineralización (vetas controladas estructuralmente, emplazadas en estructuras de 2-3 orden, en regímenes frágil-dúctil) del tren mineralizado Estrella-Diamantina permite proponer un modelo de Oro Orogénico para estas mineralizaciones de Au-Ag, en el sentido de Groves *et al.*, (1998), Mortiz, (2000), Goldfarb *et al.*, (2005); Hart & Goldfarb, (2005), y Goldfarb & Groves, (2015).

15. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio de isótopos estables CHONS para determinar las posibles fuentes del fluido mineralizante y su naturaleza.
- Realizar un análisis geocronológico de las vetas y la roca encajante para establecer la edad del yacimiento.
- Realizar un análisis de microespectroscopía Raman en las inclusiones fluidas para verificar la presencia de CO₂ en las inclusiones fluidas.

REFERENCIAS

- Álvarez, M. J., Ordóñez, O., Valencia, M., & Romero, A. (2007). *Geología de la Zona de Influencia de la Falla Otú en el Distrito Minero Segovia - Remedios*. Dyna, 45-51.
- Ayala, J., & Montoya, P. (2004). *Ambiente Geológico y Caracterización Mineralógica de la Mina El Limón y sus alrededores, Zaragoza-Antioquía*. Medellín: Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia.
- Bakker, R. J. (2003). *Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties*. Chemical Geology, 3-23.
- Barnes, H. (1997). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*.
- Benning, L. G., & Seward, T. M. (1996). *Hydrosulphide complexing of Au (I) in hydrothermal solutions from 150–400°C and 500–1500 bar*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1849-1871.
- Bodnar, R. (1993). *Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions*. Geochimica et Cosmochimica, 683-684.
- Bodnar, R. J., & Vityk, M. O. (1994). *Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions*. in *Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications*. Virginia Teach, Blacksburg , 117-130.
- Bogotá, J., & Aluja, J. (1981). *Geología de la Serranía de San Lucas*. Geologia Norandina, 49-56.
- Borisenko, A. S. (1977). *Study of the salt composition of solutions in gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method*. Soviet geology and geophysics , 11-19.
- Camprubí, A., & Albinson, T. (2006). *Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 27-81.

- Castaño-Dávila, D. L. (2017). *Estudio Mineralógico y Microtermométrico de las Mineralizaciones Auríferas Asociadas a la Veta de la Mina La Aurora en el Distrito Zaragoza-Segovia, Antioquia-Colombia*. Manizales: Tesis de maestría, Universidad de Caldas.
- Castaño-Dávila, D. L., Hernández-González, J. S., Molano-Mendoza, J. C., & Rodríguez-Vargas, A. I. (2019). *Mineralogía y microtermometría de inclusiones fluidas de la veta con mineralización Au-Ag de la mina La Aurora en la parte norte del Distrito Minero Zaragoza-Segovia-Remedios (DMZSR), Colombia*. Boletín de Geología, 107-127.
- Cediél, F., Shaw, R. P., & Cáceres, C. (2003). *Tectonic Assembly of the Northern Andean Block*. AAPG Special Volumes, 815-848.
- Dowling, K., & Morrison, G. (1989). *Application of quartz textures to the classification of gold deposits using North Queensland examples*. Economic Geology Monograph, 342-355.
- Drummond, S. E., & Ohmoto, H. (1985). *Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems*. Economic Geology, 126-147.
- Echeverri, B. (2006). *Genesis and Thermal History of Gold Mineralization in the Remedios - Segovia - Zaragoza Mining District of Northern Colombia*. Matsue, Japón: University of Shimane.
- Feininger, T., Barrero, D., & Castro, N. (1972). *Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Sub-Zona II-B)*. Boletín Geológico, 1-173.
- Ferrill, D. A., Morris, A. P., Evans, M. A., Burkhard, M., Groshong Jr, R. H., & Onasch, C. M. (2004). *Calcite twin morphology: a low-temperature deformation geothermometer*. Journal of structural Geology, 1521-1529.
- Goldfarb, R. J., & Groves, D. I. (2015). *Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time*. Lithos, 2015.

- Goldfarb, R. J., Baker, T., Dubé, B., Groves, D. I., Hart, J. C., & Patrice, G. (2005). *Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes*. *Economic Geology*, 407-450.
- Goldstein, R. H., Samson, I., Anderson, A., & Marshall, D. (2003). *Petrographic analysis of fluid inclusions*. *Fluid inclusions: Analysis and interpretation*. 9-53.
- Gómez-Tapias, J., Nivia-Guevara, Á., Montes-Ramírez, N. E., Diederix, H., Almanza-Meléndez, M. F., Alcárcel-Gutiérrez, F. A., & Madrid-Montoya, C. A. (2015). *Mapa Geológico de Colombia Escala 1:1000000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- González, H. (2001). *Mapa Geológico de Antioquia Escala 1:400000*. Bogotá: Ingeominas.
- González, J., Terá, B., & Ordóñez-Carmona, O. (2010). *Geología de la Parte Oriental del Distrito Minero Segovia - Remedios*. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 61-76.
- Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. G., & Rober, F. (1998). *Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types*. *Ore Geology Reviews*, 7-27.
- Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Robert, F., & Hart, C. J. (2003). *Gold Deposits in Metamorphic Belts: Overview of Current Understanding, Outstanding Problems, Future Research, and Exploration Significance*. *Economic Geology*, 1-29.
- Guarín, G., Oquendo, E., & Ortiz, F. (1970). *Ocurrencias Minerales Noreste de Antioquia*. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras. Medellín: Informe Interno Ingeominas.
- Hall, R., Feininger, T., Barrero, D., Rico, H., & Álvarez, J. (1970). *Recursos minerales de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas*. *Boletín geológico*, 1-90.

- Hart, C. J., & Goldfarb, R. J. (2005). *Distinguishing intrusion-related from orogenic gold systems*. New Zealand Minerals Conference Proceedings, 125-133.
- John, D. A., Vikre, P. G., Du Bray, E. A., Blakely, R. J., Fey, D. L., Rockwell, B. W., . . . Graybeal, F. T. (2018). *Descriptive models for epithermal gold-silver deposits*. Menlo Park: U.S Geological Survey.
- Leal-Mejía, H. (2011). *Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes: A tectonomagmatic approach (Tesis Doctoral)*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Leal-Mejía, H., Shaw, R. P., & Melgarejo i Draper, J. C. (2019). *Spacial - Temporal Migration of Granitoid Magmatism and the Phanerozoic Tectono - Magmatic Evolution of the Colombian Andes*. *Geology and Tectonics of Northwestern South America*, 253-410.
- Londoño, C., Montoya, J. C., Ordoñez, O., & Restrepo, J. J. (2009). *Características de las mineralizaciones vetiformes en el Distrito Minero Bagre - Nechí, Antioquia*. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 29-38.
- López, D. (2004). *Distribución de Zonas de Enriquecimiento Mineral y Modelamiento Estructural, Mina El Limón, Zaragoza-Antioquia*. Medellín: Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia.
- Manco, J. D., Molano, J. C., & Ordóñez, O. (2012). *Análisis paragenético y microtermométrico de las mineralizaciones auro - argentíferas del Distrito Minero Segovia - Remedios (DMSR): Implicaciones para la fuente y naturaleza de los fluidos mineralizantes*. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 47-60.
- Marshall, D. D., Anglin, C. D., & Mumin, A. H. (2004). *Ore mineral atlas*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division.

- Maya, M., & Gonzalez, H. (1995). *Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia*. Boletín Geológico, 44-57.
- Mendoza, F. A., & Giraldo, K. A. (2012). *Cartografía Geológica de Superficie en Escala 1:2.000 de la Mina El Limón y sus Alrededores. Zaragoza-Antioquia*. Informe compañía FOUR POINTS MINING S.A.S.
- Monterroza, A. (2005). *Informe de Práctica Empresarial, Cartografía Geotécnica y Direcciones de Zonas Mineralizadas, Mina El Limón, Zaragoza-Antioquia*. Medellín: Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia.
- Moreno-Sánchez, M., Gómez-Cruz, A., & Buitrago-Hincapié, J. (2020). *Paleozoic of Colombian Andes: New Paleontological Data and Regional Stratigraphic Review*. The Geology of Colombia, 167-203.
- Mortiz, R. (2000). *MORITZ, Robert. What have we learn about orogenic lode gold deposits over the past 20 years*. University of Geneva, Switzerland: Scientific Communication. Section des Sciences de la Terre.
- Naranjo-Sierra, E. (2019). *Estudio metalogénico de los depósitos vetiformes La Ye, Los Mangos y el prospecto Cordero-Baldivia en la zona norte del Distrito Minero El Bagre, Antioquia-Colombia*. Universidad de Caldas: Tesis maestría.
- Naranjo-Sierra, E., & Alvarán-Echeverri, M. (2018). *Características geológicas, isotópicas y estructurales del depósito vetiforme Los Mangos, Antioquia-Colombia*. Boletín de Geología, 93-108.
- Naranjo-Sierra, E., & Alvarán-Echeverri, M. (2020). *Fluid inclusion study of shear zone hosted lode gold type deposits: El Bagre mining district, Antioquia-Colombia*. Earth Sciences Research Journal, 245-257.

- Naranjo-Sierra, E., Alvarán-Echeverry, M., & Zapatra-Cardona, E. (2016). *Análisis metalogenético preliminar del depósito vetiforme en la mina La Ye, Antioquia, Colombia: características geológicas, isotópicas y estructurales*. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 316-328.
- Nash, J. T. (1976). *Fluid inclusion petrology-data from porphyry copper deposits and applications to exploration*. USGS Professional Paper , 16.
- Nash, J. T., & Theodore, T. G. (1971). *Ore fluids in the porphyry copper deposit at Copper Canyon, Nevada*. *Economic Geology*, 385-399.
- Oakes, C. S., Bodnar, R. J., & Simonson, J. M. (1990). *The system NaCl-CaCl₂-H₂O: I. The ice liquidus at 1 atm total pressure*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 603-610.
- Ordoñez-Carmona, O., Valencia-Marín, M., Álvarez-Galíndez, M. J., Sánchez-Arredondo, L. H.-G., & Echeverri, B. (2005). *Metalogenia y Evolución Tectonomgmática del Distrito Minero Segovia - Remedios, Primera Aproximación*. *Memorias X Congreso Colombiano de Geología* (pág. 252). Bogotá: Gente Nueva Ltda.
- Osorio Giraldo, A. D., & Loiza Quiceno, J. K. (2021). *Caracterización metalográfica y petrográfica de las mineralizaciones vetiformes presentes en los prospectos Santa Elena y Santa María en el distrito minero Nechí, sur de Bolívar*. Universidad de Caldas: Tesis pregrado.
- Phillips, G. N., & Powell, R. (2010). *Formation of gold deposits: a metamorphic devolatilization model*. *Journal of Metamorphic geology*, 689-718.
- Ramdohr, P. (2013). *The ore minerals and their intergrowths* . Elsevier.
- Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. (1988). *Terranes and Continental Accretion in the Colombian Andes*. *Episodes Journal of International Geoscience*, 189-193.

- Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. (2020). *Tectonostratigraphic Terranes in Colombia: An Update First Part: Continental Terranes*. The Geology of Colombia.
- Restrepo, J. J., Ordoñez-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 , 497-507.
- Ridley, J. R., & Diamand, L. W. (2000). Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models. *SEG Reviews*, 141-162.
- Rimstidt, J. D. (1997). *Quartz solubility at low temperatures*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2553-2558.
- Rodríguez, C. J., & Pernet, A. (1983). *Recursos Minerales de Antioquia*. Boletín Geológico, 2-116.
- Roedder, E. (1984). *Fluid inclusions*. Reviews in Mineralogy, Volumen 12.
- Saunders, J. A., Hofstra, A. H., Goldfarb, R. J., & Reed, M. H. (2014). *Geochemistry of Hydrothermal Gold Deposits*. Treatise on Geochemistry, 383-424.
- Serna-Peña, C. A. (2020). *Geocronología y Análisis Isotópico de las Mineralizaciones Auríferas Asociadas a la Veta de la Mina La Aurora en la Parte Norte del Distrito Minero Zaragoza-Segovia-Remedios (DMZSR), Antioquia-Colombia*. Manizales: Tesis de maestría, Universidad de Caldas.
- Seward, T. M., Williams-Jones, A., & Migdisov, A. (2014). *The Chemistry of Metal Transport and Deposition by Ore-Forming Hydrothermal Fluids*. Elsevier Science, 29-57.
- Seward, T., Williams-Jones, A. E., & Migdisov, A. A. (2014). *The Chemistry of Metal Transport and Deposition by Ore-Forming hydrothermal fluids*. Treatise on geochemistry, 29-57.

- Shaw, R. P. (2000). *Gold mineralization in the Northern Andes - Magmatic setting vs metallogeny*. International mining congress XI, (pág. 19). Bogotá.
- Shaw, R. P., Leal-Mejía, H., & Melgarejo i Draper, J. C. (2018). *Phanerozoic Metallogeny in the Colombian Andes: A Tectono - Magmatic Analysis in Space and Time*. *Geology and Tectonics of Northwestern South America*, 411-549.
- Shenberger, D. M., & Barnes, H. L. (1989). *Solubility of gold in aqueous sulfide solutions from 150 to 350°C*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 269-278.
- Shenberger, D. M., & Barnes, H. L. (1989). *Solubility of gold in aqueous sulfide solutions from 150 to 350°C*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 269-278.
- Shepherd, T., Rankin, A., & Alderton, D. (1985). *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. 239.
- Sibson, R. H. (1977). *Fault rocks and fault mechanisms*. *Journal of the Geological Society*, 191-213.
- Sillitoe, R. H. (2008). *Major Gold Deposits and Belts of the North and South American Cordillera: Distribution, Tectonomagmatic Settings, and Metallogenic Considerations*. *Economic Geology*, 663-687.
- Sillitoe, R. H., & Thompson, J. F. (1998). *Intrusion-Related Vein Gold Deposits: Types, Tectono-Magmatic Settings and Difficulties of Distinction from Orogenic Gold Deposits*. *Resource Geology*, 237-250.
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., & Beate, B. (2015). *The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma)*. *Gondwana Research*, 95-139.

- Varona-Bravo, D., Naranjo-Sierra, E., & Toro, L. M. (2016). *Características geoquímicas y petrográficas del stock El Carmen en el distrito minero El Bagre.*
- Velasco, F. (2004). *Introducción al estudio de las inclusiones fluidas.* XXIII Concurso Latinoamericano de Metalogenia . Mendoza, Argentina.
- Whitney, D. L., & Evans, B. W. (2010). *Abbreviations for names of rock-forming minerals.* American mineralogist, 185-187.
- Wilkinson, J. (2001). *Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits.* Lithos, 229-272.

ANEXOS

Anexo 1. Formatos de descripción para secciones delgadas doblemente pulidas y muestras de mano

Anexo 2. Excel con ocurrencia, asociación y tamaños de granos de oro

Anexo 3. Excel con datos microtermométricos de las muestras analizadas