

# Caracterización metalográfica y microtermométrica del proyecto Estrella-Diamantina, distrito minero Remedios-Segovia-Zaragoza, Antioquia-Colombia

Isabella Aguirre-Murillo<sup>1\*</sup> ; Esteban Franco-Hernández<sup>1</sup> ;  
Edwin Naranjo-Sierra<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Programa de Geología, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia. (\*) iaguirrem@hotmail.es, estebanfrancoh@gmail.com, edwin.naranjo@ucaldas.edu.co

## Resumen

El proyecto de exploración Estrella-Diamantina se encuentra 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, y hospedado en rocas metamórficas del Complejo Cajamarca. Las características de los fluidos mineralizantes fueron analizadas usando petrografía de minerales de mena y alteración, complementado con un análisis de ICP-MS. La evolución composicional y termal de los fluidos mineralizantes fue interpretada con base en la petrografía de inclusiones fluidas y en un análisis microtermométrico. Los análisis de geoquímica multielemental permitieron identificar las asociaciones Au-Ag, Au-Pb, Au-Zn y Au±Cu. Se definieron cuatro etapas mineralizantes: la primera etapa está caracterizada por Qz1+Py1+Ccp1+Po+Cbn con temperaturas de homogenización entre 188,6° y 225°C y salinidades entre 3,14% y 12,05% (%wt NaCl equiv.). La segunda y principal etapa mineralizante está caracterizada por Qz2+Cal1+Py1+Ccp2+Po+Gn1+Sp+Au1, con temperaturas entre 159,2° y 210°C y salinidades menores a 9,86% (%wt NaCl equiv.). La tercera etapa mineralizante está representada por Qz3+Qz4+Gn2+Au2±Mk con temperaturas que oscilan entre 157° y 204°C y salinidades de 0,88% y 8,8% (%wt NaCl equiv.). La cuarta etapa mineralizante y el cierre del sistema está caracterizado por vetillas de Cal2+Py3, con temperaturas desde 103,8° hasta 140°C y salinidades entre 0,18% y 3,71% (%wt NaCl equiv.). La asociación mineralógica indica que el fluido mineralizante era neutro a ligeramente alcalino y relativamente reducido con base en la ausencia de hematita y la coexistencia de piritita y cloritita. Bajo estas condiciones, los iones HS<sub>2</sub> o HS<sup>-</sup> fueron las especies de sulfuro dominantes en el fluido hidrotermal y, consecuentemente, los iones complejos Au (HS)<sup>2-</sup> o Au (HS) fueron probablemente los iones complejos para el transporte del oro. Con base en los resultados presentados aquí, el sistema vetiforme mineralizado Estrella-Diamantina muestra características similares a los depósitos de oro orogénico.

**Palabras clave:** Inclusiones fluidas; Sistemas vetiformes; Oro; Sistema de fallas Otú-Pericos; Análisis multielemental.

## Metallographic and microthermometric characterization of the Estrella-Diamantina project, Remedios-Segovia-Zaragoza Mining District, Antioquia-Colombia

### Abstract

The Estrella-Diamantina exploration project is located on the Eastern flank of the Central Cordillera, in the northern zone of the Remedios-Segovia-Zaragoza Mining District (DMRSZ), to the west of the Otú-Pericos fault system and hosted in metamorphic rocks of the Cajamarca Complex. The characteristics of ore-forming fluids were analyzed using alteration and ore-minerals petrography which were complemented by ICP-MS analyses. The thermal and compositional evolution of the ore-forming fluids were accessed using petrography of fluid inclusion and microthermometry analysis. The multi-element chemical analysis allowed the identification of Au-Ag, Au-Pb, Au-Zn, and Au±Cu as the principal associations within the veins. Four mineralizing stages were defined within the system: the first stage is characterized by Qz1+Py1+Ccp1+Po+Cbn with homogenization temperatures between 188.6° and 225°C and salinities between 3.14% and 12.05% (%wt NaCl equiv.). The second and main mineralized stage is characterized by Qz2+Cal1+Py1+Ccp2+Po+Gn1+Sp+Au1, with temperatures between 159.2° and 210°C and salinities less than 9.86% (%wt NaCl equiv.). Qz3+Qz4+Gn2+Au2±Mk represent the third mineralizing stage, with temperatures ranging between 157° and 204°C and salinities ranging from 0.88% to 8.8% (%wt NaCl equiv.). The fourth mineralizing stage and the closure of the system are characterized by Cal2+Py3 veins, with temperatures ranging from 103.8° to 140°C and salinities between 0.18% and 3.71% (%wt NaCl equiv.). The mineralogical association indicates that the ore-forming fluids was neutral to slightly alkaline and relatively reduced based on the absence of hematite and the coexistence of pyrite and chlorite. Under these conditions, HS<sub>2</sub> or HS<sup>-</sup> ions were the dominant sulfide species in the hydrothermal fluid and, consequently, Au (HS)<sup>2-</sup> or Au (HS) complex ions were probably the complex ions for gold transport. Based on the results presented here, the Estrella-Diamantina mineralized vein system shows characteristics of orogenic gold deposits.

**Keywords:** Fluid inclusions; Lode systems; Gold; Out-Pericos fault system; Multielemental analysis.

### Introducción

El distrito minero Remedios-Segovia-Zaragoza (DMRSZ) (Rodríguez y Pernet, 1983) está localizado en el Bajo Cauca antioqueño, sobre el flanco oriental de la Cordillera Central, al noreste del departamento de Antioquia (Figura 1A). Este distrito está dividido en dos zonas principales: al sur, el área de Segovia-Remedios, y al norte, el área de Segovia-Zaragoza. Históricamente, este distrito ha sido reconocido por sus explotaciones de oro aluvial y manifestaciones vetiformes (Shaw, 2000; Sillitoe, 2008; Leal-Mejía *et al.*, 2019; Shaw *et al.*, 2019).

La parte sur del distrito ha sido ampliamente estudiada por diversos autores, entre estos destacan Feininger *et al.* (1972), Rodríguez y Pernet (1983), Restrepo y Toussaint (1988), González (2001), Ordóñez-Carmona *et al.* (2005), Echeverri (2006), Álvarez-Galíndez *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 y Montoya (2004), López (2004), Monterroza (2005), Mendoza y Giraldo (2012), Castaño-Dávila (2017), Castaño-Dávila *et al.* (2019) y Serna-Peña (2020).

El área comprendida entre Zaragoza-Machuca (Figura 1B), donde se ubican las mineralizaciones vetiformes objeto de análisis de este trabajo, está dominada por gneises cuarzo-feldespáticos pertenecientes al Complejo Cajamarca (Arango-Escobar *et al.*, 2021; Gómez-Tapias *et al.*, 2023). Estas rocas metamórficas de edad Permo-Triásico conforman el núcleo de la Cordillera Central y constan de esquistos de bajo a medio grado, intercalados con cuarcitas y localmente con mármoles, gneises aluminicos de medio grado y algunos cuerpos generalmente lenticulares de anfibolitas (Maya y González, 1995; González, 2001; Gómez-Tapias *et al.*, 2023). Estas rocas metamórficas son la litología hospedante para las diferentes vetas de Au-Ag en el sector, y se encuentran asociadas a la dinámica del sistema de fallas Otú-Pericos, según lo descrito por Álvarez-Galíndez *et al.* (2007), Londoño *et al.* (2009), Leal-Mejía (2011), Mendoza y Giraldo (2012) y Shaw *et al.* (2019).

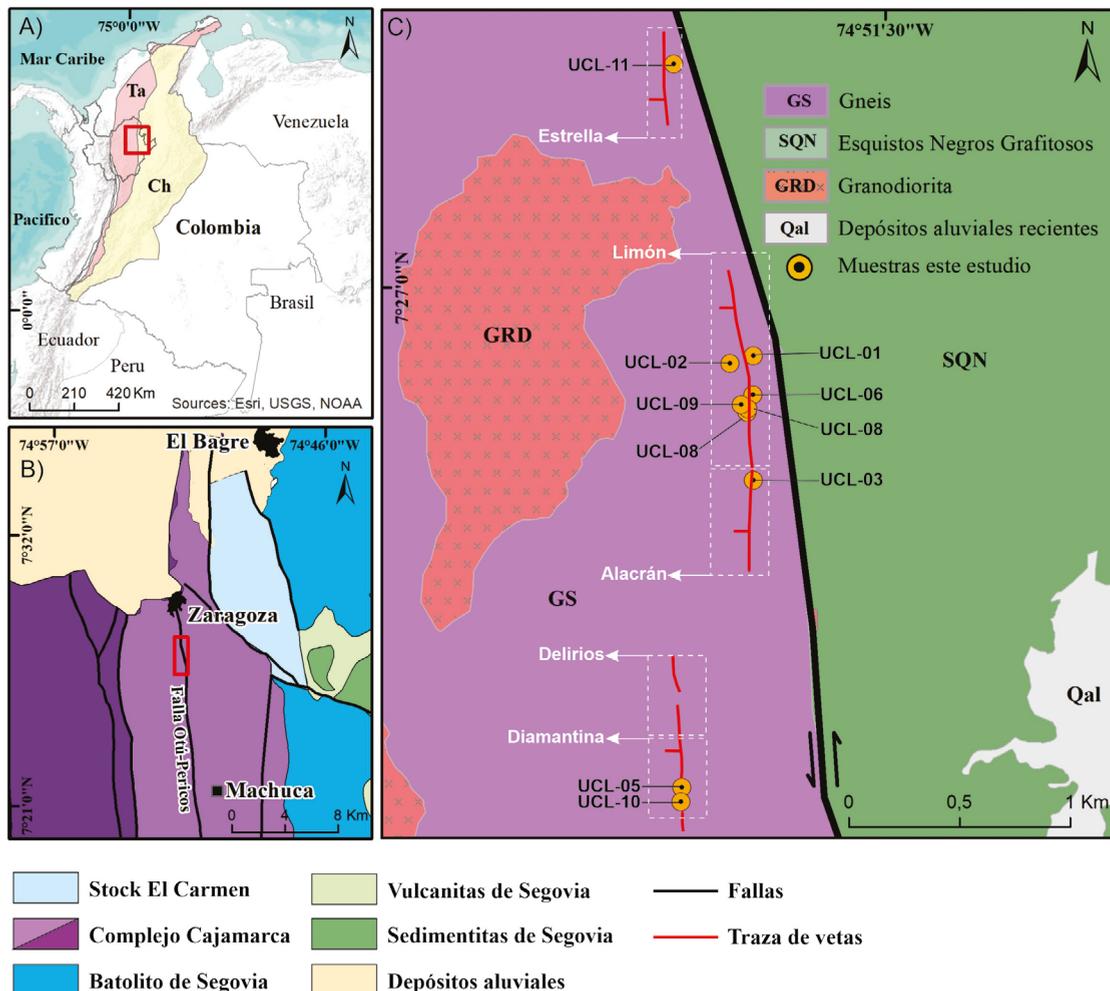
Esta zona de falla es el límite tectónico de los terrenos Chibcha y Tahamí (Rodríguez y Pernet, 1983; Cediel *et al.*, 2003; Moreno-Sánchez *et al.*, 2020; Restrepo y Toussaint, 2020), y es considerada el rasgo estructural más importante del distrito minero, dado que permite condiciones favorables para la generación

de estructuras vetiformes en la zona (Feininger *et al.*, 1972; Londoño *et al.*, 2009; González *et al.*, 2010). A lo largo del corredor mineralizante del sistema de fallas Otú-Pericos se localizan diversas mineralizaciones entre las que destacan: Segovia-Remedios (Leal-Mejía *et al.*, 2011; Manco *et al.*, 2012; Shaw *et al.*, 2019), Aurora (Castaño-Dávila, 2017; Castaño-Dávila *et al.*, 2019; Serna-Peña, 2020), el Bagre (Naranjo-Sierra *et al.*, 2016; Naranjo-Sierra y Alvarán-Echeverri, 2018, 2020) y Nechí (Londoño *et al.*, 2009; Giraldo-Osorio y Loaiza-Quiceno, 2021).

El proyecto Estrella-Diamantina se encuentra localizado en la parte norte del distrito minero Remedios-Segovia-Zaragoza (DMRSZ), a 6 km del casco urbano del municipio de Zaragoza. Este proyecto de exploración está conformado por un corredor vetiforme

mineralizado de  $\pm 7$  km de longitud, definido (de norte a sur) por los sectores Estrella, Limón, Alacrán, Delirios y Diamantina. Las estructuras vetiformes observadas en el proyecto presentan espesores promedio de 60 cm, con rumbos entre  $10^\circ$  y  $50^\circ$  al NE y buzamientos entre  $60^\circ$  y  $75^\circ$  con dirección NW (Ayala y Montoya, 2004; López, 2004) (Figura 1C).

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, y división de los terrenos tectónicos Tahamí (Ta) y Chibcha (Ch). B. Mapa geológico regional que enmarca la localización del proyecto. C. Mapa de localización de los sectores Estrella, Limón, Alacrán, Delirios y Diamantina y ubicación de las muestras analizadas. Base cartográfica tomada y modificada de Gómez-Tapias *et al.* (2023). Terrenos Tahamí y Chibcha *sensu* Restrepo *et al.* (2011).

## Contexto geológico

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-Galíndez *et al.*, 2007; Leal-Mejía *et al.*, 2011; Mendoza y Giraldo, 2012; Shaw *et al.*, 2019). Feininger *et al.* (1972) determinaron para esta zona de falla un componente lateral izquierdo con tendencia NS, con una longitud aproximada de 120 km y un desplazamiento lateral izquierdo de 66 km.

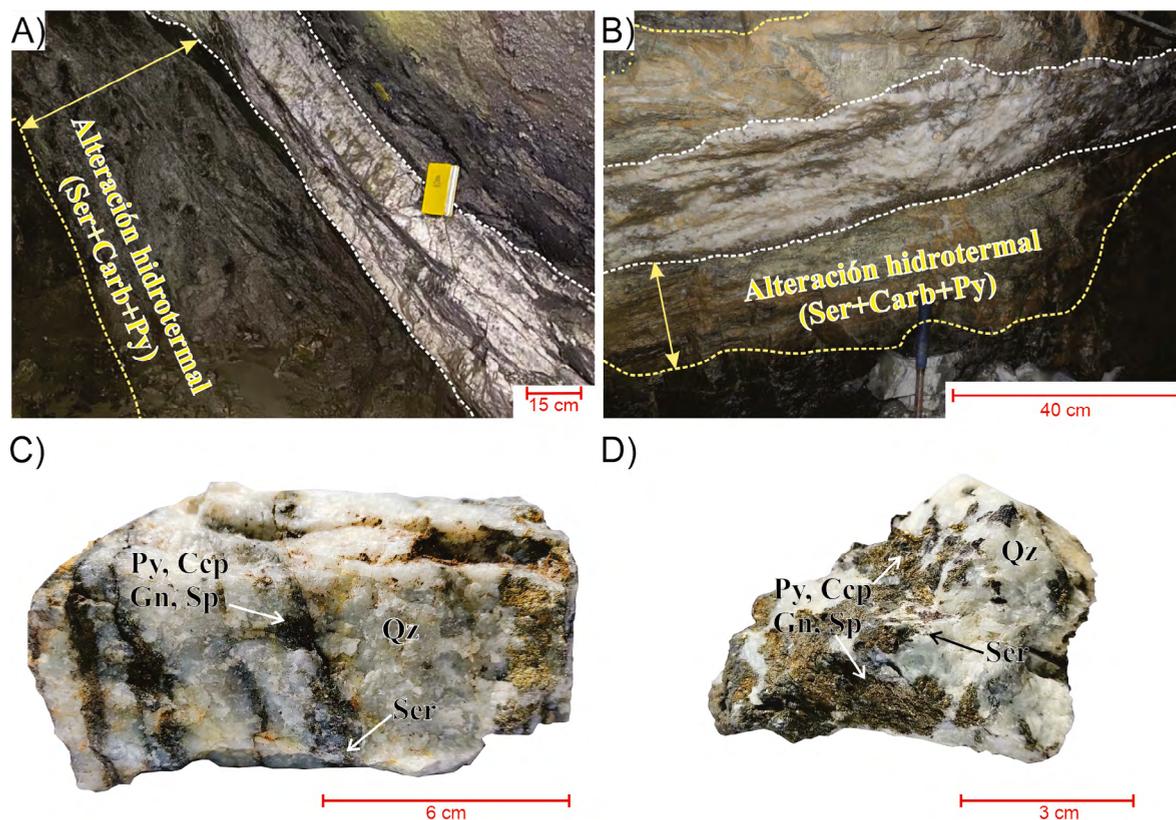
El sistema de fallas Otú-Pericos es interpretado por diversos autores (Rodríguez y Pernet, 1983; Cediél *et al.*, 2003; Moreno-Sánchez *et al.*, 2020; Restrepo y Toussaint, 2020) como un límite entre los terrenos tectónicos Chibcha (Ch) al oeste y Tahamí (Th) al este (Figura 1A). El proyecto Estrella-Diamantina se encuentra localizado al sur del casco urbano del municipio de Zaragoza. Las rocas más antiguas en este sector pertenecen al gneis de San Lucas (Bogotá y Aluja, 1981; Clavijo *et al.*, 2008; Gómez-Tapias *et al.*, 2023). 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 aflorantes en la serranía de San Lucas (González, 2001; Clavijo *et al.*, 2008).

El sistema de fallas Otú-Pericos, en la zona norte del DMRSZ, separa rocas metamórficas de edad Permo-Triásico, pertenecientes al Complejo Cajamarca de rocas ígneas de edad Carbonífero del stock El Carmen (Leal-Mejía, 2011; Gómez-Tapias *et al.*, 2023; Zapata *et al.*, 2023) y de rocas jurásicas del batolito de Segovia (Spikings *et al.*, 2015; Gómez-Tapias *et al.*, 2023). El Complejo Cajamarca es un conjunto de rocas metamórficas de bajo grado hasta alto grado de metamorfismo. En el área de estudio se destacan dos tipos de litologías metamórficas propias de este Complejo, que son separadas por el trazo del sistema de fallas Otú-Pericos (Figura 1C) (Gómez-Tapias *et al.*, 2023). Al este de esta zona de falla afloran esquistos grafiticos y cuarzo-moscovíticos. Al oeste se presentan gneises feldespáticos y aluminicos, principales hospedantes del corredor mineralizado. Varona-Bravo *et al.* (2016) clasificaron las rocas ígneas de edad Carbonífero del

stock El Carmen como diorita/cuarzodiorita y tonalita/granodiorita, propusieron una afinidad calcoalcalina para las más ácidas y una afinidad toleítica para las más básicas, y las clasificaron geoquímicamente como gabros/dioritas gabroicas y cuarzodioritas/granitos.

En las cercanías del trazo del sistema de fallas Otú-Pericos, González (2001) describió dioritas con variación a dioritas cuarzosas y gabros horbléndicos de edad Jurásico inferior incluidas dentro del batolito de Segovia. Adicionalmente, este mismo autor describió rocas volcánicas de origen marino, principalmente basaltos, y lodolitas negras intercaladas con limolitas, arenitas y conglomerados de edad cretácica aflorando en una pequeña extensión sobre las otras unidades. 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.*, 2023). 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.

Las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca que hospedan la mineralización se presentan fisuradas y cizalladas por fallas satélites del sistema de fallas Otú-Pericos que cortan la dirección principal de foliación de la roca encajante y actúan como conductos mineralizantes (Hall *et al.*, 1970; Feininger *et al.*, 1972; López, 2004; Londoño *et al.*, 2009). De acuerdo con Ayala y Montoya (2004) y Mendoza y Giraldo (2012), la mineralización en el sector Diamantina (Figura 2A) y Limón (Figura 2A, 2B) aprovechó los espacios vacíos generados por las fallas, formando así “*filones de fisura*” con una dirección general N 10° E buzando entre 17° y 40° al oeste, con espesores entre 10 y 50 cm, constituidas principalmente por pirita, galena, esfalerita, calcopirita, oro, plata, y como minerales de ganga: cuarzo y calcita (Figura 2C, 2D). De acuerdo con Ayala y Montoya (2004), López (2004), Castaño-Dávila (2017) y Serna-Peña (2020), el contacto entre las vetas y la roca caja es neto y se encuentra asociado a una alteración predominantemente sericítica en contacto con las vetas.



**Figura 2.** Características generales de las vetas **A.** Fotografía tomada en la mina Diamantina donde se evidencia el contacto neto con la roca hospedante y el halo de alteración hidrotermal (filica). **B.** Fotografía tomada en la mina Limón, en la que se evidencia el halo de alteración hidrotermal filica. **C.** Muestra perteneciente al sector Limón (UCL-03) en el cual se evidencia una veta de cuarzo masivo con mineralización en vetillas 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.

### Metodología

Para la etapa inicial del proyecto, se llevó a cabo la adquisición de datos, estudios de caso y registros bibliográficos de la zona de estudio. Se recolectaron 10 muestras representativas de los diferentes sectores que conforman el proyecto (Material Suplementario 1). Las muestras fueron enviadas a MinerLab Ltda., en la ciudad de Bogotá, para la elaboración de 10 secciones delgadas doblemente pulidas (de 80-100  $\mu\text{m}$  de espesor). En los análisis petrográfico y metalográfico se identificaron los minerales metálicos y no metálicos, las asociaciones mineralógicas y texturales, el tipo de alteración hidrotermal y 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, usando microscopios Nikon 50i POL y Carl Zeiss PRIMOTECH, acompañados de microfotografías tomadas con cámaras de alta resolución Nikon y Hayear adaptadas a ambos microscopios, respectivamente. La descripción metalográfica se realizó de acuerdo con lo planteado en Ramdohr (2013).

La descripción de las texturas de cuarzo se estableció a partir de las clasificaciones propuestas por Dowling y Morrison (1989). 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). Las abreviaturas de los minerales fueron tomadas con base en Whitney y Evans (2010).

Los resultados del estudio metalográfico fueron complementados con análisis químicos de 396 muestras de veta, llevados a cabo en el laboratorio ALS Chemex con tratamiento de 4 ácidos y posterior análisis ICP-MS con una incertidumbre de 0,05 ppm, utilizando un equipo Perkin Elmer Sciex ELAN 9000. Para el tratamiento y procesamiento estadístico de los datos se utilizaron los *softwares* Excel™, IoGAS™ y Orange™, en los que se elaboraron matrices de correlación y gráficos de componentes parciales.

Por último, 10 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 1 cm × 1 cm. 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 de -196°C, con una precisión estimada de  $\pm 0,1^\circ$  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 (2003). Las mediciones realizadas fueron: temperatura eutéctica ( $^\circ\text{Te}$ ), temperatura de fusión del último hielo ( $^\circ\text{Tm-Ice}$ ) y temperatura de homogeneización ( $^\circ\text{Th}$ ); se verificó que las inclusiones fluidas medidas presentaran una relación L/V constante y no tuvieran evidencias de *leaking* o *decrepitation*. A través del *software* Excel se realizó la compilación de cada una de las propiedades registradas durante la petrografía y microtermometría de inclusiones fluidas. Se identificó el sistema salino más aproximado, de acuerdo con los promedios de la temperatura eutéctica ( $^\circ\text{Te}$ ), con base en Borisenko (1977). Las estimaciones realizadas en el análisis microtermométrico fueron calculadas usando las ecuaciones resumidas en Bodnar y Vityk (1994) para el sistema  $\text{H}_2\text{O-NaCl}$  [Salinidad (% wt) =  $1,78 \times (\text{T}^\circ\text{ffh}) - 0,0442 \times (\text{T}^\circ\text{ffh})^2 + 0,000557 \times (\text{T}^\circ\text{ffh})^3$ ], disponibles en el módulo Aqso1 del *software* FLUIDS de Bakker (2003), donde  $\text{T}^\circ\text{ffh}$  corresponde a la temperatura de fusión final del hielo. Los resultados de este estudio fueron procesados mediante *softwares* como Excel<sup>TM</sup>, loGAS<sup>TM</sup> y Orange<sup>TM</sup>, herramientas que permitieron el manejo de los datos para su posterior análisis.

## Resultados

### Mineralización y alteración hidrotermal

La mineralización en el proyecto Estrella-Diamantina presentó una composición relativamente simple, con vetas compuestas principalmente por cuarzo lechoso y una variedad de sulfuros (pirita, galena, calcopirita y esfalerita) que compone hasta el 10% de las vetas (Figura 2C, 2D). 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.

A nivel macroscópico, el cuarzo se observó con hábitos prismático, masivo y granular, brillo vítreo y colores blancos; este fue el mineral más abundante. La calcita se presentó con hábitos masivo y granular, con colores blancos y grises y brillo vítreo; se observó en forma de vetillas o como agregados granulares. La sericita se presentó con hábito laminar, con colores blancos y amarillos, brillo terroso, y se observó también de manera diseminada en algunos sectores de la veta o formando pequeños cúmulos. La pirita se identificó como el sulfuro más abundante, aportando en promedio un 5-10% en volumen a las vetas; se presentó con hábitos masivo y cúbico, color amarillo latón pálido, brillo metálico y comúnmente asociada con otros sulfuros (*i. e.* galena, esfalerita y calcopirita). La galena presentó hábitos cúbico y masivo, color gris plomo y brillo metálico. La esfalerita variedad marmatita presentó hábito masivo, color pardo oscuro y brillo submetálico. La calcopirita presentó hábito masivo, color amarillo latón y brillo metálico.

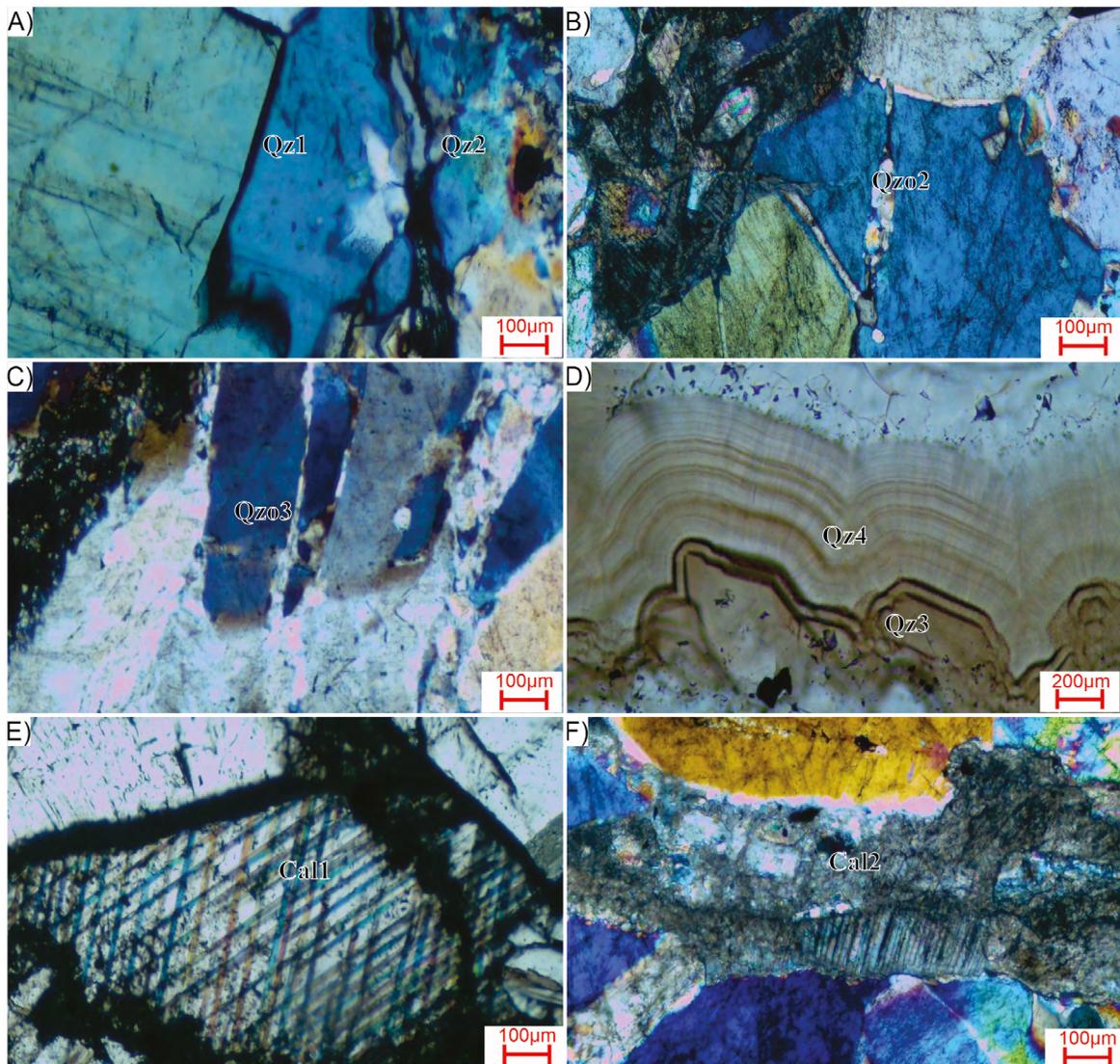
Microscópicamente, se identificó cuarzo, calcita, sericita y clorita como minerales de ganga. Los minerales metálicos identificados fueron pirita, galena, esfalerita, calcopirita, pirrotina, cubanita, melnikovita y oro. El cuarzo (Qz) se observó en vetillas y agregados granulares a lo largo de las muestras. La primera generación de cuarzo (Qz1) se observó desarrollando una textura *buck* con hábito masivo, con bordes irregulares y extinción ondulante, evidencia de deformación (Figura 3A). 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; y b) texturas tipo *infill breccia* o *bulging quartz* (Stipp *et al.*, 2002; Owona *et al.*, 2013) desarrollando agregados a lo largo de los espacios intercristalinos (Figura 3A, 3B). La tercera generación de cuarzo (Qz3) se caracterizó por presentar texturas tipo *fine comb* desarrollando prismas euhedrales que en ocasiones se mostraron orientados (Figura 3C, 3D). La cuarta generación de cuarzo (Qz4) presentó texturas tipo *colloform banded*, con hábito coloforme y asociado a Qz3; también se presentó asociado a cristales de calcedonia (Figura 3D).

La calcita (Cal) se presentó como cristales subhedrales, en forma de vetillas que cortaban la mineralización. La clasificación de las texturas de calcita se realizó a partir

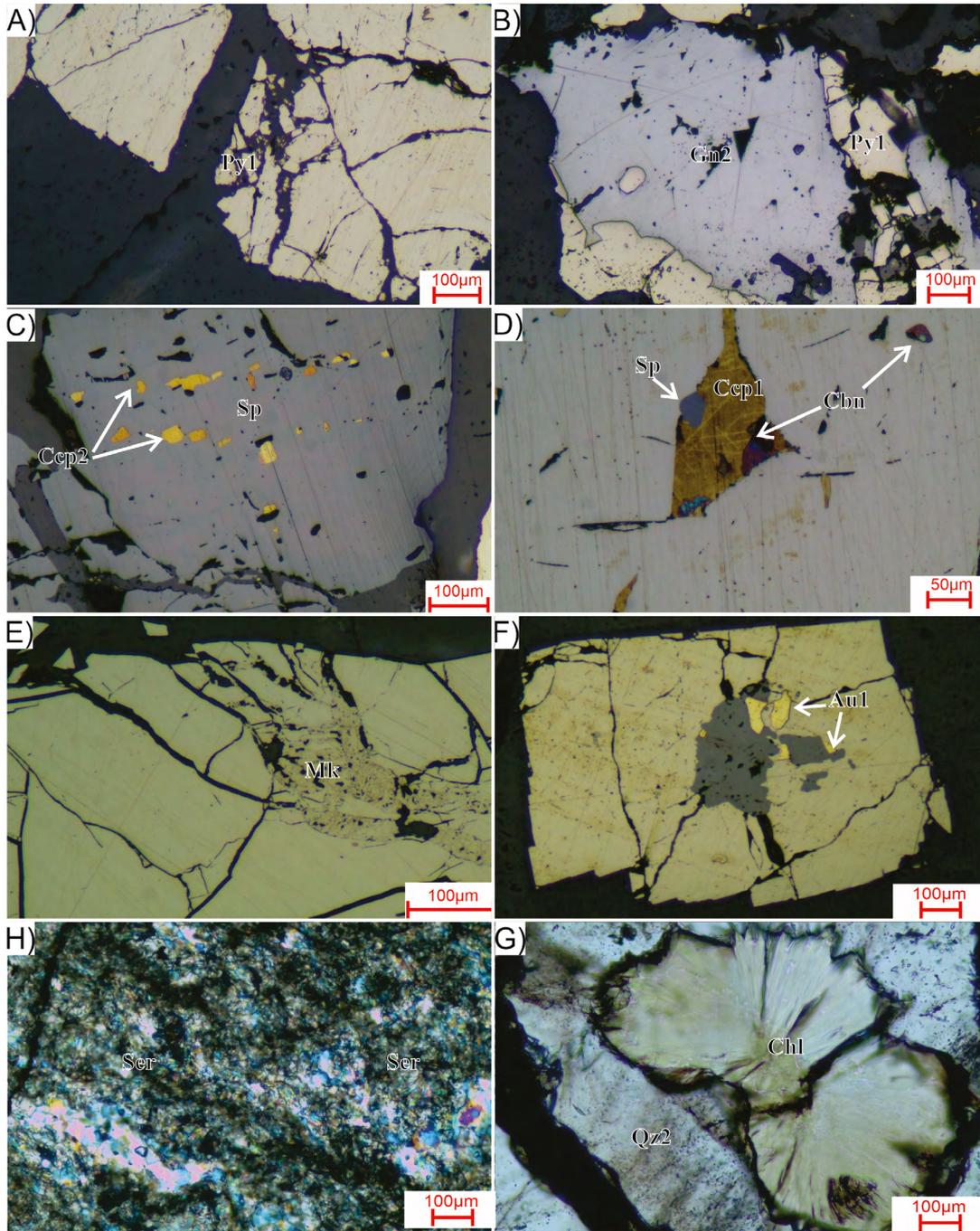
de su forma y tipo de macla, según la propuesta de Ferrill *et al.* (2004). Se identificaron dos generaciones de calcita: la primera (Cal1), con hábitos prismáticos y euhedrales y planos de exfoliación gruesos (Figura 3E). La segunda generación (Cal2) se observó rellenando fracturas y espacios vacíos, con planos de exfoliación delgados y asociada a un evento tardío por su relación de corte con los demás minerales (Figura 3F).

La pirita (Py) (Figura 4A) se observó con hábitos cúbico y masivo, formas euhedrales, subhedrales y anhedrales, color crema, reflectancia alta, intensa fracturación y leve anisotropía en nicoles cruzados que indican un posible contenido de arsénico en su estructura. Se

identificó tres generaciones de pirita (Py): la primera generación de pirita (Py1) se desarrolló de forma masiva con cristales anhedrales y subhedrales, con alto grado de fracturamiento, desarrollando texturas porosas, de brechamiento y esqueletales. Este mineral se encontró asociado a galena, esfalerita, calcopirita, pirrotina, cubanita y oro, minerales que se observaron rellenando fracturas o como inclusiones. La segunda generación de pirita (Py2) se observó como cristales cúbicos con formas euhedrales y subhedrales, con poca o nula deformación. La tercera generación de pirita (Py3) se observó como cristales anhedrales y subhedrales asociada a las vetillas de Cal2.



**Figura 3.** Microfotografías de las principales texturas de cuarzo y calcita que conforman la mineralización. **A.** Buck texture (Qz1). 5X. NX. LP. **B.** Infill breccia texture o bulging quartz (Qz2). 5X. NX. LP. **C.** Fine comb texture (Qz3). 5X. NX. LP. **D.** Colloform banded texture (Qz4). 10X. NP. LP. **E.** Cristal prismático y euhedral con exfoliación tipo 2. 5X. NX. LP. **F.** Vetilla con planos de exfoliación tipo 1. 5X. NX. LP. \*Se observan colores de segundo orden debido a que son secciones doblemente pulidas.



**Figura 4.** Microfotografías de las principales texturas y asociaciones de minerales de mena que conforman la mineralización. **A.** Pirita subhedral. 5X. NP. LR. **B.** Intercrecimiento de galena en pirita. 10X. NP. LR. **C.** Esfalerita con inclusiones de calcopirita, desarrollando la textura conocida como enfermedad de la esfalerita. 5X. NP. LR. **D.** Cubanita en exsolución con calcopirita y esfalerita incluida en pirita. 10X. NP. LR. **E.** Melnikovita con textura coloforme, asociada a pirita. 10X. NP. LT. **F.** Inclusiones de oro asociadas a pirita y esfalerita. 10X. NP. LR. **G.** Microcristales de sercita. 5X. NX. LP. **H.** Clorita con hábito acicular radial. 5X. NP. LP.

La galena (Gn) (Figura 4B) se observó con hábitos cúbico y masivo, formas euhedrales, subhedrales y anhedrales, color gris claro, reflectancia moderadamente alta, *pits* triangulares deformados (Gn1) y no deformados (Gn2) y fracturación moderada. Se observó formando texturas de reemplazamiento con esfalerita y texturas de exsolución con pirita y esfalerita, además se encontró asociada con oro. La esfalerita (Sp) (Figura 4C) se presentó con hábito masivo, formas anhedrales, color gris medio con tonalidad café, alto fracturamiento, reflectancia baja, reflexiones internas rojo-anaranjado, que sugieren un posible contenido de hierro en su estructura mineral (variedad marmatita); se presentó rellenando fracturas de Py1, desarrollando bordes irregulares y texturas de reemplazamiento como textura coronítica con Py1 y asociada a calcopirita, galena y oro.

La calcopirita (Ccp) se observó con hábito masivo, formas subhedrales y anhedrales, color amarillo, reflectancia alta y baja fracturación. Se identificaron dos generaciones de calcopirita (Ccp). La primera generación de calcopirita (Ccp1) (Figura 4D) se observó como inclusiones en Py1, asociada a pirrotina y cubanita, y la segunda generación de calcopirita (Ccp2) (Figura 4C), como inclusiones orientadas según los planos cristalográficos en esfalerita, desarrollando la textura conocida como enfermedad de la esfalerita y asociada con oro rellenando fracturas en Py1. La melnikovita (Mk) (Figura 4E) se observó con textura coloforme a partir de la Py1 y con formas anhedrales, color blanco crema y reflectancia alta.

La pirrotina (Po) presentó hábito masivo, formas subhedrales, color rosado con tonalidad amarilla, reflectancia media y baja fracturación, en inclusiones en Py1 y asociada a Ccp1. La cubanita (Cbn) (Figura 4D) presentó color violáceo, se presentó en cristales anhedrales como exsolución en Ccp1. El oro (Au) (Figura 4F) se observó con hábito masivo, formas subhedrales y anhedrales, color amarillo intenso y alta reflectancia. Se evidenciaron dos episodios de precipitación del oro (Au): la primera generación de oro (Au1) presentó cristales anhedrales y subhedrales como inclusiones, rellenando fracturas en Py1 y asociada principalmente con galena, esfalerita y calcopirita. La segunda generación de oro (Au2) se identificó como oro libre asociado a Qz3.

La alteración hidrotermal dominante en el proyecto Estrella-Diamantina es fílica (pirita-sericita-carbonato). A nivel macroscópico la sericita se observó principalmente entre los contactos de las vetas

y la roca hospedante (Figura 2A y 2B). Este mineral se presentó de forma diseminada, con cristales de tamaños milimétricos de color amarillento y brillo terroso. A nivel microscópico la sericita se observó como pequeños cristales tabulares con colores de interferencia de tercer orden y con tamaños menores a 15  $\mu\text{m}$ . Su distribución estaba relacionada con las tres etapas mineralizantes (Figura 4G). La presencia de clorita en el ensamble de alteración solo fue identificada a nivel microscópico, de forma laminar, con tamaños menores a 10  $\mu\text{m}$  y siempre asociada a cristales de pirita (Py2) (Figura 4H).

### **Secuencia paragenética**

Las asociaciones minerales y texturales identificadas permitieron determinar cuatro etapas mineralizantes para el corredor mineralizado Estrella-Diamantina (Figura 5). La etapa I corresponde a un evento de premineralización rico en sílice con cristalización de cuarzo masivo (Qz1), acompañado de Py1, Ccp1, Po y Cbn. Estos minerales, posteriormente, fueron afectados por un evento deformativo (D1) definido por microfracturas en los minerales de la etapa I. La etapa II es la principal etapa mineralizante y se caracteriza por la recristalización de Qz2 a partir del cuarzo masivo (Qz1), la formación de carbonatos (Cal1) y por el relleno de fracturas y espacios vacíos resultantes del evento deformativo (D1), con minerales como Py2, Sp, Gn1, Ccp2 y Au1 (en ese orden de abundancia). Estos minerales de la etapa II fueron afectados por deformación, generando microfracturas y definiendo un segundo evento deformativo (D2). La etapa III representa un evento tardío de mineralización y está determinada por la cristalización de Qz3 y Qz4 a partir de microfracturas generadas durante D2. Estos espacios fueron rellenados y sellados por Gn2, Au2 y Mk. a etapa IV está representada por vetillas de Cal2 con Py3 que cortan la secuencia anteriormente descrita e indican el cierre del sistema hidrotermal.

### **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 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 y Au $\pm$ Cu, las cuales se ven reflejadas en la mineralogía observada en las diferentes etapas mineralizantes. Las concentraciones de Pb, Zn, Cu y As

son elevadas (>100 ppm) y presentan valores promedio de 887,4 ppm, 1080 ppm, 104,7 ppm y 310 ppm, respectivamente, y están representadas por galena, esfalerita y calcopirita. Las concentraciones promedio en Te, Hg y Sb son bajas; presentan valores promedio

de 0,08 ppm, 0,11 ppm y 4,85 ppm, respectivamente. Se descarta la presencia de telururos, cinabrio y estibina en la mineralización. La matriz de correlación (Tabla 1) muestra una correlación positiva entre el Au y Ag (0,68), Au y Pb (0,53) y Au y Zn (0,58).

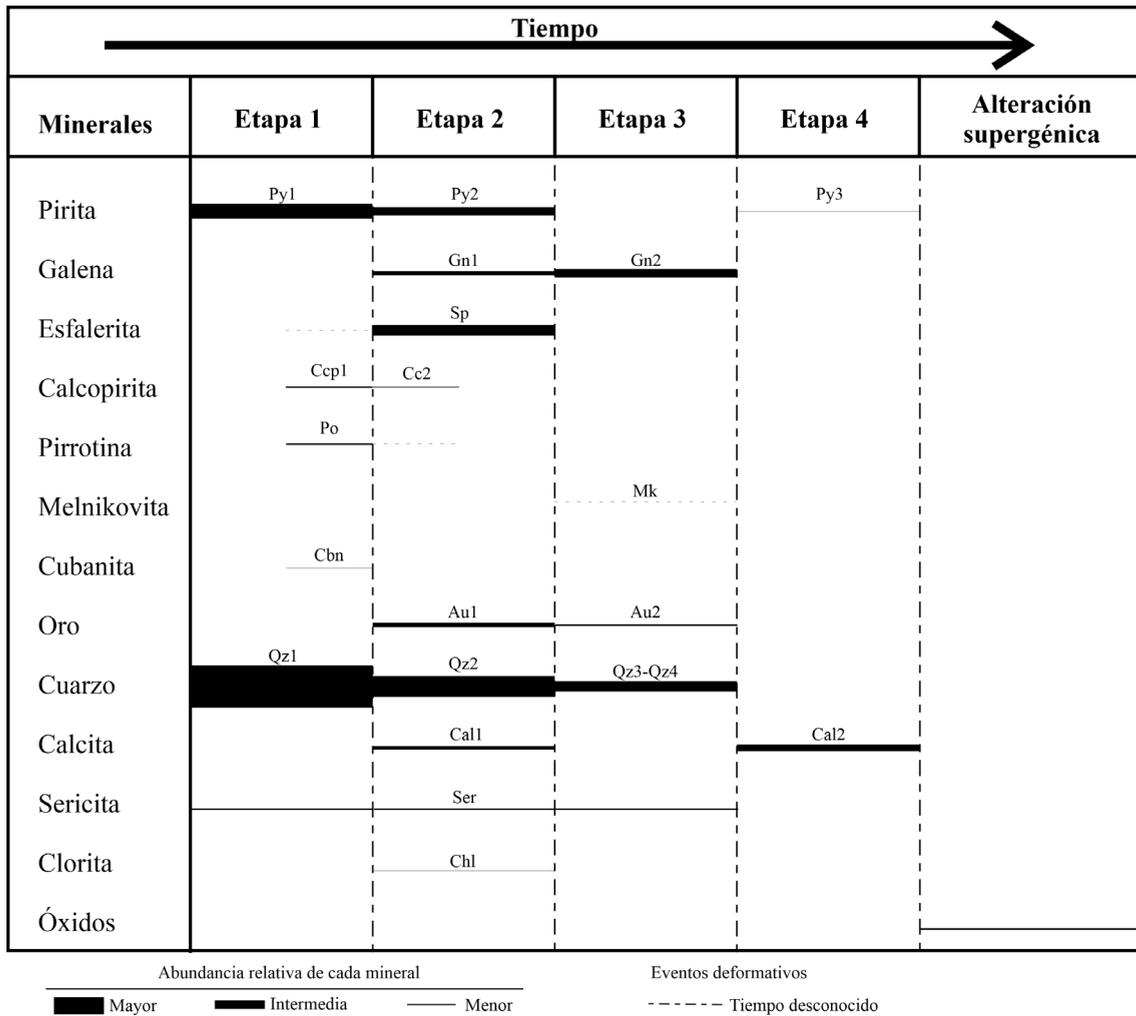


Figura 5. Secuencia paragenética definida para el proyecto Estrella-Diamantina. Volúmenes significativos de cuarzo (Qz1) fueron introducidos durante la etapa I. La etapa principal de mineralización de oro fue durante la etapa II. El espesor de las líneas indica la abundancia relativa de los minerales durante cada etapa.

Tabla 1. Matriz de correlación para las asociaciones de elementos características de la mineralización.

	Au	Ag	As	Cu	Pb	Zn
Au	1					
Ag	0,68	1				
As	0,14	0,26	1			
Cu	0,29	0,32	0,06	1		
Pb	0,53	0,72	0,26	0,12	1	
Zn	0,58	0,69	0,1	0,27	0,7	1

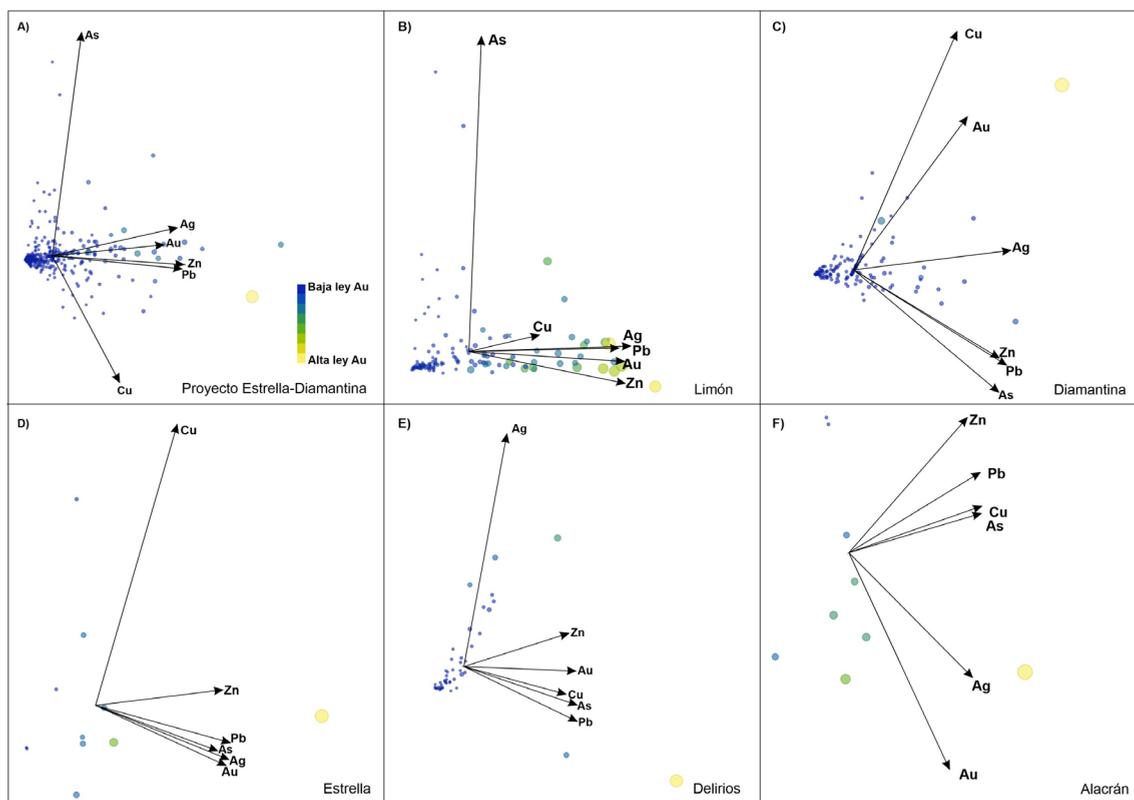
Los análisis de proyección lineal y de componentes principales (Figura 6) permitieron identificar que la asociación Au-Ag y metales base (Pb, Cu y Zn) presenta una correlación positiva homogénea (Figura 6A) para todo el *trend* mineralizado, exceptuando el sector de Delirios. Es evidente la asociación del Au-Ag con metales base y la nula correlación con As para el sector del Limón (Figura 6B). En el sector de Diamantina es posible reconocer una correlación positiva diferencial a otros sectores entre Au y Cu (Figura 6C). La correlación positiva de Au-As es únicamente observada en el sector norte (Estrella y Delirios) (Figura 6D y 6E). La asociación Au-Ag es dominante exceptuando el sector de Delirios (Figura 6E). La asociación Au-Cu es homogénea para todos los sectores excepto el sector de la Estrella (Figura 6D). Las asociaciones Au-Pb y Au-Zn presentan tendencias homogéneas en cada uno de los sectores exceptuando el sector de Alacrán (Figura 6F).

### Análisis de inclusiones fluidas

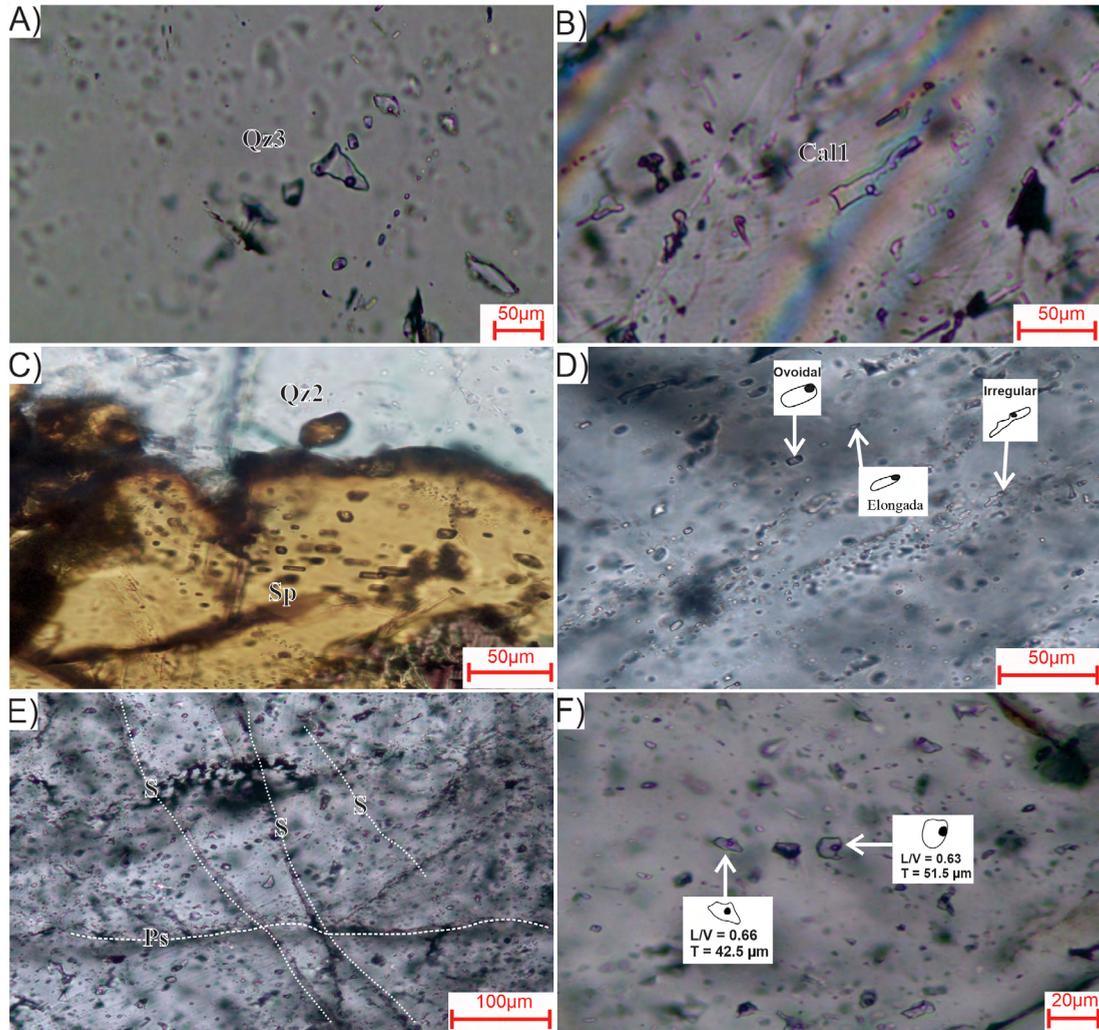
Diez secciones doblemente pulidas fueron analizadas petrográficamente para definir la temporalidad y su posición en la secuencia paragenética (Material Suplementario 2). En las muestras analizadas se observaron inclusiones fluidas hospedadas en cuarzo,

calcita y esfalerita (Figura 7A, 7B, 7C). Las inclusiones presentaron tamaños que van desde 11,86  $\mu\text{m}$  hasta 109,38  $\mu\text{m}$ , con formas tabulares, regulares, irregulares y ovoidales, que se desarrollan de manera aislada en trenes intragranulares o intergranulares (Figura 7D, 7E). Son principalmente inclusiones bifásicas líquido/vapor (L/V) con una relación promedio (L/V) de 0,72, donde predomina la fase líquida a temperatura ambiente (22 °C) (Figura 7F).

Las inclusiones fluidas analizadas fueron clasificadas como primarias, secundarias y pseudosecundarias, de acuerdo con Roedder (1984). En este trabajo se identificaron cuatro tipos de inclusiones fluidas subdivididos en ocho clases, con base en el mineral hospedante (*i. e.* Qz1, Qz2, Qz3, Cal1, Cal2 y Sp), su posición en la secuencia paragenética y sus características petrográficas. Las características petrográficas de las inclusiones fluidas analizadas se encuentran resumidas en la Tabla 2. Con base en las temperaturas eutécticas registradas, y siguiendo la propuesta de Borisenko (1977) en Shepherd *et al.* (1985), se identificó como sistema salino más aproximado  $\text{H}_2\text{O-NaCl}$  para todas las inclusiones fluidas analizadas.



**Figura 6.** Gráficos de componentes parciales en proyección lineal. **A.** *Trend* mineralizado Estrella-Diamantina. **B.** Sector Limón. **C.** Sector Diamantina. **D.** Sector Estrella. **E.** Sector Delirios. **F.** Sector Alacrán.



**Figura 7.** Características petrográficas de las inclusiones fluidas analizadas en este estudio. **A.** Inclusiones fluidas bifásicas primarias (P) hospedadas en cristales de cuarzo (Qz3). **B.** Inclusiones fluidas bifásicas secundarias (S) hospedadas en cristales de calcita (Cal1). **C.** Inclusiones fluidas bifásicas primarias (P) hospedadas en cristales de esfalerita (Sp). **D.** Morfologías de las inclusiones fluidas identificadas para set de inclusiones secundarias bifásicas. **E.** Inclusiones fluidas primarias (P), inclusiones fluidas secundarias (S) e inclusiones fluidas pseudosecondarias (Ps). **F.** Fotomicrografía de inclusiones indicando la relación líquido-vapor (LV) y tamaño relativo de la inclusión.

**Tabla 2.** Resumen de las propiedades petrográficas de los diferentes tipos de inclusiones fluidas identificadas en este estudio.

Tipo	Composición sistema (Borisenko, 1977)	Fases	Formas	Relación (L/V)	Tipo de inclusión (Roedder, 1984)	Mineral hospedante	Etapas mineralizante
Tipo Ia	H <sub>2</sub> O - NaCl	Bifásica	Ovoidales, irregular y regulares aisladas	0,60 a 0,90	Primaria	Qz1	E1
Tipo Ib	H <sub>2</sub> O - NaCl	Bifásica	Trenes irregulares, ovoidales y regulares	0,56 a 0,90	Secundaria	Qz1	E1

Continuación Tabla 2.

Tipo	Composición sistema (Borisenko, 1977)	Fases	Formas	Relación (L/V)	Tipo de inclusión (Roedder, 1984)	Mineral hospedante	Etapla mineralizante
Tipo IIa	H <sub>2</sub> O - NaCl	Bifásica	Ovoidales, irregulares y regulares aisladas	0,57 a 0,78	Primaria	Qz2	E2
Tipo IIb	H <sub>2</sub> O - NaCl	Bifásica	Trenes irregulares, tabulares, regulares y ovoidales	0,53 a 0,90	Secundaria	Qz2	E2
Tipo IIc	H <sub>2</sub> O - NaCl	Bifásica	Ovoidales, tabulares y regulares aisladas	0,59 a 0,72	Primaria	Sp	E2
Tipo IIId	H <sub>2</sub> O - NaCl	Bifásica	Irregulares y regulares aisladas	0,71 a 0,85	Primaria	Cal1	E2
Tipo III	H <sub>2</sub> O - NaCl	Bifásica	Irregulares, tabulares, regulares y ovoidales aisladas	0,53 a 0,90	Primaria	Qz3	E3
Tipo IV	H <sub>2</sub> O - NaCl	Bifásica	Ovoidales, irregulares y regulares aisladas	0,66 a 0,79	Secundaria	Cal2	E4

Utilizando el concepto de familia de inclusiones fluidas FIA (*Fluid Inclusion Assemblage*) propuesto por Goldstein (2003), se identificaron cuatro

familias de inclusiones fluidas, cuyas propiedades microtermométricas están resumidas en la Tabla 3.

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

FIA	Fases	Relación (L/V)	Mineral hospedante	Datos microtermométricos			Salinidad (Bodnar, 1993) (wt % NaCl)	Densidad (Oakes et al., 1990) (g/cc)
				Te (°C)	Tm-Ice (°C)	Th (°C)		
I	Bifásica	0,60 a 0,90	Qz1	-29,8 a -17,2	-8,3 a -0,3	188,6 a 225	3,14 a 12,05	1,01 a 1,51
		0,57 a 0,78	Qz2	-28,8 a -17,5	-6 a -1,3	156 a 201,5	2,24 a 10,5	1,02 a 1,15
II	Bifásica	0,59 a 0,72	Sp	-25,8 a -15,2	-6,5 a -1	187,2 a 210	1,75 a 9,86	1,02 a 1,15
		0,71 a 0,85	Cal1	-25,0 a -23,5	-1,8 a -1	181,6 a 185,7	1,74 a 3,06	1,02 a 1,03
III	Bifásica	0,73 a 0,90	Qz3	-24,1 a -18,4	-5,7 a -0,5	157 a 204	0,88 a 8,8	1,01 a 1,07
IV	Bifásica	0,66 a 0,79	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

**FIA I:** son inclusiones primarias, hospedadas en Qz1 (tipo IA) y asociadas a la primera etapa de mineralización (etapa I). Se presentan aisladas, con formas ovoidales, irregulares y regulares; son inclusiones bifásicas con una relación líquido/vapor (L/V) entre 0,60 y 0,90 que evidencia predominio de la fase líquida y tamaños que varían entre 18,16  $\mu\text{m}$  y 68,27  $\mu\text{m}$ . La homogenización (a líquido) ocurrió entre 188,6° y 225°C. Las temperaturas eutécticas ( $^{\circ}\text{Te}$ ) medidas (-29,8° a -17,2°C) sugieren que el NaCl es la sal principal en solución. Con base en las temperaturas de fusión del último hielo ( $^{\circ}\text{Tm-ice}$ ), las salinidades variaron entre 3,14% y 12,05% (%wt NaCl equiv.); fueron estimadas usando la propuesta de Bodnar (1993). La densidad, con base en Oakes *et al.* (1990), oscila entre 1,01 g/cc y 1,51 g/cc.

**FIA II:** son inclusiones fluidas bifásicas, con una relación líquido/vapor (L/V) que oscila entre 0,57 y 0,78, atrapadas en Qz2 (tipo IIA), Sp (tipo IIC) y Cal1 (tipo IID). Ocurren como *clusters* aislados interpretados como primarios directamente relacionados con la principal etapa mineralizante (etapa II), con tamaños que varían entre 14,89  $\mu\text{m}$  y 64,72  $\mu\text{m}$ . Las temperaturas eutécticas ( $^{\circ}\text{Te}$ ) medidas (-28,8° a -15,2°C) sugieren que el NaCl es la sal principal en solución. La homogenización (a líquido) ocurrió entre 156° y 210°C. Con base en las temperaturas de fusión del último hielo ( $^{\circ}\text{Tm-ice}$ ), las salinidades variaron entre 1,74% y 10,5% (%wt NaCl equiv.), y fueron estimadas usando la propuesta de Bodnar (1993). La densidad, con base en Oakes *et al.* (1990), oscila entre 1,02 g/cc y 1,15 g/cc.

**FIA III:** son inclusiones fluidas bifásicas primarias atrapadas en Qz3 (tipo III). Se observaron aisladas con formas ovoidales e irregulares, con tamaños que varían entre 18,06  $\mu\text{m}$  y 30,82  $\mu\text{m}$  y con una relación líquido/vapor (L/V) que oscila entre 0,73 y 0,90. La temperatura de homogeneización ( $^{\circ}\text{Th}$ ) (a líquido) varía entre 157° y 204°C. Con base en las temperaturas de fusión del último hielo ( $^{\circ}\text{Tm-ice}$ ), las salinidades variaron entre 0,88% y 8,8% (%wt NaCl equiv.) y fueron estimadas usando la propuesta de Bodnar (1993). Las temperaturas eutécticas ( $^{\circ}\text{Te}$ ) medidas (-24,1° a -18,4°C) sugieren que el NaCl es la sal principal en solución. La densidad, con base en Oakes *et al.* (1990), oscila entre 1,01 g/cc y 1,07 g/cc.

**FIA IV:** son inclusiones fluidas primarias bifásicas atrapadas en Cal2 (tipo IV), están asociadas a vetillas que cortan las vetas (Figura 5). Ocurren aisladas, con formas ovoidales regulares e irregulares, con tamaños que varían entre 15,85  $\mu\text{m}$  y 26,66  $\mu\text{m}$  y con una relación líquido/vapor (L/V) entre 0,66 y 0,79. Estas inclusiones registraron una temperatura de homogeneización

( $^{\circ}\text{Th}$ ) (a líquido) que varía entre 103,8 y 140°C. Las temperaturas eutécticas ( $^{\circ}\text{Te}$ ) medidas (-28,3° a -27,3°C) sugieren que el NaCl es la sal principal en solución. Con base en las temperaturas de fusión del último hielo ( $^{\circ}\text{Tm-ice}$ ), las salinidades variaron entre 0,18% y 3,71% (%wt NaCl equiv.) y fueron estimadas usando la propuesta de Bodnar (1993). La densidad, con base en Oakes *et al.* (1990), oscila entre 1,01 g/cc y 1,03 g/cc.

## Discusión de resultados

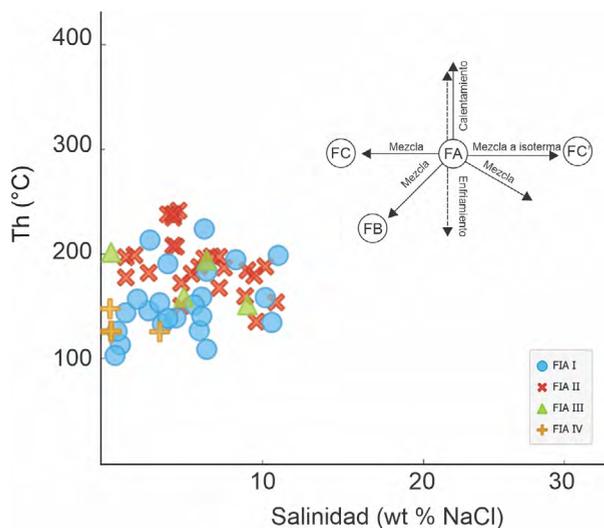
El modelamiento de las condiciones de formación de las mineralizaciones vetiformes presentes en el corredor Estrella-Diamantina fue llevado a cabo con base en los datos microtermométricos de inclusiones fluidas, la mineralogía presente, la alteración hidrotermal observada y los resultados químicos multielementales.

## Evolución del fluido mineralizante

Los datos microtermométricos de las inclusiones fluidas analizadas sugieren que por lo menos cuatro fluidos estuvieron vinculados en la formación de las vetas hidrotermales del proyecto Estrella-Diamantina. La primera etapa (etapa I) corresponde a un evento de premineralización aurífera con cristalización de cuarzo masivo (Qz1), acompañado de Py1, Ccp1, Po y Cbn. Las inclusiones medidas en Qz1 (FIA I) reportan valores de  $^{\circ}\text{Th}$  que oscilan entre 188,6° y 225°C, y salinidades, entre 3,14% y 12,05% (%wt NaCl equiv.). Esta etapa evidencia un evento rico en sílice, y el equilibrio pirita/pirrotina y cubanita/calcopirita/esfalerita (Figura 5) sugiere condiciones de pH ligeramente ácido y un ambiente ligeramente oxidado (Marshall *et al.*, 2004; Ramdohr, 2013). La segunda y principal etapa aurífera (etapa II) está caracterizada por la recristalización de cuarzo (Qz2) a partir de Qz1, formación de Cal1 y la cristalización de sulfuros de metales base como Py2, Sp, Gn1, Ccp2 y la depositación de Au1. Los valores reportados en inclusiones en Qz2, Sp y Cal1 (FIA II) presentan valores de  $^{\circ}\text{Th}$  entre 156° y 210°C y salinidades entre 1,74% y 10,5% (%wt NaCl equiv.). La tercera etapa mineralizante (etapa III) está definida por la cristalización de Qz3 y Qz4, con un bajo volumen de sulfuros como Gn2, Mk y Au2. Las inclusiones en Qz3 (FIA III) presentan valores de  $^{\circ}\text{Th}$  que oscilan entre 157° y 204°C, y salinidades de 0,88% y 8,8% (%wt NaCl equiv.). La cuarta etapa mineralizante (etapa IV) marca el cierre del sistema hidrotermal y está definida por vetillas de Cal2 con cristales de Py3 que cortan la secuencia anterior. Las inclusiones fluidas en Cal2 (FIA IV) presentan valores de  $^{\circ}\text{Th}$  entre 103° y 140°C, y salinidades de 0,18% y 3,71% (%wt NaCl equiv.).

La transición desde un fluido acuoso-salino premineralizante (etapa I) ligeramente salino (5,35 %wt NaCl equiv.) a uno más frío (121,5°C) y de baja salinidad podría estar asociada al ascenso normal de los fluidos hacia la superficie. Sin embargo, no es claro aún si la pérdida de temperatura y salinidad corresponde a una evolución progresiva del fluido durante su ascenso hacia superficie o refleja la mezcla de fluidos secundarios en el sistema hidrotermal (Figura 8). No fue posible identificar evidencias de separación de fases en las inclusiones fluidas (Drummond y Ohmoto, 1985; Ridley y Diamond, 2000). Esta observación precluye la hipótesis de una evolución progresiva del fluido hidrotermal. Por lo tanto, la evolución del fluido puede estar asociada con la incorporación de fluidos diferentes, secundarios al sistema hidrotermal durante su ascenso, y sugiere que las condiciones para el transporte del oro fueron alcanzadas localmente durante la circulación de un fluido acuoso de baja salinidad durante la etapa I, y durante la etapa II las condiciones para la precipitación del oro fueron alcanzadas.

La liberación de fluidos hidrotermales de baja salinidad con contenidos de metales y oro comenzó su ascenso. Estos fluidos hidrotermales tempranos (etapa I) depositaron contenidos significativos de cuarzo (Qz1) y sulfuros (Py1 principalmente). A medida que continuaba la migración hacia condiciones más someras de este fluido fueron incorporados fluidos secundarios acuosos de baja salinidad, y como resultado el fluido relacionado con la mineralización perdió salinidad y temperatura causando que la actividad del sulfuro en el sistema disminuyera, lo cual permitió de este modo que el oro y los metales base (etapa II) se precipitaran.



**Figura 8.** Relación entre la temperatura de homogeneización ( $^{\circ}$ Th) y la salinidad (modificado de Velasco, 2004).

### Transporte y precipitación del oro

Las inclusiones fluidas, la asociación mineralógica y la alteración hidrotermal son una evidencia directa de las condiciones de temperatura, salinidad y pH del fluido hidrotermal mineralizante (Klein *et al.*, 2005). La alteración filica dominante, la coexistencia de piritita-clorita, la presencia de pirrotina y la ausencia de hematita en la mineralización sugieren unas condiciones ligeramente reducidas para el fluido hidrotermal. La asociación sericita-carbonato (calcita) también sugiere unas condiciones neutrales ligeramente alcalinas (Klein *et al.*, 2005). Las inclusiones fluidas analizadas presentan salinidades bajas (5,35 %wt NaCl) que bajo las condiciones de pH neutral anteriormente mencionadas indican que las especies ligantes  $H_2S$  o  $HS^-$  son dominantes y permiten sugerir que los iones complejo  $Au (HS)^{2-}$  o  $Au (HS)$  fueron el medio más factible para transportar el oro. Este es un mecanismo de transporte común en los depósitos de oro orogénico (Shenberger y Barnes, 1989; Benning y Seward, 1996; Moritz, 2000; Ridley y Diamond, 2000; Groves *et al.*, 2003; Goldfarb *et al.*, 2005; Phillips y Powell, 2010; Saunders *et al.*, 2014; Seward *et al.*, 2014). En el corredor mineralizado Estrella-Diamantina el oro ocurre como pequeñas inclusiones en piritita (Py1), como partículas libres asociadas a cuarzo (Qz1) y como relleno de microfracturas con metales base (esfalerita, galena y calcopiritita), indicando diferentes mecanismos de precipitación.

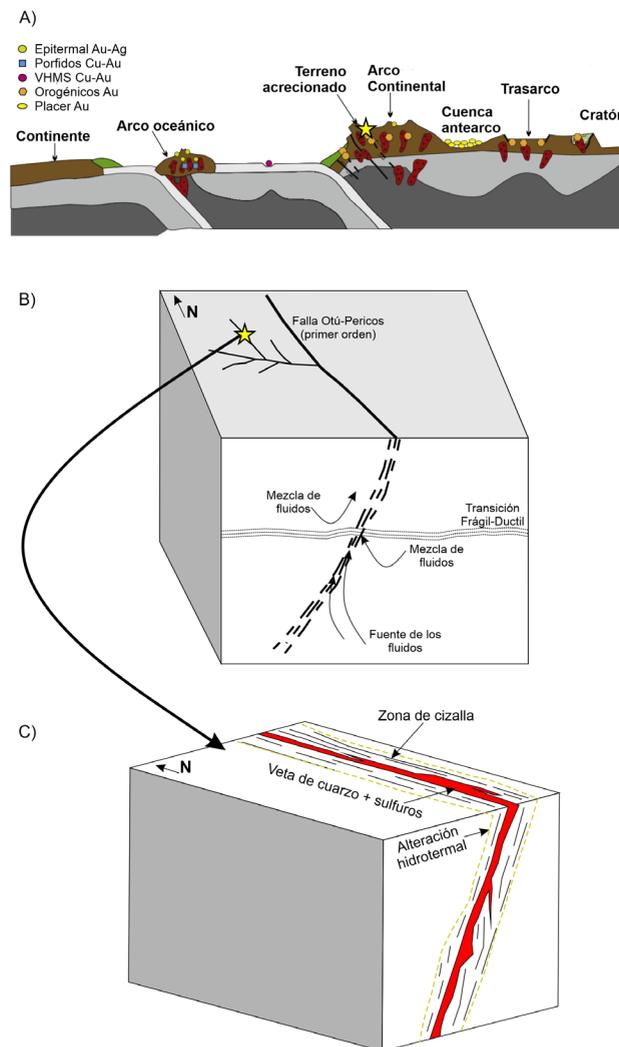
La presencia de calcita sugiere un fluido con  $CO_2$ . La remoción del  $CO_2$  del fluido mineralizante por disociación para formar carbonatos elevaría el pH de la solución y la actividad del ion  $CO_3$  favorecería la precipitación de calcita (Rimstidt, 1997). Adicionalmente, la remoción de  $CO_2$  del fluido decrecería la temperatura del sistema y la actividad del complejo bisulfurado (Drummond y Ohmoto, 1985; Ridley y Diamond, 2000; Seward *et al.*, 2014). Al mismo tiempo, la disminución del S decrece debido a la volatilización del  $H_2S$  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  $Au (HS)$ , alcanzando de este modo la precipitación del oro (Shenberger y Barnes, 1989; Benning y Seward, 1996; Rimstidt, 1997; Saunders *et al.*, 2014).

### Modelo genético para el depósito

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.*, 2019). El proyecto

Estrella-Diamantina se encuentra ubicado en un límite de terrenos acrecionados (Figura 9A) (Rodríguez y Pernet, 1983; Cediél *et al.*, 2003; Moreno-Sánchez *et al.*, 2020; Restrepo y Toussaint, 2020), en una zona de cizalla con deformación frágil-dúctil, que controla la mineralización, y cuyas vetas están emplazadas en estructuras de 2-3 orden (Figura 9B). Para el área de estudio, diversos autores (Ayala y Montoya, 2004; López, 2004; Castaño-Dávila, 2017; Serna-Peña, 2020) 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 y Montoya (2004), la mineralización en el sector Limón aprovechó los espacios vacíos generados por las fallas y formó “filones de fisura” (Figura 9C). 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 con una alteración predominantemente sericitica (Ayala y Montoya, 2004; López, 2004; Castaño-Dávila, 2017; Castaño-Dávila *et al.*, 2019; 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.



**Figura 9.** Diagramas esquemáticos. **A.** Configuración tectónica de diferentes depósitos minerales con base en Goldfarb y Groves (2015). **B.** Localización de depósitos vetiformes en estructuras de segundo-tercer orden relacionadas con estructuras de primer orden (sistema de fallas Otú-Pericos) como conductos preferentes para la migración de los fluidos mineralizantes desde su fuente, de acuerdo con Hagemann y Cassidy (2000). **C.** Diagrama esquemático que ilustra la geometría entre la veta de cuarzo y sulfuros, la zona de cizalla y la zona de alteración. Tomado y modificado de Dubé y Gosselin (2007). La estrella amarilla indica la localización interpretada del *trend* mineralizado Estrella-Diamantina.

Adicional a las características geológicas y estructurales anteriormente descritas, los análisis multielementales permitieron identificar las asociaciones Au-Ag, Au-Pb, Au-Zn y Au±Cu como las asociaciones principales a lo largo del tren mineralizado. Estas asociaciones se ven representadas en la mineralogía (galena, esfalerita y calcopirita) y descartan la presencia de minerales como telururos, cinabrio, estibina y adularia en la mineralización. Las bajas salinidades y temperaturas de homogeneización registradas y la no identificación de zonas de ebullición en el análisis de inclusiones fluidas son características que permiten proponer un modelo de tipo oro orogénico (*lode-gold*) en dominio mesozonal para las mineralizaciones de Au-Ag del proyecto Estrella-Diamantina, en el sentido de Groves *et al.* (1998), Moritz (2000), Goldfarb *et al.* (2005), Hart y Goldfarb (2005), Goldfarb y Groves (2015), Goldfarb y Pitcairn (2023).

## Conclusiones

El desarrollo de la mineralización vetiforme en el proyecto Estrella-Diamantina se generó por lo menos en cuatro etapas: una etapa de premineralización (etapa I) caracterizada por la formación de cuarzo masivo (Qz1), pirita (Py1), calcopirita (Ccp1), pirrotina (Po1) y cubanita (Cbn). La etapa II, directamente relacionada con la mineralización de oro, cuarzo recristalizado (Qz2) y sulfuros de metales base (calcopirita, esfalerita y galena) con contenidos menores de pirita (Py2) y calcita (Cal1). Una etapa posterior de mineralización (etapa III) con bajos contenidos de oro (Au2), galena (Gn2) y melnikovita (Mk). Por último, una etapa de postmineralización (etapa IV) caracterizada principalmente por venillas de calcita (Cal2) y pirita (Py3).

Con base en los datos microtermométricos, el fluido responsable de la principal etapa mineralizante de oro (etapa II) está relacionado con el sistema NaCl-H<sub>2</sub>O, con salinidades bajas (10,5 %wt NaCl equiv.) y con temperaturas de homogeneización entre 156° y 210° C.

Todas las inclusiones analizadas en este estudio presentan bajas salinidades; la asociación mineralógica observada sugiere que el fluido era ligeramente alcalino a neutral. Así mismo, la ausencia de hematita, la presencia de pirrotina y la coexistencia de pirita-clorita indican que el fluido era reducido. Bajo estas condiciones, el transporte del oro por medio de complejos clorurados no es un mecanismo efectivo (Hayashi y Ohmoto, 1991). En consecuencia, las

especies ligantes como H<sub>2</sub>S o HS<sup>-</sup> son dominantes y, por consiguiente, permiten proponer que los iones complejos Au (HS)<sup>2-</sup> o Au (HS) fueron el medio más factible para transportar el oro. Este es un mecanismo de transporte común en los depósitos de oro orogénico (Shenberger y Barnes, 1989; Benning y Seward, 1996; Rimstidt, 1997; Saunders *et al.*, 2014).

Las características microtermométricas del fluido mineralizante en el proyecto Estrella-Diamantina comparten similitudes con los depósitos de oro orogénico. Aunque estas características de salinidad, sistema salino y temperatura (de homogeneización) son similares (en parte) a fluidos relacionados con depósitos epitermales, algunos aspectos clave precluyen esta observación: 1) ausencia de adularia, 2) ausencia de texturas crustiformes-coloformes relacionadas a la depositación del oro y 3) el ambiente estructural.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Soma Gold Corp y Operadora Minera S. A. S. por el acceso y financiación de este trabajo. También a Diego Loaiza y Sebastián Hernández por sus comentarios y recomendaciones durante las primeras etapas de esta investigación. Así mismo, los autores agradecen a los revisores anónimos por sus observaciones y sugerencias que mejoraron este trabajo.

## Referencias

- Álvarez-Galíndez, M.; Ordóñez-Carmona, O.; Valencia-Marín, M.; Romero-Hernández, A. (2007). Geología de la zona de influencia de la falla Otú en el distrito minero Segovia-Remedios. *Dyna*, 74(153), 41-51.
- Arango-Escobar, J.E.; Toro-Toro, L.M.; Moreno-Sánchez, M.; Ruíz-Jiménez, E.C. (2021). Petrografía y evolución tectónica de los esquistos del Complejo Arquía, al occidente de Manizales en el sector de La Manuela, vías Palestina y Chinchiná, Colombia. *Boletín de Geología*, 43(3), 63-86. <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n3-2021003>
- Ayala, J.; Montoya, P. (2004). Ambiente geológico y caracterización mineralógica de la mina El Limón y sus alrededores, Zaragoza-Antioquia. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

- Bakker, R.J. (2003). Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 194(1-3), 3-23. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00268-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00268-1)
- Barnes, H. (1997). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. John Wiley y Sons, 3ra edición. <https://doi.org/10.1017/S0016756898431509>
- 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*, 60(11), 1849-1871. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00061-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00061-0)
- Bodnar, R. (1993). Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3), 683-684. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90378-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90378-A)
- Bodnar, R.J.; Vityk, M.O. (1994). Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions. In: B. De Vivo, M.L. Frezzotti (eds.). *Fluid inclusions in minerals: Methods and applications* (pp. 117-130). Virginia Tech.
- Bogotá, J.; Aluja, J. (1981). Geología de la Serranía de San Lucas. *Geología Norandina*, 4, 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*, 18, 11-19.
- 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. Tesis de maestría, Universidad de Caldas, Manizales.
- 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*, 41(3), 107-125. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2019005>
- Cediel, F.; Shaw, R.P.; Cáceres, C. (2003). Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. In: C. Bartolini; R.T. Buffler; J.F. Blickwede (eds.). *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics* (pp. 815-848). AAPG. <https://doi.org/10.1306/M79877C37>
- Clavijo, J.; Mantilla, L.; Pinto, J.; Bernal, L.; Pérez, A. (2008). Evolución geológica de la Serranía de San Lucas, norte del Valle Medio del Magdalena y noroeste de la Cordillera Oriental. *Boletín de Geología*, 30(1), 45-62.
- Dowling, K.; Morrison, G. (1989). Application of quartz textures to the classification of gold deposits using North Queensland examples. In: R. Keays, W. Ramsay, D. Groves (eds.). *Economic Geology Monograph* (pp. 342-355). Economic Geology Publishing Co. <https://doi.org/10.5382/Mono.06.26>
- Drummond, S.E.; Ohmoto, H. (1985). Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology*, 80(1), 126-147. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.1.126>
- Dubé, B.; Gosselin, P. (2007). Greenstone-hosted quartz -carbonate vein deposits. In: W.D. Goodefellow (ed.). *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods* (pp. 1-13). Geological Association of Canada.
- Echeverri, B. (2006). Genesis and Thermal History of Gold Mineralization in the Remedios - Segovia - Zaragoza Mining District of Northern Colombia. Tesis de Maestría, Universidad de Shimane. Matsue, Japón.
- Feininger, T.; Barrero, D.; Castro, N. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Sub-Zona II-B). *Boletín Geológico*, 20(2), 1-173. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol20.2.1972.321>
- 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*, 26(8), 1521-1529. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.11.028>

- Giraldo-Osorio, D.A.; Loaiza-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. Tesis, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Goldfarb, R.J.; Baker, T.; Dubé, B.; Groves, D.I.; Hart, C.; Gosselin, P. (2005). Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terran. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson; R.J. Goldfarb; J.P. Richards (eds). *One Hundredth Anniversary Volume* (pp. 407-450). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/AV100.14>
- Goldfarb, R.J.; Groves, D.I. (2015). Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>
- Goldfarb, R.J.; Pitcairn, I. (2023). Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? *Mineralium Deposita*, 58, 5-35. <https://doi.org/10.1007/s00126-022-01146-8>
- Goldstein, R.H. (2003). Petrographic analysis of fluid inclusions. In: I. Samson, A. Anderson, D. Marshall (eds). *Fluid inclusions: Analysis and interpretation* (pp. 9-53). Vol. 32, Mineralogical Association of Canada. <https://doi.org/10.3749/9780921294672.ch02>
- Gómez-Tapias, J.; Montes-Ramírez, N.E.; Marín, E. (2023). Mapa Geológico de Colombia 2023. Escala 1:1 500 000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá.
- González, H. (2001). *Mapa Geológico de Antioquia Escala 1:400000*. INGEOMINAS.
- González, J.; Terán, B.; Ordóñez-Carmona, O. (2010). Geología de la Parte Oriental del Distrito Minero Segovia - Remedios. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 28, 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*, 13(1-5), 7-27. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00012-7)
- 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*, 98(1), 1-29. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.1.1>
- Hagemann, S.G., Cassidy K.F. (2000). Archean Orogenic Lode Gold Deposits. In: S.G. Hagemann; P.E. Brown (eds.). *Reviews in Economic Geology, Gold in 2000* (pp. 9-68). Society of Economic Geologist. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.01>
- Hall, R.; Feininger, T.; Barrero, D.; Rico, H.; Álvarez, J. (1970). Recursos minerales de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas. *Boletín Geológico*, 18(2), 1-90. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol18.2.1970.55>
- Hart, C.J.; Goldfarb, R.J. (2005). Distinguishing intrusion-related from orogenic gold systems. *New Zealand Minerals Conference*, Auckland, Nueva Zelanda.
- Hayashi, K.I.; Ohmoto, H. (1991). Solubility of gold in NaCl- and H<sub>2</sub>S-bearing aqueous solutions at 250-350°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(8), 2111-2126. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90091-I](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90091-I)
- Klein, E.L.; Harris, C.; Giret, A.; Moura, C.; Angelica, R.S. (2005). Geology and isotope (O, H, C, S) constraints on the genesis of the Cachoeira gold deposit, Gurupi belt, northern Brazil. *Chemical Geology*, 221(3-4), 188-206. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.05.003>
- Leal-Mejía, H. (2011). Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes: A tectono-magmatic approach. Tesis Doctoral, 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. In: F. Cediél, R.P. Shaw (eds). *Geology and Tectonics of Northwestern South America* (pp. 253-410). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_5)

- Londoño, C.; Montoya, J.C.; Ordóñez, O.; Restrepo, J.J. (2009). Características de las mineralizaciones vetiformes en el Distrito Minero Bagre - Nechí, Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 26, 29-38.
- López, D. (2004). Distribución de Zonas de Enriquecimiento Mineral y Modelamiento Estructural, Mina El Limón, Zaragoza-Antioquia. Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- 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*, 32, 47-60.
- Marshall, D.D.; Anglin, C.D.; Mumin, A.H. (2004). *Ore mineral atlas. Geological Association of Canada*. Mineral Deposits Division.
- Maya, M.; González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico*, 35(2-3), 44-57. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol35.2-3.1995.316>
- 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 interno para la 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. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Moreno-Sánchez, M.; Gómez-Cruz, A.; Buitrago-Hincapié, J. (2020). Paleozoic of Colombian Andes: New Paleontological Data and Regional Stratigraphic Review. In: J. Gómez, D. Mateus, E. Marín (eds). *The Geology of Colombia*, (pp. 167-203). Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.09>
- Moritz, R. (2000). 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.; Alvarán-Echeverri, M.; Zapata-Cardona, E. (2016). Análisis metalogenético preliminar del depósito vetiforme en mina La Ye, Antioquia-Colombia: características geológicas, isotópicas y estructurales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(3), 316-328.
- Naranjo-Sierra, E.; Alvarán-Echeverri, M. (2018). Características geológicas, isotópicas y estructurales del depósito vetiforme Los Mangos, Antioquia-Colombia. *Boletín de Geología*, 40(1), 93-108. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018006>
- 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*, 24(3), 245-257. <https://doi.org/10.15446/esrj.v24n3.80653>
- Oakes, C.S.; Bodnar, R.J.; Simonson, J.M. (1990). The system NaCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: I. The ice liquidus at 1 atm total pressure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3), 603-610. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90356-P](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90356-P)
- Ordóñez-Carmona, O.; Valencia-Marín, M.; Álvarez-Galíndez, M.J.; Sánchez-Arredondo, L.H.; Castaño-Gallego, L.C.; Echeverri, B. (2005). Metalogenia y evolución tectonomigmatítica del distrito minero Segovia - Remedios, Primera Aproximación. *X Congreso Colombiano de Geología*. Bogotá.
- Owona, S.; Ondo, J.M.; Ekodeck, G.E. (2013). Evidence of quartz, feldspar and amphibole crystal plastic deformations in the paleoproterozoic Nyong Complex Shear Zones under Amphibolite to Granulite conditions (west Central African Fold Belt, SW Cameroon). *Journal of Geography and Geology*, 5(3). <https://doi.org/10.5539/jgg.v5n3p186>
- Phillips, G.N.; Powell, R. (2010). Formation of gold deposits: a metamorphic devolatilization model. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(6), 689-718. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00887.x>
- 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*, 11(3), 189-193. <https://doi.org/10.18814/epiuiugs/1988/v11i3/006>
- Restrepo, J.J.; Ordóñez-Carmona, O.; Armstrong, R.; Pimentel, M.M. (2011). Triassic metamorphism in the northern part of the Tahamí Terrane of the central cordillera of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 32(4), 497-507. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.04.009>
- Restrepo, J.J.; Toussaint, J.F. (2020). Tectonostratigraphic Terranes in Colombia: An Update First Part: Continental Terranes. In: J. Gómez, D. Mateus, E. Marín (eds.). *The Geology of Colombia* (pp. 37-63). Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>
- Ridley, J.R.; Diamond, L.W. (2000). Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models. *SEG Reviews*, 141-162. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.04>
- Rimstidt, J.D. (1997). Quartz solubility at low temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(13), 2553-2558. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00103-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00103-8)
- Rodríguez, C.J.; Pernet, A. (1983). Recursos minerales de Antioquia. *Boletín Geológico*, 26(3), 2-116. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol26.3.1983.247>
- Roedder, E. (1984). Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*, 12, 149-220. <https://doi.org/10.1515/9781501508271>
- Saunders, J.A.; Hofstra, A.H.; Goldfarb, R.J.; Reed, M.H. (2014). Geochemistry of Hydrothermal Gold Deposits. In: K.K. Turekian, H.D. Holland (eds.). *Treatise on Geochemistry* (pp. 383-424). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01117-7>
- 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. Tesis de maestría, Universidad de Caldas, Manizales.
- Seward, T.M.; Williams-Jones, A.; Migdisov, A. (2014). The Chemistry of Metal Transport and Deposition by Ore-Forming Hydrothermal Fluids. In: K.K. Turekian, H.D. Holland (eds.) *Treatise on Geochemistry* (pp. 29-57). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01102-5>
- Shaw, R.P. (2000). Gold mineralization in the Northern Andes - Magmatic setting vs metallogeny. *International Mining Congress XI*. Bogotá.
- Shaw, R.P.; Leal-Mejía, H.; Melgarejo i Draper, J.C. (2019). Phanerozoic Metallogeny in the Colombian Andes: A Tectono - Magmatic Analysis in Space and Time. *Geology and Tectonics of Northwestern South America: The Pacific-Caribbean-Andean Junction*, 411-549. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_6)
- Shenberger, D.M.; Barnes, H.L. (1989). Solubility of gold in aqueous sulfide solutions from 150 to 350°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(2), 269-278. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90379-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90379-7)
- Shepherd, T.; Rankin, A.; Alderton, D. (1985). *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Mineralogical Magazine. <http://doi.org/10.1180/minmag.1986.050.356.32>
- Sillitoe, R.H. (2008). Major Gold Deposits and Belts of the North and South American Cordillera: Distribution, Tectonomagmatic Settings, and Metallogenic Considerations. *Economic Geology*, 103(4), 663-687. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.4.663>
- 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*, 27(1), 95-139. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.06.004>
- Stipp, M.; Stünitz, H.; Heilbronner, R.; Schmid, S.M. (2002). Dynamic recrystallization of quartz: correlation between natural and experimental conditions. *Geological Society, London, Special Publications*, 200(1), 171-190. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.200.01.11>

- Varona-Bravo, D.; Naranjo-Sierra, E.; Toro, L.M. (2016). Características geoquímicas y petrográficas del stock El Carmen en el distrito minero El Bagre. Operadora Minera S.A.S.
- 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*, 95(1), 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Zapata-Cardona, E.; Hernández-González, J.S.; Quiceno-Colorado, J.A.; Ruiz-Jiménez, E.C.; Moreno-Sánchez, M.; Naranjo-Sierra, E.; Toro-Toro, L.M.; Rincón-Alape, J. (2023). Petrogenesis and tectonic implications of the carboniferous El Carmen Pluton, central Colombian Andes: insights from whole-rock and mineral geochemistry, in situ zircon Lu–Hf isotopes and U–Pb geochronology. *International Geology Review*. <https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2286481>

---

---

Fecha de recibido: 16 de julio de 2023

Fecha de aceptado: 17 de abril de 2024

---

---