

Análisis metalogenético preliminar del depósito vetiforme en la mina La Ye, Antioquia, Colombia: características geológicas, isotópicas y estructurales

Edwin Naranjo-Sierra¹, Mauricio Alvaran-Echeverri² y Eliselder Zapata-Cardona³

¹Operadora Minera S.A.S., Cra. 43^A N° 14-109, Edificio Nova Tempo, Medellín, Colombia.

²Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Caldas, Cl. 65 N° 30-10, Manizales, Colombia.

³Consultor Independiente. Cl. 48 N° 19-48, Manizales, Colombia.

* edwin.naranjo@operadoraminera.com.co

RESUMEN

La mina La Ye es un depósito vetiforme encajado en una zona de cizalla con deformación frágil-dúctil que generó milonitización de la roca encajonante, estructuras sigmoidales, *boudinage* y contactos veta-caja reactivados con presencia de salbanda (*gauge*). Al menos cuatro eventos de deformación fueron identificados, de los cuales dos están relacionados al proceso de mineralización: $Qz + Py \pm Au$ para sectores con dominio D2 (cizallas destrales) y $Qz + Py + Cp + Gn +$ teluros de Au-Ag + teluros de Pb + Au para sectores con dominio D3 (cizallas sinestrales). Las alteraciones hidrotermales y la asociación paragenética observada permite sugerir que especies como H_2S o HS fueron dominantes en los fluidos mineralizantes y, en consecuencia, el complejo $Au(HS)_2^-$ fue probablemente el ligante y el medio de transporte del Au. La presencia de texturas de recristalización tipo *Bulging* permiten inferir condiciones de temperatura bajas (<350 °C) y condiciones de deformación frágil-dúctil. Los valores isotópicos de $\delta^{18}O$ en moscovitas hidrotermales para el primer evento de mineralización, asociadas a D2 están entre +7.4 y +8.9‰, y los valores de δD varían entre -49 y -50‰. Los valores isotópicos de $\delta^{18}O$ en moscovitas hidrotermales para el segundo evento mineralizante, asociadas a D3, varían entre +7.3 y +8.6‰ y los valores de δD varían entre -46 y -57‰. Los valores de azufre $\delta^{34}S$ en pirita asociada a D2 varían entre +3.7 y +4.9‰ y entre +3.95 y +5‰ para pirita asociada a D3. Estos valores isotópicos de $\delta^{18}O$, δD y $\delta^{34}S$ muestran una afinidad magmática y/o metamórfica para el fluido mineralizante. Las características geológicas del depósito, incluyendo control estructural, mineralogía, roca encajonante, alteración hidrotermal, estilo de mineralización y composición isotópica de $\delta^{18}O$, δD y $\delta^{34}S$, indican que el depósito en la mina La Ye es compatible con el modelo de depósitos de oro orogénico (*Orogenic Gold Deposits*) del subtipo: Depósitos de Filones Auríferos Hospedados en Granitoideas (*Granitoid-Hosted Lode-gold Deposits*).

Palabras clave: oro orogénico; vetiforme; zona de cizalla; teluros; isotópos estables; mina La Ye, Colombia.

ABSTRACT

La Ye is a shear-zone hosted lode gold type deposit with brittle-ductile deformation which produced wallrock mylonitization, sigmoidal structures, boudinage and reactivation of vein-wallrock contact. At least four deformation events were identified, two of them are related to mineralization processes: $Qz + Py \pm Au$ for D2 sectors (dextral shear zones) and $Qz + Py + Cp + Gn + Au-Ag$ tellurides + Pb tellurides + Au for D3 sectors (sinistral shear zones). Hydrothermal alterations and paragenetic association suggest that H_2S or HS ligand species were the predominant sulfur species in ore fluids and, in consequence, $Au(HS)_2^-$ was likely the gold-transporting complex. Recrystallized quartz textures suggest low temperature (<350 °C) and brittle-ductile conditions. The $\delta^{18}O$ values of hydrothermal muscovite associated to first mineralization stage and D2 event are +7.4 y +8.9‰, and the δD values are -49 y -50‰. The $\delta^{18}O$ values of hydrothermal muscovite associated to second mineralization stage (and main event) and D3 event are +7.3 y +8.6‰, and the δD values are -46 y -57‰. The $\delta^{34}S$ values of pyrite associated to first mineralization stage and D2 event are +3.7 y +4.9‰ and $\delta^{34}S$ values of pyrite associated to second mineralization stage (and main event) and D3 event are +3.95 y +5‰. These isotopic values are compatible with a magmatic and/or metamorphic origin for the ore fluids. These geological characteristics including structural controls, nature host-rock, hydrothermal alterations, mineralization style and isotopic composition of $\delta^{18}O$, δD and $\delta^{34}S$ suggest that La Ye deposit is compatible with the Orogenic Gold Deposits of Granitoid-Hosted Lode-gold Deposits subtype.

Key words: orogenic gold; lode; shear zone; tellurides; stable isotopes; mina La Ye, Colombia.

INTRODUCCIÓN

El distrito minero El Bagre, localizado en el noreste del departamento de Antioquia en la Cordillera Central de Colombia ha sido ampliamente reconocido como un importante distrito de explotación

de oro aluvial y mineralizaciones de tipo vetiforme (Londoño *et al.*, 2009; Sillitoe, 2008; y Shaw, 2000). Hacia el sector sur de este distrito, en las inmediaciones del municipio de El Bagre, la geología está conformada por rocas plutónicas de edad carbonífera pertenecientes al *stock* de El Carmen (Leal-Mejía, 2011). Varias estructuras vetiformes están hospedadas en este cuerpo ígneo intrusivo, explotadas mayoritariamente por trabajos mineros subterráneos artesanales, carentes de análisis y estudios geológicos.

Uno de los depósitos vetiformes de Au-Ag más importantes del área es la mina La Ye, una explotación subterránea cuya producción anual promedio alcanza las 25,000 onzas de Au. En la veta de esta mina predomina el cuarzo, acompañado de calcita, sericita, clorita, sulfuros y óxidos de Fe (goethita). La pirita es el sulfuro dominante, con cantidades variables de galena, calcopirita, oro, telururos de Au-Ag y telururos de plomo, representados por hessita, silvanita y altaita. La mineralización vetiforme está controlada por una zona de cizalla de 2.2 km de largo por 5.0 m de ancho, con un espesor de veta promedio de 1.15 m. La estructura se encuentraemplazada en una zona de cizalla de tipo sinestral-inversa bajo un régimen de deformación frágil-dúctil, en la cual se identificaron al menos cuatro eventos de deformación (D1, D2, D3 y D4), que generaron milonitización de la roca caja, estructuras sigmoidales, *boudinage* y contactos veta-caja reactivados con presencia de salbanda (Londoño *et al.*, 2009 y Starling, 2014 y 2015). La mineralización se encuentra asociada a los eventos D2 y D3.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo un muestreo sistemático del material de veta y de la roca caja alterada hidrotermalmente en los niveles dos, tres y cuatro de la mina La Ye. El análisis mineralógico, microscópico, paragenético y textural (*i.e.*, cuarzo y minerales de mena) se llevó a cabo en el laboratorio de Yacimientos Minerales de la Universidad de Caldas en un microscopio petrográfico-metalográfico marca Nikon 200i Pol. El análisis de microscopía óptica de mena fue complementado con un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando un equipo JEOL JMS 5910LV, con detectores BEI (*Backscattered Electron Image*) y SEI (*Secondary Electron Image*) para la generación de imágenes y detectores EDS (*Energy Dispersive Spectrometer*) y WDS (*Wavelength Dispersive Spectroscopy*) para análisis químico cualitativo y cuantitativo en muestras conductoras y no conductoras perteneciente al Laboratorio de Microscopía Avanzada de la Universidad Nacional sede Medellín. Adicionalmente se realizaron análisis multielementales (32 elementos) en el Laboratorio ACTLABS con tratamiento de agua regia y posterior análisis de ICP-MS en un equipo Perkin Elmer Sciex ELAN 9000. Por último se complementó con análisis de isótopos estables de hidrógeno, oxígeno (δD , $\delta^{18}O$ en moscovita hidrotermal) y azufre ($\delta^{34}S$ en pirita) en el laboratorio ACTLABS, con el fin de determinar la naturaleza y posible fuente de los fluidos que dieron origen a la mineralización aurífera de la mina La Ye. Las muestras para el análisis de $\delta^{18}O$ se hicieron reaccionar con BrF_5 a ~ 650 °C en bombas de níquel siguiendo el procedimiento definido por Clayton y Mayeda (1963). Los análisis isotópicos de $\delta^{18}O$ fueron realizados en un espectrómetro de masas Finnigan MAT. Las muestras para el análisis de δD se desgasificaron en vacío a 120 °C durante cuatro horas para eliminar el agua adsorbida en la superficie y se volvió a calentar inductivamente a 1,400 °C. El agua acumulada que representa la cantidad total de hidrógeno en las muestras se separó de los otros gases mediante técnicas diferenciales de congelación. El agua se hizo reaccionar con uranio a 900 °C para producir H_2 y se recogió en carbón a -196 °C. El volumen de H_2 se midió manométricamente. Los análisis isotópicos de δD fueron realizados en un espectrómetro de masas convencional. Los valores isotópicos de

δD y $\delta^{18}O$ se reportaron en *per mil* (‰) respecto al estándar VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*) con reproductibilidad de los valores de $\pm 0.2\text{‰}$. Las muestras para el análisis de $\delta^{34}S$ fueron quemadas a gas SO_2 . El SO_2 es injectado directamente a la fuente ionizada de un espectrómetro de masas VG602, siguiendo el procedimiento definido por Ueda y Krouse (1986). Los valores de $\delta^{34}S$ se reportan en *per mil* (‰) respecto al estándar CDT (*Cañon Diablo Troilite*), con reproductibilidad de los valores mejores a 0.2‰.

AMBIENTE GEOLÓGICO

Según Londoño *et al.* (2009), el depósito vetiforme de Au-Ag de la mina La Ye se encuentra encajonado en rocas plutónicas jurásicas de composición tonalítica que históricamente han sido asociadas en mapas regionales al batolito de Segovia (Cediel y Cáceres, 2000 y Londoño *et al.*, 2009). Sin embargo, los estudios petrográficos, geoquímicos y dataciones U-Pb SHRIMP realizadas por Leal-Mejía (2011), permitieron a este autor separar el cuerpo ígneo hospedante de las mineralizaciones vetiformes del distrito El Bagre del batolito de Segovia y proponer de manera informal el nombre de *stock* El Carmen. A nivel regional, la principal estructura al occidente es la falla Otú con una disposición NS a NNW cerca al municipio de Zaragoza, con un movimiento interpretado como sinestral, que pone en contacto rocas plutónicas carboníferas del *stock* El Carmen con rocas metamórficas permo-triásicas agrupadas regionalmente como Complejo Cajamarca (Londoño *et al.*, 2009). La falla Otú es la expresión más septentrional del sistema de fallas Otú-Pericos la cual limita el terreno Chibcha del Tahamí (Restrepo y Toussaint, 1988). Al este se encuentra la falla El Bagre interpretada regionalmente como una falla de cabalgamiento, que pone en contacto al batolito de Segovia con rocas metamórficas precámbricas agrupadas en el Gneis de San Lucas. Hacia el sureste se encuentran depósitos volcánico-sedimentarios de Segovia y hacia el norte se encuentran las rocas sedimentarias de la Formación Caucasia, la Formación Tarazá y los depósitos recientes de los ríos Nechí y Tiguí, que enmascaran la traza de la falla Otú y cubren discordantemente las rocas graníticas del batolito de Segovia (Londoño *et al.*, 2009) y el *stock* El Carmen (Figura 1).

GEOLOGÍA DEL DEPÓSITO

La mina La Ye es un depósito vetiforme de cizalla, encajonado en intrusivo y dominado composicionalmente por cuarzo y en menor proporción calcita, sericita, clorita, pirita, sulfuros de metales base (Pb, Cu, Zn), oro y telururos de Au-Ag y Pb. Actualmente, esta mina subterránea tiene cuatro niveles de explotación con una extensión en el sentido del rumbo de 2.2 km, en sentido del buzamiento 300 m y un espesor promedio de veta de 1.15 m. Esta estructura está desplazada por zonas de fallas inversas de bajo ángulo denominadas de norte a sur: La Láspida, Naranjal, La Ye y San Pedro (Figura 2). La mineralización vetiforme de Au-Ag se encuentra hospedada en el *stock* El Carmen (Leal-Mejía, 2011). Localmente, este cuerpo plutónico corresponde a una tonalita leucocrática, de grano medio a grueso, fanerítica y de composición mineral simple: con cuarzo, plagioclásas y biotita como único mineral máfico (Barrientos, 2007). Las muestras frescas de núcleos de perforación diamantina evidencian, a nivel geoquímico, un contenido de SiO_2 entre 50-78% (en peso), afinidad calcoalcalina, carácter metaluminoso a ligeramente peraluminoso ($A/CNK < 1.1$ o relación molar $Al_2O_3/CaO + Na_2O + K_2O < 1.1$), enriquecimiento de LREE (*Light Rare Earth Elements*: Sc, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd) respecto a HREE (*Heavy Rare Earth Elements*: Y, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Tb,

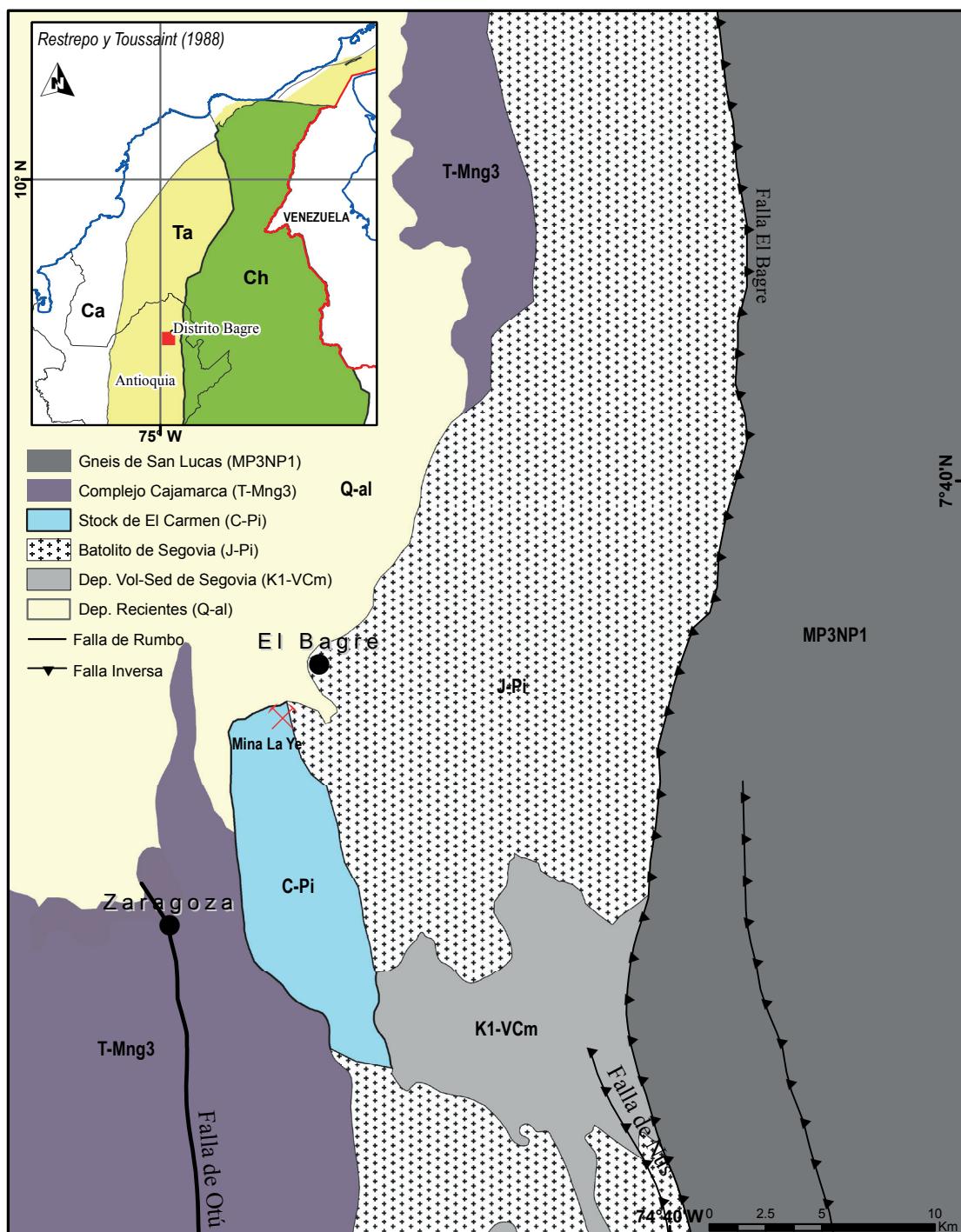


Figura 1. Mapa geológico regional de la zona de estudio. Terreno Chibcha (Ch), terreno Tahamí (Ta) y terreno Caribe (Ca), de acuerdo con Restrepo y Toussaint (1988).

Lu) y afinidad a granitos formados en arcos volcánicos continentales (Figura 3); todas estas características de granitos orogénicos oxidados (Takagi y Tsukimura, 1997; Leal-Mejía, 2011 y Varona-Bravo *et al.*, 2016). Al interior de la mina La Ye, cerca al contacto con la veta, este cuerpo ígneo exhibe una textura milonítica con orientación de cristales de cuarzo y cloritización de biotitas. En las exposiciones de veta a lo largo de los niveles uno, dos, tres y cuatro de la mina La Ye, es común encontrar fragmentos de roca de caja con alteración filica encapsulados al interior de la veta.

Geología estructural

La veta se encuentra encajonada en una zona de cizalla sinestral inversa (Starling, 2014 y 2015) con al menos cuatro eventos de deformación bajo un régimen de deformación frágil-dúctil (D1, D2, D3 y D4) generando milonitización de la roca de caja, estructuras sigmoidales, *boudinage* y contactos veta-caja reactivados con presencia de salbanda (Londoño *et al.*, 2009). Según Starling (2014) estos eventos de deformación presentan las siguientes características: D1: Compresión E-W?. Deformación pre-mineralización que formó el arreglo estructural

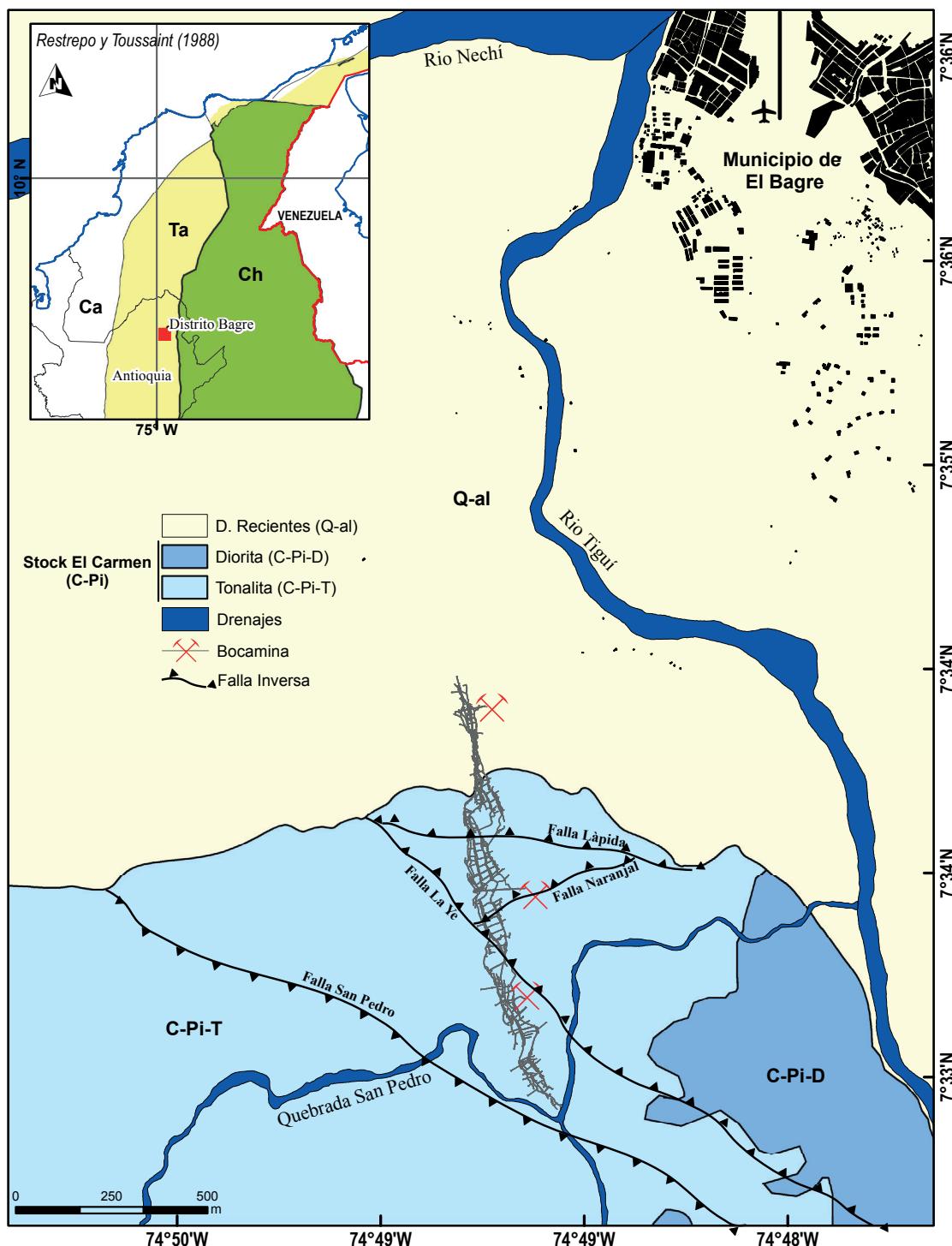


Figura 2. Mapa geológico local de la zona de estudio. Terreno Chibcha (Ch), terreno Tahamí (Ta) y terreno Caribe (Ca), de acuerdo con Restrepo y Toussaint (1988).

NS a NNW y controló el emplazamiento de diques básicos y diques pegmatíticos. D2: Compresión NNE/SSW que reactivó la zona como un corredor de transpresión destral, controlando las etapas iniciales de cuarzo y mineralización. D3: Compresión NNW/SSW que reactivó nuevamente el área como una zona de cizalla transpresional sinestral, controlando una segunda etapa de fluidos hidrotermales y mineralización de metales base y oro con una segunda etapa de cuarzo. D4: Evento post-mineralización, cerca a una compresión E-W (Figura 4).

Las primeras fases de deformación D1 cubren todos los eventos pre-mineralización, que aún no están bien identificados (Figura 4a). Durante el evento D2 la tendencia NS a NNW fue reactivada como una zona de cizalla destral transpresional con el desarrollo de fallamiento inverso de bajo ángulo WNW (e.g., Falla La Lápida) permitiendo tener zonas de dilatación en giros o saltos destrales, conteniendo el primer evento de mineralización dominado por pirita y escaso Au (Figura 4b). El evento D3 comprendió un cambio en la dirección

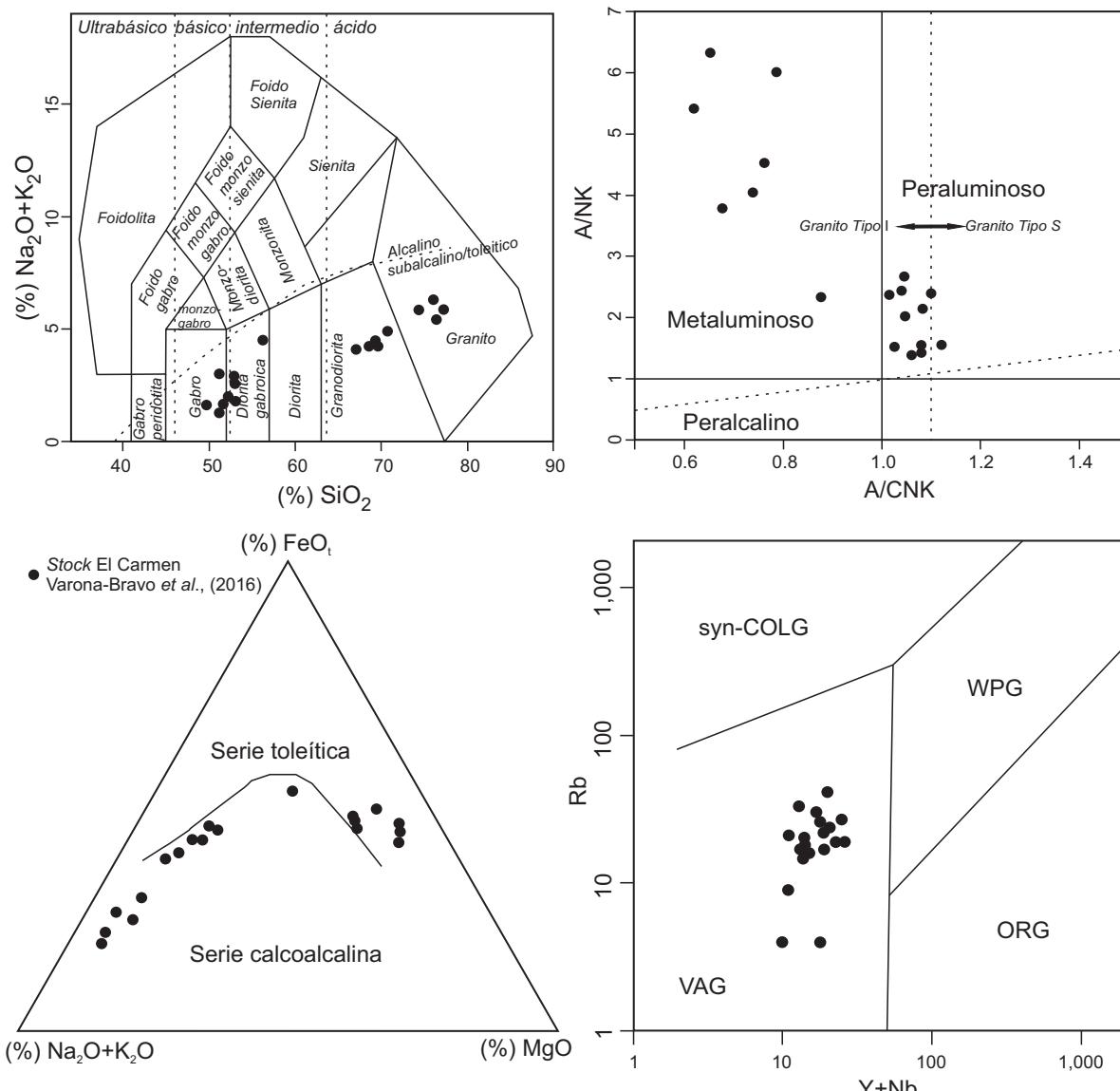


Figura 3. Diagramas geoquímicos del stock El Carmen. Tomado y modificado de Varona-Bravo *et al.* (2016). A/CNK: relación molar $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$; A/NK: relación molar $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$; syn-COLG: granitos sincolisionales; VAG: granitos de arco volcánico; WPG: granitos intraplaca; ORG: granitos de dorsal oceánica.

de compresión de NNE a NNW, resultando en una reactivación de la estructura como una zona de cizalla sinestral con zonas de falla inversas de bajo ángulo con tendencia ENE a NE (e.g., Falla Naranjal). En este evento el cizallamiento sinestral fue acompañado por el fracturamiento de la veta de cuarzo pre-existente (*i.e.*, formada durante el evento D2), formando zonas de reactivación que fueron selladas por una segunda etapa de mineralización conteniendo sulfuros tardíos como pirita, galena, calcopirita, oro, telururos de Au-Ag y telururos de Pb (Figura 4c). El evento post-mineralización D4 tiene dos efectos opuestos: duplicación por imbricación o segmentación por *boudinage*. Las vetas delgadas tienden a cizallarse a lo largo de los contactos y cuando las cizallas migran de piso a techo tienen un efecto de duplicación del espesor, interponiendo uno o más segmentos encima de la misma veta (imbricación). Cuando el cizallamiento migra de techo a piso la veta tiende a separarse, generando adelgazamiento de esta. Con vetas potentes, el cizallamiento tiende a estar activo a lo largo de ambas márgenes resultando en la formación

de fracturas antitéticas estilo dominó que permiten al bloque de veta relativamente rígido rotar dentro de la zona de cizalla. El cizallamiento prolongado de la veta puede resultar en segmentos redondeados y separados (*boudinage*) formando una geometría en “rosario”. Ambos escenarios son observados tanto en rumbo como en buzamiento.

Mineralización

Debido a que la veta en la mina La Ye está emplazada y controlada por una zona de cizalla, la mineralización y las características estructurales del depósito guardan una estrecha relación. Los eventos de deformación y el estilo estructural resultante, definidos por los trabajos de Starling (2014, 2015) (Figura 4), permitieron observar diferencias entre las exposiciones de veta al interior de la mina La Ye. De este modo, sectores con evidencias de deformación D2, de cizalla transpresional desestral (Figura 4b), hospedan vetas masivas, poco deformadas y con escasa mineralización de pirita \pm Au; mientras que sectores dominados por el evento D3, de cizalla transpresional sinestral (Figura 4c) hospedan vetas

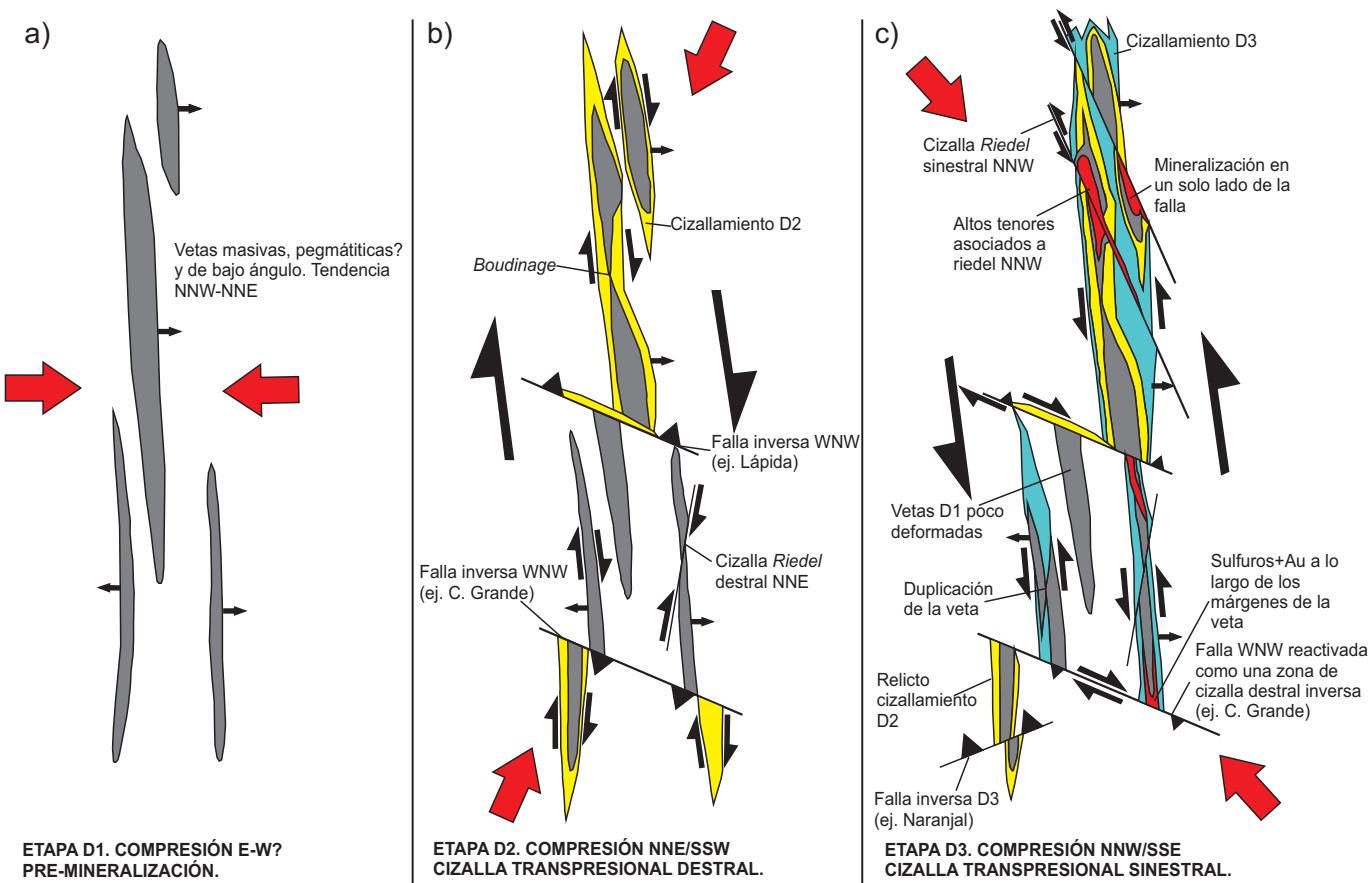


Figura 4. Esquema del modelo estructural presentando los eventos de deformación que afectaron y controlaron la mineralización en la mina La Ye. Tomado y modificado de Starling (2015).

con planos de reactivación sellados por sulfuros (galena, calcopirita y oro). Con base en estos criterios estructurales, se definieron las diferencias entre la mineralización asociada al evento D2 y la mineralización asociada al evento D3. Los análisis de microscopía de mera, complementados por microscopía SEM-EDS, realizados para los sectores con dominio D2, permitieron definir que la mineralización asociada a este evento, está dominada por pirita generalmente acompañada por granos de Au (Figura 5a). Para el sector con dominio del tercer evento deformativo D3 la mineralización está conformada por galena, calcopirita, Au, pirita y telururos de Au-Ag (hessita y silvanita) y telururos de Pb (altaita), rellenando fracturas en pirita preexistente, formada durante el evento D2 (Figuras 5b, 5c y 5d). La presencia de telururos de Au-Ag: hessita y silvanita (Figura 5e y 5f) es la característica de este evento, y se constituyó en una guía de exploración debido a la relación directa entre Au-Te, como se observa en los análisis multielementales.

Alteración hidrotermal

En la mina La Ye el cuerpo hospedante cerca al contacto con la veta presenta un halo de alteración hidrotermal que varía desde unos pocos centímetros hasta 1m de espesor; este halo está dominado por la cloritización de biotitas (Varona-Bravo *et al.*, 2016) que imprime una coloración verdosa a la roca de caja. Este proceso indica unas condiciones de pH casi neutro a ligeramente ácido (Corbett and Leach, 1997). La alteración hidrotermal dominante en la veta es la sericitización, en un claro proceso de hidrólisis alterando minerales anhidros, desestabilizando los feldespatos por presencia de iones H^+ ,

OH^- , K^+ y S^{2-} , para formar cuarzo, mica moscovita, pirita y algo de calcopirita y clorita generando minerales arcillosos para amortiguar el pH ligeramente ácido del fluido (Pirajno, 2009). Esta sericitización ocurre en un rango de pH entre 5 y 6 a temperaturas superiores a 250 °C (Corbett and Leach, 1997), indicando también una naturaleza neutra a ligeramente ácida para el fluido mineralizante (Mickucki, 1998). La presencia de carbonato en la alteración hidrotermal sugiere que el fluido hidrotermal fue rico en CO_2 . La remoción del CO_2 de la solución por disociación, de acuerdo con la reacción $CO_2 + H_2O = H^+ + HCO_3^-$, aumenta el pH y la actividad del carbonato en la solución, causando la precipitación de minerales carbonatados (Rimstidt, 1997). Goldfarb *et al.* (2005) resaltan que los fluidos que forman las vetas orogénicas están generalmente en equilibrio con las rocas que los rodean y los halos de alteración no son tan conspicuos o evidentes como lo son en otros sistemas hidrotermales.

Texturas de cuarzo y texturas de mera

La veta en la mina La Ye fue emplazada y deformada dentro de una zona de cizalla con al menos cuatro eventos de deformación bajo un régimen de deformación frágil-dúctil (Starling, 2014 y 2015). El cuarzo es el mineral dominante en la veta, presenta texturas de recristalización dinámica tipo *bulging* (Figuras 6a y 6b) en donde la recristalización se da a lo largo de los contactos de los granos de cuarzo (Owona *et al.*, 2013). Este tipo de texturas permiten inferir condiciones de temperatura bajas (<350 °C) y condiciones de deformación frágil-dúctil (Stipp *et al.*, 2002 y Owona *et al.*, 2013). Estas condiciones de depósito y deformación están de acuerdo con las asociaciones mineralógicas y

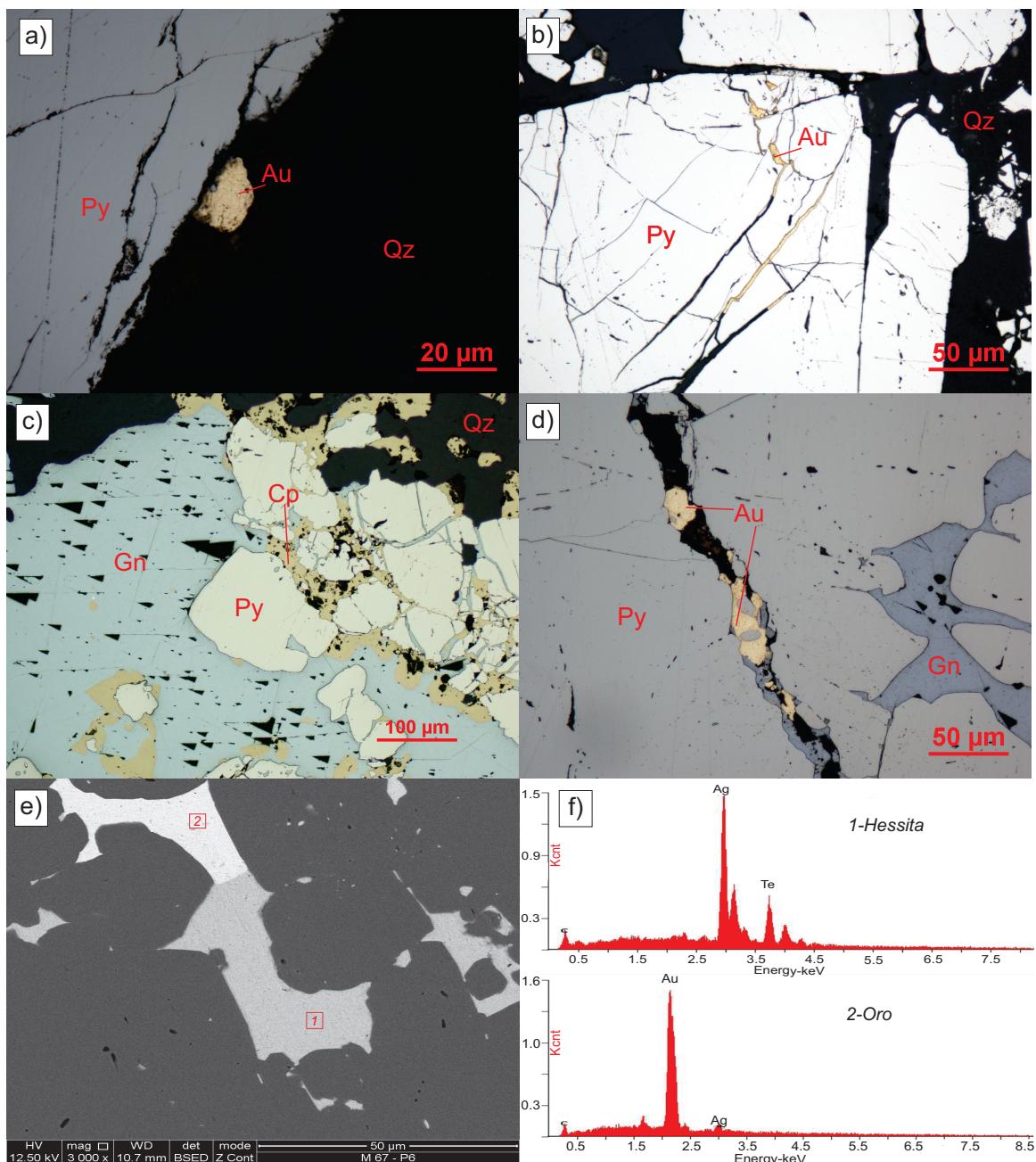


Figura 5. a) Mineralización del evento de deformación D2, con pirita (Py), cuarzo (Qz) y oro (Au); observada a 50X con nícoles paralelos (NP) y luz reflejada (LR). b) Oro (Au) llenando fracturas en pirita (Py) asociada a cuarzo (Qz); 20X, NP, LR. c) Galena (Gn) y calcocípita (Cp) llenando fracturas de pirita (Py), mineralización asociada al evento de deformación D3; 10X, NP, LR. d) Pirita (Py) con microfractura rellena por pirita (Py), galena (Gn) y oro (Au), mineralización asociada al evento de deformación D3; 20X, NP, LR. e) Imagen SEM de Hessita (Hs) y oro (Au) relleno fracturas de pirita (Py); obtenida con electrones retrodispersados (BSED), a 3,000X y 12.5 kV. f) Espectros de EDS de las zonas marcadas con cuadros rojos en la figura 5e, tomados sobre oro (Au) y hessita (Hs).

las alteraciones hidrotermales presentes, así como las características estructurales del depósito.

La pirita es el sulfuro dominante en la mineralización. Se identificaron claramente dos eventos de depósito de este sulfuro. El primero está caracterizado por presentar formas euhédricas y estar generalmente acompañado por Au. Esta asociación es característica del primer evento mineralizante asociado a D2. La pirita del primer evento de depósito estuvo sometida al evento de deformación D3, que generó microfracturas en este mineral y se llenaron con galena, calcocípita, silvanita, altaita, hessita, oro y pirita del segundo evento de minerali-

zación (asociado a D3). Las texturas de mena entre especies minerales son generalmente de reemplazamiento y relleno de espacios abiertos.

Paragénesis y asociación mineralógica

Las asociaciones minerales definidas para los eventos D2 y D3, permitieron generar una secuencia paragenética donde se observan al menos dos eventos de mineralización (Figura 7). El primero constituido por volúmenes significativos de cuarzo, con poco sulfuro (pirita) y cantidades menores de Au. Este evento está asociado a zonas con características estructurales del evento D2 (cizallas destrales y estrías

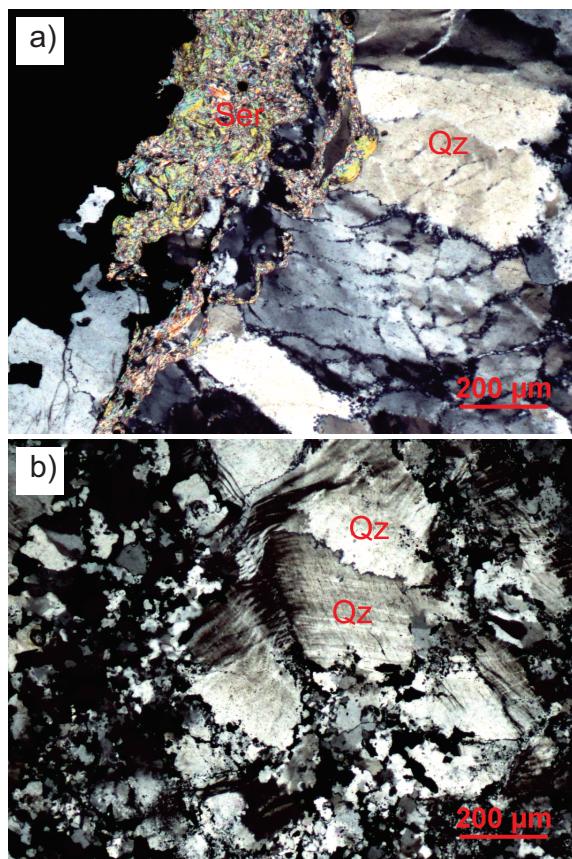


Figura 6. a) Cuarzo abultado por recristalización o *bulging quartz* asociado a sericitita de alteración hidrotermal en mina La Ye; observada a 5X con nícolos cruzados (NX) y luz transmitida (LT). b) Cuarzo abultado por recristalización o *bulging quartz*; 5X, NX, LT.

N-NE/S-SW). El segundo evento mineralizante está conformado por volúmenes bajos de cuarzo, con presencia de sulfuros como: galena, pirita y calcopirita, además de telururos de Ag-Au y Pb (silvanita, hessita y altaita) y Au. Este evento está asociado a zonas con características estructurales del evento D3 (cizallas sinestrales y estrías N-NW/S-SE). Uniformemente distribuidos a lo largo de las exposiciones de la veta al interior de la mina, se observó sericitita y calcita como minerales de alteración hidrotermal dominantes. Microscópicamente la sericitita presenta formas alargadas subhédricas y tamaños que varían desde 10 micras hasta 0.8 mm. Los cristales de calcita generalmente se encuentran en venillas de 10–20 micras de espesor o como acumulaciones pequeñas de cristales sin una distribución preferencial. La presencia de goethita está limitada a las exposiciones de veta más cercanas a la superficie, generalmente se presentan como pátinas que tiñen de color pardo rojizo la veta.

Edad de la mineralización de oro

Tradicionalmente, al cuerpo hospedante de la mineralización vetiforme en la mina La Ye, se le ha asignado una edad jurásica, asociándola en mapas regionales al batolito de Segovia (Cediel y Cáceres, 2000; Londoño *et al.*, 2009). Debido a que la veta en la mina La Ye está encajonada en estas rocas graníticas, Londoño *et al.* (2009) sugirieron una edad post-jurásica para la mineralización. Dataciones geológicas recientes U-Pb (SHRIMP) realizadas por Leal-Mejía (2011) demostraron que este cuerpo, hospedante de la mineralización, presenta una edad carbonífera (322–310 Ma) claramente diferente

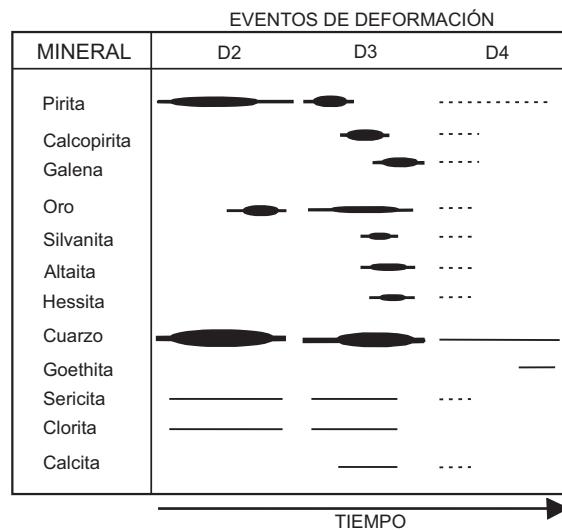


Figura 7. Secuencia paragenética de la mina La Ye; los eventos principales de mineralización se asocian a los eventos de deformación D2 y D3. El espesor y la continuidad de las líneas son relativos a la abundancia durante cada evento de deformación.

a las rocas graníticas jurásicas del batolito de Segovia (Spikings *et al.*, 2015). Con base en estos nuevos datos, se podría asignar una edad post-carbonífera para la mineralización. Adicionalmente, Leal-Mejía (2011) realizó una datación K-Ar en sericitita de alteración hidrotermal al interior de la mina La Ye, arrojando una edad de 280 ± 6 Ma. Esta edad es posterior en ~40 Ma a la edad de cristalización del cuerpo hospedante. Aunque esta edad podría indicar la edad de mineralización/alteración hidrotermal en el distrito El Bagre, coincide claramente con las primeras etapas del evento tectono-magmático del Pérmico-Triásico (ca. 280–230 Ma) definido por Vinasco *et al.* (2006). Por este motivo, existe la posibilidad de que la veta en la mina La Ye y la alteración hidrotermal fuesen introducidas durante este evento. Sin embargo, independientemente del aparente carácter regional, el evento Permo-Triásico, de acuerdo con Leal-Mejía (2011), "está esencialmente desprovisto de mineralización de oro en otra parte, lo que haría una edad Pérmico-Triásico para la mineralización altamente anómala".

GEOQUÍMICA MULTIELEMENTAL

Se realizaron análisis multielementales de 32 elementos traza para 24 muestras de veta. La mineralización en la mina La Ye está caracterizada por las asociaciones de Fe-As±Au para el primer evento asociado a D2 (Figura 8a) y Au-Cu-Pb-Te para el segundo asociado a D3 (Figura 8b). Las concentraciones de As varían entre 0.7–277 ppm (promedio 70 ppm) reflejando posiblemente la presencia de arsenopirita en la mineralización introducida durante el primer evento. Aunque no se ha identificado la presencia de seleniuros en la mineralización, las concentraciones de Se (10.95 ppm promedio) y la buena correlación con Te y Pb permiten sugerir su existencia. La concentración de Sb y Cd es prácticamente nula (<1.5 ppm), así mismo se observaron bajas concentraciones de Zn (<20 ppm), descartando por el momento la presencia de esfalerita en la mineralización. Las elevadas concentraciones de Te (>450 ppm), Pb (>550 ppm) y Cu (>550 ppm), corresponden a la presencia en la mineralización de telururos de Au-Ag (hessita y silvanita), teluro de Pb (altaita), galena y calcopirita respectivamente, introducidos durante el segundo y principal evento mineralizante. Las concentraciones de W están cercanas al límite de

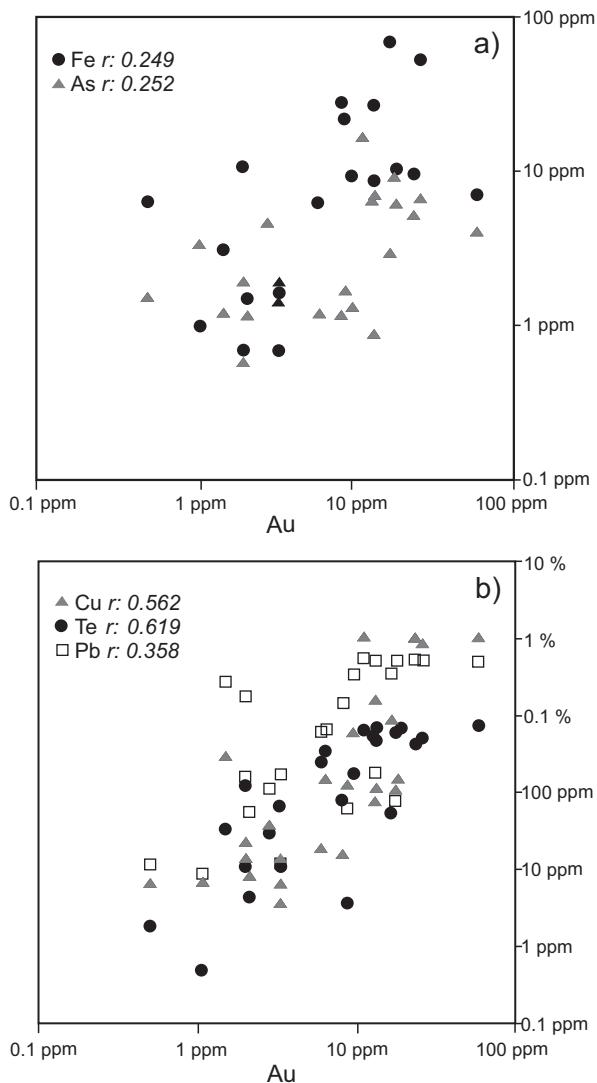


Figura 8. a) Gráficos bimodales de Au vs. Fe y As. b) Au vs. Cu, Te y Pb. Los coeficientes de correlación, r , fueron calculados con el valor logarítmico de la concentración de cada elemento.

detección (<0.2 ppm). Las muestras analizadas presentan contenidos de Au y Ag variados, sin embargo la relación Au/Ag calculada con ensayos de más de 21,000 muestras de canal al interior de la mina La Ye, varía entre 1:3 y 1:4 rangos normales para los depósitos de oro orogénico (Groves *et al.*, 2003). El Au presenta una buena correlación con los metales del segundo evento como Pb, Cu y Te. El comportamiento similar del Au y Te es simplemente el resultado de la presencia de teluros de Au-Ag en la mineralización (Figura 8b). En contraste, los valores de Au no presentan una buena correlación con los contenidos de Fe o As, confirmando que éstos elementos fueron parte de una etapa temprana y separada (Figura 8a).

RESULTADOS DE ISÓTOPOS ESTABLES

Se realizaron análisis de isótopos estables de δD , $\delta^{18}\text{O}$ contenidos en filosilicatos de la veta y azufre $\delta^{34}\text{S}$ en pirita de la veta. Todas las muestras fueron recolectadas al interior de la mina La Ye teniendo en cuenta los eventos de deformación D2 y D3 definidos por Starling

(2014 y 2015). La composición isotópica del hidrógeno δD y el oxígeno $\delta^{18}\text{O}$ fue determinada en cuatro muestras usando procedimientos convencionales de preparación y análisis; se seleccionaron y separaron filosilicatos hidrotermales (sericitas-moscovita) en segmentos de veta con características estructurales asociadas al evento D2 y D3 (Tabla 1). Los rangos de valores isotópicos obtenidos en este estudio para el primer evento de mineralización, en sericitas hidrotermal asociada al evento de deformación D2, para $\delta^{18}\text{O}$ están entre $+7.4$ y $+8.9\text{\textperthousand}$ y para δD varían entre -49 y $-50\text{\textperthousand}$. Los rangos de valores del segundo evento mineralizante, para sericitas asociadas a D3, para $\delta^{18}\text{O}$ se encuentran entre $+7.3$ y $+8.6\text{\textperthousand}$, y para δD varían entre -46 y $-57\text{\textperthousand}$. (Figura 9a). En general la corteza continental está enriquecida en $\delta^{18}\text{O}$ en relación al manto que presenta un valor de $5.7 \pm 0.3\text{\textperthousand}$, el cual parece haber sido constante a través del tiempo de la Tierra y la Luna (Rollinson, 1993). La mayoría de los granitos, rocas metamórficas y sedimentarias están enriquecidos en $\delta^{18}\text{O}$ con relación al valor del manto, mientras que las aguas de mar y las aguas meteóricas tienen déficit de $\delta^{18}\text{O}$ (Rollinson, 1993). Los anteriores valores isotópicos para oxígeno e hidrógeno, proyectados en un gráfico $\delta^{18}\text{O}$ vs δD , corresponden a aguas magmáticas o asociadas a rocas graníticas y/o aguas metamórficas, según Taylor (1974) y Sheppard (1981), por presentar valores de $\delta^{18}\text{O}$ superiores a $5.7 \pm 0.3\text{\textperthousand}$, valor característico del manto. Se puede afirmar que estos fluidos provienen o circularon por la corteza continental y pudieron incorporar el oxígeno al estar en contacto con granitoides, rocas metamórficas, andesitas o riolitas encontradas a su paso, descartando de plano una contaminación con aguas meteóricas. La composición isotópica del azufre $\delta^{34}\text{S}$ (en pirita), fue determinada en cuatro muestras asociadas a los eventos D2 y D3. Los valores varían entre $+3.7$ y $+5\text{\textperthousand}$, con valores para el evento D2 entre $+3.7$ y $+4.9\text{\textperthousand}$ y valores entre $+3.95$ y $+5\text{\textperthousand}$ para el evento D3 (Figura 9b), que igualmente se podrían asociar a rocas graníticas y rocas metamórficas.

DISCUSIÓN

Con los resultados obtenidos se plantea el posible origen de los fluidos mineralizantes, se infiere cómo pudo ser el transporte y depósito del oro y un posible modelo genético para la mineralización presente en la mina La Ye, comparándolo con otros depósitos de referencia en suramérica como son el depósito de Pataz en el Perú (Haeberlin, 2002) y Cachoeira en Brasil (Klein *et al.*, 2005).

Fuente de los fluidos mineralizantes

Los resultados isotópicos para las muestras tomadas al interior de la mina La Ye, permiten evaluar preliminarmente la fuente del fluido mineralizante. Los valores calculados respecto a VSMOW de $\delta^{18}\text{O}$ y δD están restringidos al campo de aguas magmáticas y metamórficas, (Figura 9a), definido por Taylor (1974). Los resultados de $\delta^{18}\text{O}$ y δD

Tabla 1. Valores de isótopos de D, O y S determinados en las muestras.

Muestra	δD	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{34}\text{S}$	Evento
	Muscovita	Pirita		
UCYE-10			+3.7	D2
UCYE-11			+4.9	D2
UCYE-17	-49	+8.9		D2
UCYE-24	-50	+7.4		D2
UCYE-04	-57	+8.6	+5	D3
UCYE-19	-46	+7.3		D3
UCYE-21			+3.95	D3

muestran valores uniformes tanto para las muestras asociadas a D2 como para las asociadas al D3, evidenciando un equilibrio relativo en el sistema hidrotermal (Haeberlin, 2002). Los rangos y variaciones en los valores de $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos pueden ser considerados como de afinidad magmática (McCuaig y Kerrich, 1998; Brown *et al.*, 2003). Estos valores isotópicos pueden ser interpretados como un indicativo de una fuente magmática dominante (\pm manto) relativamente homogénea, con S producido directamente por magmas o por removilización de sulfuro de rocas magmáticas (Klein *et al.*, 2005). Aunque los estudios de isotopos de azufre en rocas ígneas relacionadas a depósitos son muy limitados, pueden dar una base en los procesos de fusión parcial o de asimilación de las rocas encajantes (Seal, 2006). La composición isotópica de azufre del manto ha sido tradicionalmente considerada entre 0 y $\pm 2\text{\textperthousand}$, (Seal, 2006 y Rye, 2004). Los valores de $\delta^{34}\text{S}$ en depósitos como Cachoeira y Pataz presentan valores de azufre similares a los obtenidos en la mina La Ye (Figura 9b). Ridley y Diamond (2000) muestran que los sulfuros en la mayoría de los depósitos orogénicos tienen valores de $\delta^{34}\text{S}$ en un rango restringido desde -3 hasta +9‰, el valor de $\delta^{34}\text{S}$ de sulfuros precipitados de un fluido puede variar significativamente de acuerdo a la fugacidad de oxígeno ($f\text{O}_2$) y el pH; sin embargo, los valores calculados de $\delta^{34}\text{S}_{\text{fluido}}$ están entre -1 y +8‰, superponiendo los valores de reservorios comunes de azufre, incluyendo las rocas magmáticas derivadas del manto y el promedio de las rocas de la corteza. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$, δD y $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos en este estudio muestran una afinidad magmática para el fluido mineralizante. Estos resultados son consistentes para los depósitos de oro orogénico, donde se tienen tres fuentes principales para los fluidos mineralizantes entre las cuales se incluye un origen magmático (Moritz, 2000; Jia *et al.*, 2003; Ridley y Diamond, 2000; Groves *et al.*, 1998 y 2003).

Transporte y depósito del oro

A pesar de la ausencia de datos en inclusiones fluidas y la composición química del fluido mineralizante, la información mineralógica e isotópica disponible es una evidencia del pH y la condición redox del fluido (Klein *et al.*, 2005). Estos parámetros ayudan en la comprensión del transporte y depósito del Au en el sistema hidrotermal de la mina La Ye. La ausencia de hematita y sulfatos en el ambiente de depósito, la coexistencia de pirita y clorita en la alteración hidrotermal y los valores de $\delta^{34}\text{S}$ en sulfuros, indican una condición relativamente reducida para la mineralización aurífera en la mina La Ye (Klein *et al.*, 2005). La presencia de moscovita y calcita como minerales de alteración define una naturaleza cerca de neutral a ligeramente alcalina para el fluido mineralizante (Mickucki, 1998). En estas condiciones físicoquímicas estimadas, especies como H_2S o HS^- son dominantes en los fluidos y, en consecuencia, el complejo $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ fue probablemente el medio ligante y de transporte (Klein *et al.*, 2005; Benning y Seward, 1996; Ridley y Diamond, 2000). La presencia de calcita en la ganga y en la alteración hidrotermal sugiere que el fluido mineralizante fue rico en CO_2 . La remoción del CO_2 de la solución por disociación, de acuerdo a la reacción $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$, aumenta el pH y la actividad del carbonato en la solución, causando la precipitación de minerales carbonatados (Rimstidt, 1997).

Un modelo genético para el depósito de oro en la mina La Ye

La mina La Ye es un depósito de Au-Ag hospedado en una zona de cizalla, con mineralización en vetas de cuarzo. Las características geológicas, descritas en este documento, incluyendo la geología estructural, roca de caja, alteración hidrotermal, estilo de mineralización y composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$, δD y $\delta^{34}\text{S}$, indican que la mina La Ye es compatible con el modelo de depósitos de tipo Oro Orogénico (*Orogenic Gold Deposits*), definido por Groves *et al.* (1998), del subtipo depósitos de Filones Auríferos Hospedados en Granitoides (*Granitoid-Hosted Lode-gold Deposits*) en el sentido

de Haeberlin (2002), Qiu *et al.* (2002), Haeberlin *et al.* (2004) y Kreuzer (2006). En la Tabla 2 se presenta una comparación de las características geológicas de la mina La Ye y las características definidas por Groves *et al.* (1998) para los depósitos orogénicos, así como otros depósitos clasificados como orogénicos en América del sur.

Al estar hospedado en rocas graníticas se puede pensar en una relación genética entre la estructura vetiforme y el plutón hospedante como en los depósitos de tipo Relacionados a Intrusivos (*Instruction-Related*) en el sentido de Sillitoe y Thompson (1998). Sin embargo, se debe ser cauteloso en deducir cualquier relación genética entre los depósitos vetiformes de Au asociados u hospedados en intrusivos (Haeberlin, 2002 y Hart, 2005). Las diferencias en el estilo de mineralización, características geoquímicas, ambiente tectónico y edad de la mineralización permitieron descartar por el momento este tipo de modelo genético para la mina La Ye.

CONCLUSIONES

La veta en la mina La Ye, está emplazada en una zona de cizalla sinestral-inversa con al menos cuatro eventos deformativos (D1, D2, D3 y D4) bajo un régimen frágil-dúctil. Se determinó que D2 y D3 están directamente asociados a dos eventos mineralizantes, el primero (relacionado a D2), está caracterizado por volúmenes significativos de cuarzo, pirita y oro. Un segundo y principal evento mineralizante (relacionado a D3), contiene oro, galena, calcopirita, telururos de Au-Ag (hessita y silvanita) y telururos de Pb (altaita).

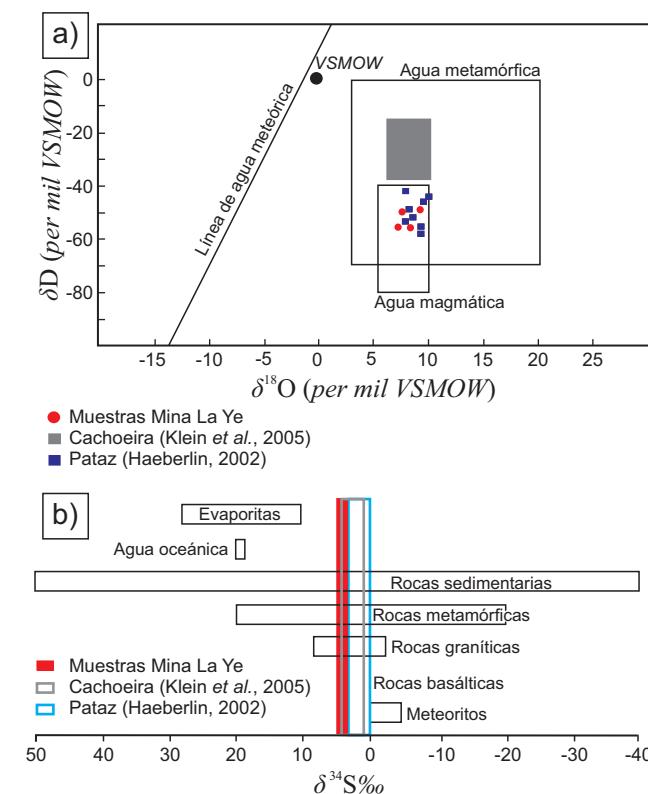


Figura 9. a) Valores de isotopos de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) e hidrógeno (δD) en muestras de moscovita en la mina La Ye. Se observan los campos de agua magmática (Taylor, 1974) y aguas metamórficas (Taylor, 1974; Sheppard, 1981). Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD (en moscovita hidrotermal) calculados respecto a VSMOW están restringidos al campo de aguas magmáticas. b) Valores de isotopos de $\delta^{34}\text{S}$, consistentes con los campos de rocas graníticas y rocas metamórficas.

Tabla 2. Comparación de características geológicas seleccionadas del modelo de Depósitos de Au Orogenético, mina La Ye y otros depósitos en suramérica.

Características	Depósitos Orogenéticos ^a	Mina La Ye ^b (Colombia)	Depósitos de Pataz ^c (Perú)	Depósito de Cachoeira ^d (Brasil)
Edad	Arqueano Medio a Terciario con picos en Paleoproterozoico y Fanerozoico	Pre-jurásico?	Paleozoico Superior	Paleoproterozoico
Ambiente Tectónico	Márgenes continentales deformados, terrenos acrecionados	Terrenos acrecionados	Cerca a estructuras de primer orden NNW	Back-Arc deformado/márgen continental
Roca Hospedante	Principalmente rocas volcánicas, rocas intrusivas o secuencias sedimentarias	Granitoide carbonífero-Batolito de Segovia?	Granitoide carboníferos	Rocas intrusivas y volcánicas máficas, rocas volcánicas féticas, esquistos grafitos, filitas
Tiempo de Mineralización	Tectono-tardío, post pico metamórfico	Syn a tectono tardío?	Post pico metamórfico	Syn a tectono-tardío, post pico metamórfico
Estilo de Mineralización	Vetas, arreglos vetiformes, reemplazamiento de rocas ricas en Fe	Vetas en zonas de cizalla. Régimen frágil-dúctil	Vetas de cuarzo en zonas de deformación frágil-dúctil	Arreglos vetiformes y disseminado cerca a la roca hidrotermalmente alterada
Tenor de Au	>5 g/T	3-8 g/T	5-30 g/T	-
Alteración Hidrotermal	Moscovita, carbonatos y sulfuros de Fe	Moscovita, clorita y carbonatos	Sericitización, cloritización, piritización y silicificación	Dolomita, pirita, arsenopirita ± moscovita y clorita
Condiciones de P-T°	Principalmente 350 °±50 °C, 1.5±0.5 kbar	T° interpretada: 300-350 °C. P desconocida	± 300 °C y 1-5 kbar dependiendo de la etapa de mineralización	300-386 °C. P desconocida
Composición del Fluido	Baja salinidad, $H_2O-CO_2\pm CH_4\pm N_2$	Inferido: baja salinidad posiblemente H_2O-CO_2	Baja salinidad, $H_2O-NaCl$ y $H_2O-NaCl-CO_2$	Possiblemente H_2O-CO_2
Fuente de O y D	Metamórfica y/o magmática	Metamórfica y/o magmática	Metamórfica	Metamórfica
Fuente de S	Magnética	Magnética	Magnética o de-sulfidación de minerales magnéticos primarios	Magnética
Tipo de Depósito	Orogenético	Orogenético	Orogenético	Orogenético

^a Groves *et al.* (1998 y 2003)^b Este estudio^c Klein *et al.* (2005)^d Haeberlin (2002)

Los valores obtenidos de $\delta^{18}\text{O}$, δD y $\delta^{34}\text{S}$ muestran una afinidad magnética para el fluido mineralizante, con poca o nula participación de fluidos de origen meteórico. La ausencia de hematita y sulfatos en la mineralización, la asociación sericitita-carbonatos y la coexistencia de pirita-clorita en la alteración hidrotermal, indican una condición relativamente reducida para la mineralización y una naturaleza neutra a ligeramente alcalina para el fluido mineralizante, probablemente rico en CO_2 debido a la presencia de carbonatos al interior de la veta. En estas condiciones físicoquímicas estimadas, especies como H_2S o HS^- son dominantes en los fluidos y en consecuencia, el complejo $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ fue probablemente el medio de transporte del oro.

Las características geológicas del depósito en la mina La Ye definidas en este trabajo, como el emplazamiento de la veta en una zona de cizalla con deformación frágil-dúctil, la composición mineralógica de la veta, los minerales de alteración hidrotermal, el estrecho halo de alteración hidrotermal en la roca caja, las características estructurales del depósito, las texturas de cuarzo y los valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$, δD y $\delta^{34}\text{S}$ indican que la mineralización en la mina La Ye es compatible con el modelo de tipo Oro Orogénico (*Orogenic Gold Deposits*), definidos por Groves *et al.* (1998), del subtipo Depósitos de Filones Auríferos Hospedados en Granitoides (*Granitoid-Hosted Lode-gold Deposits*) en el sentido de Haeberlin (2002), Qiu *et al.* (2002), Haeberlin *et al.* (2004) y Kreuzer (2006).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Operadora Minera S.A.S., por el acceso a la información y el financiamiento de este proyecto. A Julian Castro Lotero por su colaboración en el análisis metalográfico de las muestras. Al grupo de Geología de Operadora Minera S.A.S. por sus aportes y comentarios en las primeras ediciones de este documento. Así como a dos revisores anónimos por sus comentarios y sugerencias que realizaron valiosos aportes y enriquecieron la presentación de este trabajo.

REFERENCIAS

- Barrientos, D.L., 2007, Informe final etapa V-Proyecto La Ye: Reporte Interno preparado para Mineros S.A., 146 pp.
- Benning, L.G., Seward, T.M., 1996, Hydrosulphide complexing of Au (I) in hydrothermal solutions from 150 to 400 °C and 500 to 1500 bars: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 1849-1871.
- Brown, S.M., Johnson, C.A., Watling, R.J., Premo, W.R., 2003, Constraints on the composition of ore fluids and implications for mineralising events at the Cleo gold deposit, Eastern Goldfields Province, Western Australia: *Australian Journal of Earth Sciences* 50, 19-38.
- Cediel, F., Caceres, C., 2000, Geological Map of Colombia: Geotec, Ltd., Bogotá, 3rd Edition, digital format with legend and tectono-stratigraphic chart.
- Clayton, R.N., Mayeda, T., 1963, The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27, 47-52.
- Corbett, G., Leach, T., 1997, Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization: Short Course Manual, 318 pp.
- Goldfarb, R.J., Baker, T., Dubé, B., Groves D.I., Hart C.J.R., Gosselin, P. 2005, Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes: *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume, 407-450.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Robert, 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, 7-27.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Robert, F., Hart, J.R., 2003, Gold Deposits in metamorphic belt: overviews of current understanding, outstanding problems, future research and exploration significance: *Economic Geology*, 98, 1-29.
- Haeberlin, Y., 2002, Geological and structural setting, age, and geochemistry of the orogenic gold deposits at the Pataz Province, eastern Andean Cordillera, Peru: Suiza, Université de Genève, Tesis Doctoral #3283, 196 pp.
- Haeberlin, Y., Moritz, R., Fontbote, L., Cosca, M., 2004, Carboniferous orogenic gold deposits at Pataz, eastern Andean Cordillera, Peru: geological and structural framework, paragenesis, alteration, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology: *Economic Geology*, 99, 73-112.
- Hart, C.J.R., 2005, Classifying, distinguishing and exploring for intrusion related gold systems: The Gangue: *Newsletter of the Geological Association of Canada Mineral Deposits Division*, 87, 1, 4-9.
- Jia, Y., Kerrich, R., Goldfarb, R., 2003, Metamorphic Origin of Ore-Forming Fluids for Orogenic Gold-Bearing Quartz Vein System in the North American Cordillera: Constraints from a Reconnaissance Study of $\delta^{15}\text{N}$, δD and $\delta^{18}\text{O}$: *Economic Geology*, 98, 109-123.
- 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: *Elsevier-Chemical Geology*, 221, 188-206.
- Kreuzer, O.P., 2006, Textures, paragenesis and wall-rock alteration of lode-gold deposits in the Charters Towers district, north Queensland: implications for conditions of ore formation: *Mineralium Deposita*, 40(6-7), 639-663, doi:10.1007/s00126-005-0010-1
- Leal-Mejía, H., 2011, Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes: a tectono-magmatic approach: Barcelona, España, Universidad de Barcelona, Tesis Doctoral, 1000 pp.
- 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*, 26, 29-38.
- McCuaig, T.C., Kerrich, R., 1998, P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics: *Ore Geology Reviews*, 12, 381-453.
- Mikucki, E., 1998, Hydrothermal transport and depositional processes in Archaean lode-gold systems: a review: *Ore Geology Reviews*, 13, 307-321.
- Moritz, R., 2000, What have we learned about orogenic lode gold deposits over the past 20 years?: *Scientific Communication. Section des Sciences de la Terre*, University of Geneva, Switzerland, 1-7.
- Owna, S., Ondoia, 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), 186-201.
- Pirajno, F., 2009, Hydrothermal Alteration, *en* Pirajno, F. (ed.) *Hydrothermal Mineral Deposits, Principles and fundamental concepts for the exploration geologist*: Springer-Verlag, Berlin, 101-155.
- Qiu, Y., Groves, D.I., McNaughton, N.J., Wang, L., Zhou, T., 2002, Nature, age and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits in the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China: *Mineralium Deposita*, 37, 283-305.
- Restrepo, J.J., Toussaint, J.F., 1988, Terranes and continental accretion in the Colombian Andes: *Episodes*, 11(3), 189-193.
- Ridley, R.J., Diamond, L., 2000, Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models: *SEG Reviews*, 13, 141-162.
- Rimstidt, J.D., 1997, Gangue mineral transport and deposition, *en* Barnes, H.B. (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*: John Wiley & Sons, 487-515.
- Rollinson, H., 1993, *Using Geochemical Data: evaluation, presentation, interpretation*: Burnt Mill, Harlow England, Longman Scientific, 352 pp.
- Rye, R.O., 2004, A review of the stable-isotope geochemistry of sulfate minerals in selected igneous environments and related hydrothermal systems: *Chemical Geology*, 215, 5-36.
- Seal II, R.R., 2006, Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals: *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 61, 633-677.
- Shaw, R.P., 2000, Gold mineralization in the Northern Andes – magmatic setting vs. metallogeny, *en* XI International Mining Congress: Bogotá, Colombia, technical abstracts p. 19.
- Sheppard, S.M., 1981, Stable isotope geochemistry of fluids, *en* Rickard, D.T., Wickman, F.E., (eds.), *Chemistry and geochemistry of solutions at high temperatures and pressures: Physics and Chemistry of the Earth*, 13/14, 419-441.

- 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, 663-687.
- Sillitoe, R.H., Thompson, J.F.H., 1998, Intrusion-related vein gold deposits: types, tectono-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits: *Resource Geology*, 48, 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.
- Starling, A., 2014, Structural review of La Ye mine and District. Internal Field Report prepared for Mineros S. A. and Operadora Minera S.A.S., 26 pp.
- Starling, A., 2015, Structural review of La Ye and Icacales-Los Mangos mines. Internal Field Report prepared for Mineros S.A. and Operadora Minera S.A.S. 26 pp.
- Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R., Schmid, S.M., 2002, The eastern Tonale fault zone: a 'natural laboratory' for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700 °C: *Journal of Structural Geology*, 1861-1884.
- Takagi, T., Tsukimura, K., 1997. Genesis of oxidized and reduced-type granites: *Economic Geology*, 92, 81-86.
- Taylor, H.P., 1974, The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition: *Economic Geology*, 69, 843-883.
- Ueda, A., Krouse, H.R., 1986, Direct conversion of sulphide and sulphate minerals to SO₂ for isotope analyses: *Geochemical Journal* 20, 209-212.
- Varona-Bravo, D.S., 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., Reporte Interno, 10 pp.
- Vinasco, C.J., Cordani, U.G., González, H., Weber, M., Pelaez, C., 2006, Geochronological, isotopic, and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian Central Andes: *Journal of South American Earth Sciences*, 21, 355-371.

Manuscrito recibido: Noviembre 10, 2015

Manuscrito corregido recibido: Mayo 31, 2016

Manuscrito aceptado: Junio 21, 2016