

Caracterización petrográfica, metalográfica, microtermométrica de las mineralizaciones y alteraciones hidrotermales del prospecto Campana (Pórfido de Cu-Au±Mo), en Pácora (Caldas, Colombia)

Diego Loaiza^{1*}; Mauricio Alvarán-Echeverri¹; Juan Sebastián Llanos²

¹Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia. (*)
diego.loaiza@ucaldas.edu.co; mauricio_alvaran@ucaldas.edu.co

²Atico Mining Corporation, Medellín, Colombia. juansllanos@outlook.com

Resumen

El prospecto Campana es un depósito de tipo pórfido de Cu–Au (±Mo) localizado dentro del Cinturón Mioceno del Cauca Medio, en el municipio de Pácora (Caldas, Colombia). Este se emplazó a través del Sistema de Fallas Romeral, que es una sutura que pone en contacto rocas de afinidad continental al este con rocas de afinidad oceánica al oeste. En este prospecto, se identificaron a partir de estudios de petrografía y metalografía, 4 etapas principales de intrusiones con desarrollo de brechas magmático-hidrotermales. Cada una de estas generó alteraciones hidrotermales de tipo sódico-cálcica, potásica, propilitica, filica (cuarzo sericitica), argílica intermedia y argílica avanzada, aunque procesos de telescopeo causaron perturbación de este orden en ciertas zonas del prospecto. La mineralización presenta: i) sulfuros y sulfosales, incluyendo pirita, calcopirita, esfalerita, galena, tetraedrita-tennantita y freibergita; ii) óxidos, predominantemente magnetita, hematita y dióxidos de Ti; y iii) elementos nativos como oro, plata, electrum, con estilos de mineralización tales como: diseminado, vetillas de diferente tipo, hasta reemplazamientos e inclusiones. Los datos microtermométricos en inclusiones fluidas obtenidos en los diferentes tipos de vetillas, presentaron temperaturas de homogenización que varían entre 530,1°C hasta 296,6°C y salinidades entre 50,09-0,177 %eq. peso NaCl. El amplio rango de salinidad y temperatura de homogenización sugiere que la génesis del depósito comienza con una etapa magmático-hidrotermal, caracterizada por las mayores temperaturas obtenidas en este estudio, y finaliza con una etapa tardía epitermal más somera y de menor temperatura. Todo esto permite concluir que esta zona representa un sistema porfirítico completo desde la parte intrusiva interna hasta las etapas o zonas más someras representadas por las vetas de características epitermales de baja a intermedia sulfuración, que son consistentes con los reportados a nivel mundial para este tipo de depósitos.

Palabras clave: Cinturón del Cauca Medio; Sistema de Fallas Romeral; Salinidad; Sulfuros; Elementos nativos; Temperatura de homogenización.

Forma de citar: Loaiza, D.; Alvarán-Echeverri, M.; Llanos, J.S. (2025). Caracterización petrográfica, metalográfica, microtermométrica de las mineralizaciones y alteraciones hidrotermales del prospecto Campana (Pórfido de Cu-Au±Mo), en Pácora, (Caldas, Colombia). *Boletín de Geología*, 47(2), 61-81. <https://doi.org/10.18273/revbol.v47n2-2025003>

Petrographic, metallographic, microthermometric characterization of the mineralizations and hydrothermal alterations of the Campana prospect (Cu-Au±Mo Porphyry), in Pácora (Caldas, Colombia)

Abstract

The Campana prospect is a porphyry-type Cu-Au (\pm Mo) deposit, located within the Miocene Middle Cauca Belt, in the municipality of Pácora, Caldas. It is located across the Romeral fault system, which is a suture that contacts rocks of continental affinity to the east with rocks of oceanic affinity to the west. In this prospect, 4 main stages of intrusions associated with the development of magmatic-hydrothermal breccias were identified from petrographic and metallographic studies. Each phase induced various hydrothermal alteration assemblages of sodium-calcic, potassic, propylitic, phyllic (sericitic quartz), intermediate argillic and advanced argillic type, although telescoping processes locally disrupted the stratigraphic order in certain zones of the prospect. The mineralization presents: i) sulfides and sulfosalts, such as, pyrite, chalcopyrite, sphalerite, galena, tetrahedrite-tennantite and freibergite; ii) oxides, predominantly magnetite, hematite and, Ti-bearing dioxides; and iii) native elements such as gold, silver, electrum. These occur in mineralization styles ranging from disseminations, veinlets of different types, to replacements and inclusions. The microthermometric data on fluid inclusions obtained in the different types of veinlets, presented homogenization temperatures ranging from 530.1°C to 296.6°C and salinities between 50.09% and 0.177% wt. eq. NaCl. The wide range of salinity and homogenization temperature suggests that the genesis of the deposit begins with a magmatic-hydrothermal stage, characterized by the higher temperatures obtained in this study, and ends with a shallower and lower temperature late epithermal stage. All this allows concluding that this zone represents a complete porphyritic system, from the internal intrusive part to the shallower stages or zones represented by zones characterized by low- to intermediate-sulfidation epithermal veins, which are consistent with those reported worldwide for this type of deposits.

Keywords: Middle Cauca Belt; Romeral Fault System; Salinity; Sulfides; Native elements; Homogenization temperature.

Introducción

Los depósitos de tipo pórfido representan uno de los sistemas geológicos más estudiados a nivel mundial, lo que los convierte en un referente económico y metalogénico (Sillitoe, 2000, 2010; Richards, 2003; Seedorff *et al.*, 2005). Estos depósitos representan el 60% de la producción mundial de Cu y son fuente de otros metales, tales como: Mo, Ag, Zn, W, Sn, Re, y Au (Gray y Van Rytthoven, 2020). Además, los depósitos de pórfido de oro-cobre-(molibdeno) ocurren predominantemente sobre zonas de subducción, caracterizadas por la generación de magmas oxidados y ricos en agua (Park *et al.*, 2019). En estos entornos, los magmas formadores de pórfidos son inyectados hacia los niveles superiores de la corteza a partir de la corteza media a inferior, donde una variedad de procesos petrogenéticos como la cristalización fraccionada y la asimilación producen magmas andesíticos a riodacíticos ($\text{SiO}_2 = 57\text{--}70$ %peso; Chiaradia y Caricchi, 2017; Velásquez-Ruiz *et al.*, 2022) a partir de basaltos inicialmente primitivos ($\text{SiO}_2 = \sim 50$ %peso). Esto convierte a la cordillera de los Andes en un laboratorio natural para los depósitos de tipo pórfido, incluyendo los Andes septentrionales de Colombia.

Para Colombia, Sillitoe (2008) estudió la metalogénesis de los principales cinturones y depósitos auríferos de la parte norte de la cordillera de los Andes, donde definió “El Cinturón del Cauca Medio” (Figura 1A), dentro del terreno CCSP (Central Continental Sub-plate Realm) propuesto por Cediel *et al.* (2003) (Figura 1A), y una época (Mioceno), lo que la cataloga como una provincia metalogénica muy importante para el país, donde se ubican grandes depósitos minerales de Cu-Au, de tipo pórfido (Nuevo Chaquiro, La Colosa, Miraflores, etc.) y epitermales (Marmato, Buriticá, El Zancudo, etc.). El prospecto Campana es uno de estos, y está localizado en el municipio de Pácora, Caldas, en el flanco occidental de la cordillera Central al NE del municipio de Marmato, desarrollado a través del Sistema de Fallas Cauca-Romeral. El área de estudio abarca un área de 17 km² (1665 Ha), compuesto por rocas de afinidad oceánica, como el Complejo Quebradagrande, Complejo Arquía, Serpentinitas de Pácora, basaltos de la Formación Barroso y, de origen continental, como la Formación Amagá. El prospecto representa un sistema magmático-hidrotermal promisorio de mineralizaciones tipo pórfido de Cu-Au±Mo para la región. Sin embargo, se han realizado pocos estudios al respecto y no hay una opinión generalizada para la génesis de los depósitos de

tipo pórfido en el Cinturón del Cauca Medio. Este estudio presenta una caracterización petrográfica, metalográfica y microtermométrica de inclusiones fluidas, con el fin de determinar la génesis y evolución metalogénica del prospecto Campana en el municipio de Pácora (Caldas, Colombia).

Estos datos son consistentes con los reportados a nivel mundial en depósitos de características metalogénicas semejantes (p.ej. El Salvador, Chile), permitiendo generar una trazabilidad o comparación de los fluidos mineralizantes y la evolución hidrotermal del prospecto.

Marco geológico

El prospecto Campana se localiza en el municipio de Pácora, en el departamento de Caldas, en el flanco occidental de la cordillera Central al NE del municipio de Marmato. Las diferentes unidades aflorantes en la zona presentan un marcado control estructural dominado por el Sistema de Fallas de Romeral (SFR). Este sistema estructural de edad Cretácica se extiende desde Ecuador hasta la región central de Colombia (Marín-Cerón y Vinasco-Vallejo, 2012) donde las rocas más antiguas son de esta misma

edad y corresponden al basamento de la Cordillera Central. En el área de estudio, este basamento está constituido por rocas de los Complejos del Cretácico inferior: Arquía y Quebradagrande (Moreno-Sánchez *et al.*, 2007), al igual que de la Formación Barroso (Álvarez-Agudelo, 1971), que aflora en el sector occidental de la subcuenca de Amagá.

Hacia el este de la zona se presenta el Complejo Quebradagrande, definido por González (2001) como la unidad que agrupa rocas volcánicas y sedimentarias que afloran como una franja larga y estrecha en el flanco oeste de la cordillera Central al occidente de la falla San Jerónimo y al este de la falla Romeral. Al oeste de la zona está el Complejo Arquía, cuyas rocas afloran como una franja alargada, estrecha y discontinua de esquistos anfíbólicos y sericíticos, cuarcitas y neises, junto a anfibolitas y metagabros asociados a cuerpos ultramáficos, representados por las Serpentinitas de Pácora (Gómez *et al.*, 2015). Estas unidades están intruídas por los diferentes cuerpos porfíricos aflorantes en el área (Figura 1B), con edades que varían entre 12 y 6 Ma (Mioceno), datadas por el método K/Ar en roca total (Leal-Mejía, 2011). Las fallas locales, como la falla Campana de carácter dextral, son de menor importancia en el prospecto.

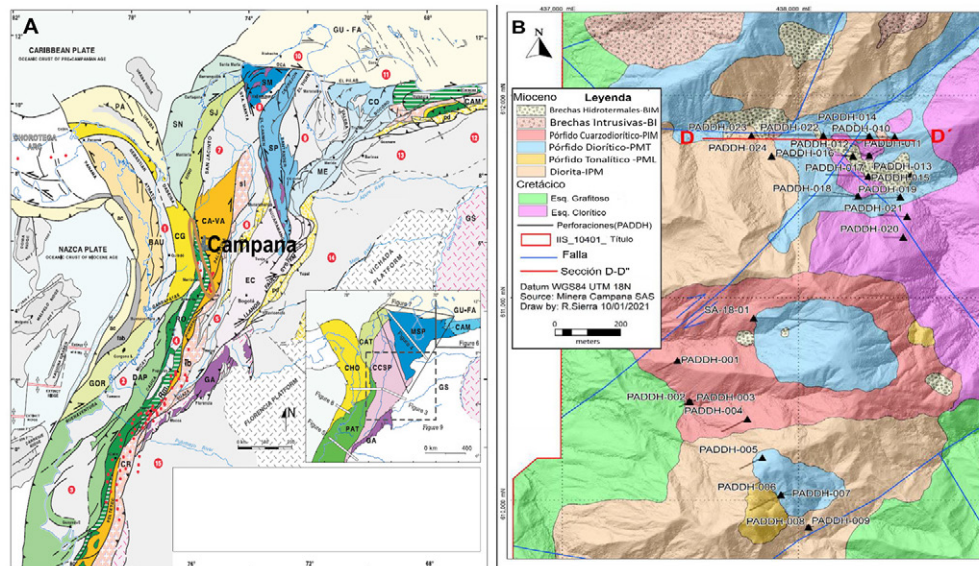


Figura 1. A. Mapa litotectónico y morfoestructural del noroeste de Sudamérica, donde se mencionan los principales terrenos geológicos de Colombia. El ovalo café representa el Cinturón del Cauca Medio (CMB) propuesto por Sillitoe (2008) y donde se muestra la posición y título del prospecto Campana, en el departamento de Caldas. Modificado de Cediel *et al.* (2003). **B.** Mapa de la geología local. Modificado de Redwood (2021). Abreviaturas: GS = Escudo Guayanés; GA = Macizo de Garzón; SP = Macizo de Santander-Serranía de Perijá; ME = Sierra de Mérida; SM = Sierra Nevada de Santa Marta; EC = Cordillera Oriental; CO = Cuenca del Carora; CR = Cordillera Real; CA-VA = Terreno Cajamarca-Valdivia; sl = Bloque San Lucas; ib = Bloque Ibagué; RO = Terreno Romeral; DAP = Terreno Dagua-Piñón; GOR = Terreno Gorgona; CG = Terreno Cañas Gordas; BAU = Terreno Baudó; PA = Terreno Panamá; SJ = Terreno San Jacinto; SN = Terreno Sinú; GU-FA = Terreno Guajira-Halcón; CAM = Terreno montañoso del Caribe; Rm = Mélange romeral; fab = Cuenca del arco anterior; ac = Prisma acrecionario; tf = Relleno de zanja; pd = Piedmonte; 1 = Cuenca del Atrato (Chocó); 2 = Cuenca del Tumaco; 3 = Cuenca del Manabí; 4 = Cuenca del Cauca-Patía; 5 = Cuenca Magdalena Alta; 6 = Cuenca Magdalena Media; 7 = Cuenca Magdalena Baja; 8 = Cuenca Cesar-Ranchería; 9 = Cuenca Maracaibo; 10 = Cuenca de la Guajira; 11 = Cuenca del Halcón; 12 = Cuenca del Guárico; 13 = Cuenca de Barinas; 14 = Cuenca de los Llanos; 15 = Cuenca Putumayo-del Napo; Símbolos adicionales: PALESTINA = Sistema de falla/ sutura; punto rojo = Volcán Plioceno-Pleistoceno; Bogotá = Pueblo o ciudad.

Metodología

Se realizaron análisis macroscópicos detallados (logueo) cada 30 cm, de 7500 m de perforación, distribuidos en 24 pozos de perforación (PADDH), ejecutados en el prospecto Campana, por la sociedad Campana Minera S.A.S. Las descripciones se llevaron a cabo mediante un estudio cuidadoso de estimación a nivel visual con lupa de mano, de cada una de las características relevantes, tales como: cambios litológicos, alteración hidrotermal (se cuantificó a nivel visual el porcentaje de alteración), vetilleo (y su respectiva densidad), mineralización, estructuras, texturas, etc. Posteriormente, se seleccionaron y elaboraron 33 secciones delgadas pulidas y 5 doblemente pulidas (de 80-100 μm de espesor) para estudios microscópicos de petrografía, metalografía, y microtermometría, respectivamente, en sectores que presentaban un interés metalogénico para poder describir la evolución del sistema. Estas secciones fueron realizadas en los laboratorios de Minerlab LTDA, en Bogotá.

Los estudios de microscopía fueron llevados a cabo en un microscopio petro-metalográfico (marca Carl Zeiss, modelo Primotech) en el laboratorio de Metalografía y Microtermometría de la Universidad de Caldas. Las imágenes fueron adquiridas mediante una cámara marca Hayear (modelo 3307) con su software de adquisición de imágenes acoplada al microscopio. Los estudios de petrografía de inclusiones fluidas se hicieron utilizando los principios definidos por Goldstein y Reynolds (1994) y Kouzmanov y Pokrovski (2012). El concepto de asociaciones de inclusiones fluidas o FIAs (*Fluid Inclusion Assemblage*) definido por Goldstein (2003), no se aborda en este estudio *sensu stricto*, sino que se aplica una clasificación genética (origen y composición de fases en el momento del atrapamiento) de estas, tal y como lo proponen Kouzmanov y Pokrovski (2012). Una vez determinadas las zonas de interés, se procedió a separar las secciones de la lámina de vidrio en segmentos de 1 cm \times 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, y una precisión estimada de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ a $\pm 1^\circ\text{C}$. Los cálculos de las

salinidades se realizaron con la temperatura de fusión de la halita (T_m -halita) y de fusión final del hielo (T_m -hielo). Las mediciones realizadas fueron: temperatura eutéctica ($^\circ\text{Te}$), temperatura de fusión del último hielo ($^\circ\text{Tm-Ice}$) y temperatura de homogeneización ($^\circ\text{Th}$); verificando que las inclusiones fluidas medidas presentaran una relación L/V constante y no tuvieran evidencias de *leaking* o decrepitación. Los datos microtermométricos obtenidos fueron procesados mediante el software AqSo_NaCl, incluido en el paquete del software FLUIDS versión 2 (Bakker, 2018), en el sistema H₂O-NaCl, que es de uso libre y disponible en: <https://fluids.unileoben.ac.at/Computer.html>.

Resultados obtenidos

Descripción litológica

Dentro del prospecto Campana se encontraron cuatro eventos magmáticos-hidrotermales principales, con sus subeventos derivados, que marcan el origen y evolución del sistema completo (Figura 2A). La etapa Premineral (IPM) (Intrusivos Pre-Mineralización) (Figura 2B1-2B5) se caracteriza por presentar los intrusivos dioríticos a cuarzodioríticos con poca presencia de vetillas tipo A, y baja mineralización. Dentro de esta etapa se identificaron 4 subeventos, que son los siguientes: los intrusivos de la primera etapa (IPM-0) (Figura 2B1) están representados por dioritas a cuarzodioritas, con textura fanerítica, holocristalina, equigranular. Están compuestos por: cuarzo (15% vol; 2 mm), plagioclasa (50% vol; 3-5 mm), feldespato potásico (5%; 2 mm), hornblenda (25% vol; 2,8-4 mm) la cual presenta epidotización incipiente, piroxeno (5%; 0,5 mm), y ausencia de vetilleo o mineralización.

El intrusivo (IPM-1) (Figura 2B2) de composición cuarzodiorítica presenta textura holocristalina con masa fundamental microcristalina fina (aplítica) de plagioclasa y cuarzo (40%; 0,5 mm) y fenocristales de plagioclasa (60%; 1,8-2,4 mm). Las plagioclasas evidencian alteración incipientemente a feldespato potásico (alteración potásica). Presenta textura tipo *crowded*. El intrusivo (IPM-2) (Figura 2B3) empieza a presentar vetillas de tipo A (tempranas) (solo cuarzo; 0,5 mm de espesor) y alteración potásica conspicua (selectiva 60%). En los pórfidos (IPM-3) (Figura 2B4) son igualmente cuarzodioríticos y presentan textura porfirítica, con fenocristales de plagioclasa (50%; 2,5-5 mm), cuarzo (15%; 2,8 mm) y una masa fundamental microcristalina (< 1 mm) de cuarzo, plagioclasa, la

cual evidencia alteración potásica (selectiva 60%) y vetillas de anhidrita y biotita (2,5 mm de espesor). La mineralización es incipiente. Los intrusivos IPM-4 (Figura 2B5) corresponden a una cuarzdiorita de grano fino, compuesta por cuarzo (10% vol; 0,6 mm), plagioclasa (35% vol, 1 mm), feldespato potásico (5%; 1 mm), hornblenda (40%; 1,5 mm) y piroxenos (10%; 1 mm). En esta fase del evento se empiezan a desarrollar vetillas de cuarzo y feldespato potásico y EB (cuarzo y biotita temprana de alteración) (0,4-0,8 mm de espesor) que cortan vetillas A tempranas, pero sin mineralización.

La segunda etapa es el evento Mineral Temprano (PMT) (Pórfidos Mineralización Temprana) (Figura 2B6-2B10) el cual se caracteriza por aumento en la densidad de las vetillas tipo A y B, donde estas últimas cortan a las A, e igualmente, experimentan truncamientos con fases intrusivas posteriores. Las variaciones texturales en las rocas son levemente notorias respecto al evento premineral (IPM) y difícilmente discernibles; la alteración hidrotermal es potásica (selectiva $\geq 50\%$) con sobreimposición de alteración sódico-cálcica y filica. La mineralización es diseminada y con presencia de vetillas principales (A, B) y está compuesta principalmente por pirita, calcopirita, \pm bornita. Este evento también desarrolló Brechas Intrusivas (BI) (Figura 2B10) compuestas por fragmentos del pórfido precursor o del evento IPM, presencia de vetillas tipo A y significativa mineralización. Dentro del evento se diferenciaron al menos 3 subeventos con las siguientes características: el primer subevento (PMT-1) (Figura 2B6) se caracteriza por un mayor grado de alteración potásica en el pórfido, aumento en la densidad de las vetillas (>20) en enrejado (*stockwork*) con cuarzo, calcopirita, \pm bornita, principalmente (1-2 mm de espesor). La textura porfirítica es similar a la del pórfido PMT-1 con fenocristales de plagioclasa alterándose a feldespato potásico (70% vol; 4,3-7 mm) y masa fundamental microcristalina (30%). El segundo subevento PMT-2 (Figura 2B7) se caracteriza por litologías de tipo pórfidos dioríticos compuestos por fenocristales de plagioclasa (70% vol; 7 mm), una masa fundamental microlítica (25% vol), hornblenda (5%; 3 mm) y piroxenos (1%; 1 mm). Las vetillas tipo A presentan una densidad moderadamente alta (>10) en la muestra. Estas vetillas presentan morfologías levemente sinuosas y segmentadas que están compuestas principalmente por cuarzo con presencia de molibdenita y espesores que oscilan entre 0,8-5,4 mm. Este evento generó brechas intrusivas (BI-1)

(Figura 2B8) compuestas por fragmentos líticos o clastos del pórfido de la etapa PMT-2 y cementadas por turmalina, biotita y sulfuros (calcopirita, pirita).

Un tercer subevento PMT-3 (Figura 2B9) donde el pórfido presenta una composición más ácida (monzodiorítica) se caracteriza por disminución en la densidad de las vetillas, y presencia de fenocristales de biotita (15% vol; 6 mm), plagioclasa (30% vol; 15 mm) y cuarzo (35%, 1 mm). Este evento generó brechas intrusivas (BI-2) (Figura 2B10) caracterizadas por tener una matriz rica en turmalina y fragmentos líticos o clastos subredondeados del pórfido de la etapa PMT-1. Este evento marca la transición hacia la etapa Intermineral. La tercera etapa está marcada por el evento Intermineral (PIM) (Pórfidos Intermineral) (Figura 2B11-2B17) representada por intrusivos de características porfiríticas con alteración potásica, pero que en algunas zonas presenta sobreimposición de alteración filica. La densidad de las vetillas disminuye considerablemente respecto a la etapa o evento premineral (IPM). Se identificaron 2 subeventos principales: un subevento Intermineral Temprano PIMT y un subevento Intermineral Tardío PIMTd. El primer subevento PIMT-1 (Figura 2B11) está caracterizado por pórfidos dioríticos compuestos por fenocristales de plagioclasa (40% vol; 3-5 mm) en una masa fundamental aplítica (60% vol). La relación de corte entre las vetillas B (mejor desarrollo de la sutura de pirita y calcopirita; 14 mm de espesor) son cortadas por las D (cuarzo+ pirita; 2 mm de espesor). La alteración es de tipo potásica (selectiva $\geq 25\%$) en donde en algunas zonas es sobreimpuesta por una alteración filica incipiente. La mineralización está representada por pirita+calcopirita \pm bornita, diseminada. El segundo subevento PIMT-2 (Figura 2B12) son pórfidos dioríticos a cuarzdioríticos con fenocristales de plagioclasa (35% vol; 1-8 mm) en una masa fundamental aplítica. La alteración es potásica incipiente (selectiva $\leq 15\%$) y la mineralización está representada por calcopirita, pirita \pm bornita, diseminada. Las vetillas son tipo B, pero con una densidad baja (<5 en las muestras) y presentan xenolitos de cuarzo refractario. El subevento intermineral tardío PIMTd (Figuras 2B13, 2B14) se caracteriza por truncamiento de vetillas tipo B, C, D, principalmente. Se observa sobreimposición de la alteración potásica por filica y en menor proporción propilitica. Los pórfidos varían de composición diorítica a cuarzdiorítica, con relaciones de fenocristales de plagioclasas y cuarzo (25-30% vol; 2-5 mm), una masa fundamental

microcristalina (aplítica) (65-60% vol) y, en algunas zonas, se desarrollan contactos tipo *Chilled*.

La mineralización está representada por pirita y calcopirita. Una característica sobresaliente de este evento intermineral en general es el desarrollo de diques “Interminerales” que han sido observados en otros depósitos de este tipo por Kirkham (1971) y brechas magmáticas-hidrotermales interminerales tal y como lo propone Sillitoe (2000, 2010). Los diques interminerales (Figura 2B15) generan truncamientos en las vetillas y cambios abruptos en la textura de las litologías implicadas. Son de composición diorítica, con masa fundamental aplítica máficas (muy oscura debido a minerales ferromagnesianos). Por otro lado, las brechas magmáticas-hidrotermales (BIM-1) (Figura 2B16) de este evento en general se formaron en una etapa temprana dentro de este y se caracterizan por ser clastosoportada con fragmentos líticos (70%) subredondeados a angulosos, del evento intermineral temprano (PIMT-1,2), en una matriz compuesta por biotita, calcopirita, pirita, (30%), con alteración potásica, y mineralización diseminada de calcopirita

y pirita, principalmente. La segunda brecha (BIM-2) (Figura 2B17) representa una etapa tardía del evento intermineral y se caracteriza por fragmentos líticos angulosos, del evento (PIMTd) y de la roca encajante (esquistos cuarzo sericíticos), clastosoportada (60%) con matriz compuesta por turmalina, cuarzo, calcopirita y pirita. La alteración es filica incipiente (selectiva $\leq 15\%$) y la mineralización es diseminada de pirita y calcopirita.

La cuarta etapa de desarrollo del prospecto es el Evento Mineral Tardío (PML) (Figura 2B18, 2B19), se caracteriza, al igual que en otros depósitos a nivel mundial, por ausencia de vetillas, alteración propilitica dominante, baja concentración de la mineralización y un ligero alineamiento de los fenocristales plagioclasa y hornblenda. Los pórfidos son de composición diorítica a tonalítica con fenocristales de plagioclasa y cuarzo (70%; 1-1,3 cm) hornblenda (10%; 5 mm) y masa fundamental microlítica (20%) (Figura 2B18). En algunas zonas en contacto con la roca encajante se puede observar alineamiento de algunos fenocristales de plagioclasa (Figura 2B19).

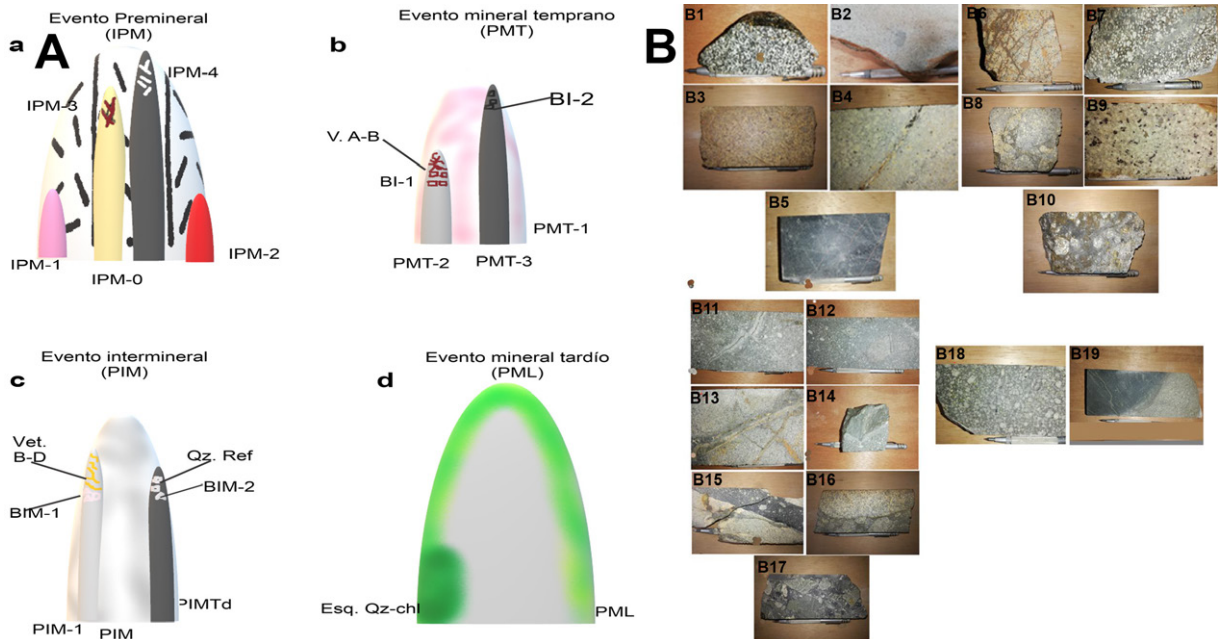


Figura 2. Secuencias de intrusión para el prospecto Campana. **A.** Modelo idealizado de los cuatro eventos intrusivos con sus subetapas y litologías asociadas. **B.** Descripción macroscópica de cada uno de los eventos identificados en la formación del prospecto. **B1-B5.** Intrusivos de la Etapa Premineral (IPM). **B6-B10.** Evento Mineral Temprano (PMT). **B11-B17.** Evento Intermineral (PIM). **B18-B19.** Evento mineral tardío (PML).

Petrografía y metalografía

Mineralizaciones

Sulfuros (pirita, calcopirita, esfalerita, galena, molibdenita, bornita), sulfosales de Cu, Ag, Pb, Fe, Zn (tetraedrita-tennantita, boulangerita, freibergita, proustita):

Se identificaron 12 especies de sulfuros, aunque este estudio se centra en 6 de ellas, debido a su predominancia y su importancia genética en la investigación. El primero es la pirita (Figura 3A), que es el sulfuro más abundante en las muestras analizadas. Morfológicamente varía entre euhedral hasta anhedral con hábitos: cúbico, piritoédrico, octaédrico, además de coliformes y framboidal. Los tamaños de los cristales varían considerablemente entre 5-5000 μm , aproximadamente. La pirita presenta fracturamiento y en muchas ocasiones esta rellena por otras fases minerales tales como galena, esfalerita, sulfosales de Cu-Ag, etc.; con rugosidades a nivel superficial de los cristales, probablemente producto de deformación. Los estilos de mineralización más comunes son el diseminado, masivo (lentes masivos), con embahiamientos e incluida en vetillas. En cuanto a las texturas de mena se encuentran: intercrecimiento, inclusiones de otras fases minerales, texturas de reemplazamientos, framboidales, coliformes, etc.

Las piritas hospedadas en las rocas encajantes metamórficas (esquistos negros, serpentinitas) presentan texturas de recristalización, fracturamiento, etc. Algunos cristales muestran porosidad, donde albergan algunos minerales petrográficos. La calcopirita (Figura 3B) se caracteriza por ser de subhedral a anhedral de hábito masivo principalmente. Los tamaños varían entre 5-3000 μm . Las principales texturas que exhibe la calcopirita son diseminadas, intercrecida, exsuelta, e incluida. La bornita (Figura 3B) se caracteriza por presentar hábitos masivos con tamaños que oscilan entre 10-40 μm . La molibdenita (Figura 3C, 3D) es un mineral bastante importante en este tipo de depósito e indica las condiciones de moderada a alta temperatura que puede alcanzar el cuerpo, además se presenta con hábito laminar-hojoso,

típicos de este mineral, exfoliación perfecta, color gris medio con tonalidad rosada, finalmente, los tamaños oscilan entre 80-800 μm .

La esfalerita (Figura 3D) se presenta por lo general con hábito masivo a octaédrico en agregados masivos a subredondeados, anhedral-subhedral. Los tamaños de la esfalerita son muy variables y van desde las 20-4000 μm . La galena (Figura 3E) se presenta anhedral a subhedral con hábitos masivos principalmente, los tamaños varían entre 20-80 μm en promedio y las principales texturas son de intercrecimientos, relleno de espacios abiertos, inclusión y diseminada. En cuanto a las sulfosales de Fe, Cu, Ag, Pb, Zn, la más importante y abundante es la serie de solución sólida tetraedrita-tennantita (Figura 3F), que se presentan en las zonas más someras del prospecto, formando vetillas polimetálicas y variando composicionalmente a series más ricas en Ag tales como: freibergita ($(\text{Ag,Cu,Fe})_{12}(\text{Sb,As})_4\text{S}_{13}$), proustita ($(\text{Ag}_3\text{AsS}_3)$) (Figura 3G), boulangerita ($(\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11})$) (Figura 3E). Comúnmente, estos se presentan con hábitos masivos, de color gris medio con tonalidad verde oliva y sus tamaños oscilan entre 15-200 μm con texturas de intercrecimiento, diseminada, relleno de fracturas, entre otras.

Óxidos (magnetita, especularita, rutilo-anatasa) y elementos nativos (oro, plata):

La magnetita (titanomagnetita) (Figura 3H) se presenta con hábitos masivos, esqueletales principalmente y sus tamaños oscilan entre 25-150 μm . La hematita se caracteriza por presentar hábitos masivos a laminares u hojosos (especularita) (Figura 3I) y los tamaños oscilan entre 5-40 μm . Los dos polimorfos del TiO_2 (rutilo, anatasa) (Figura 3J) se caracterizan por presentar hábitos prismáticos y aciculares con tamaños que oscilan entre 10-100 μm . El oro (Figura 3K) y la plata (alterándose a argentita) (Figura 3L) se caracterizan por presentar hábitos granulares y laminares con tamaños que oscilan entre 5-80 μm . Las principales texturas que presentan estas dos especies minerales son diseminadas, inclusión, crecimiento epitaxial, intercrecimiento, etc.

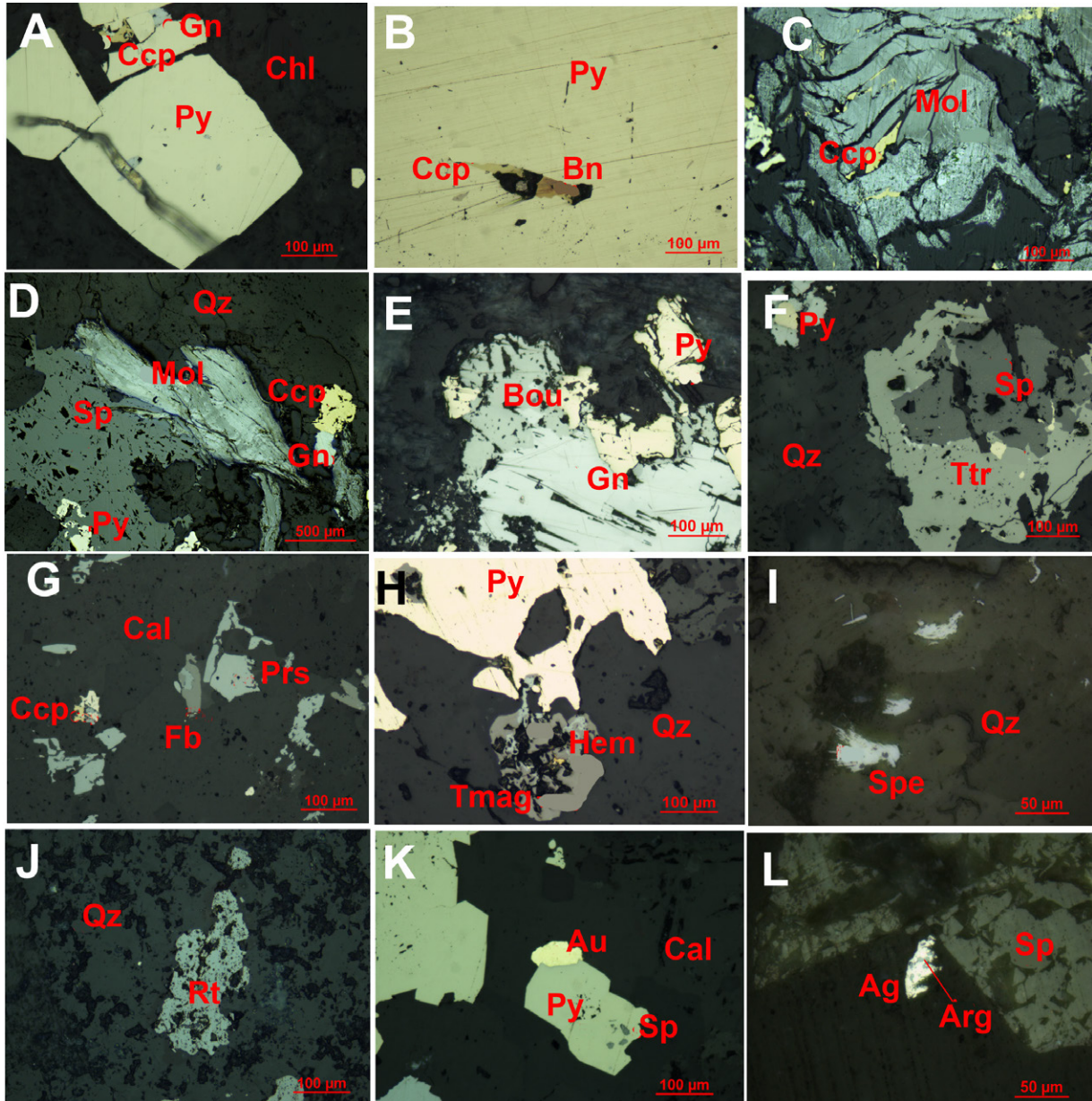


Figura 3. Metalografía de las mineralizaciones identificadas en el prospecto Campana. **A.** Pirita euhedral (cúbica) en intercrecimiento con calcopirita y galena rellenando fracturas en ella, 200X, PPL. **B.** Calcopirita alterándose a bornita, incluidas en pirita, 200X, PPL. **C.** Molibdenita con hábito laminar en intercrecimiento con calcopirita, 200X, PPL. **D.** Molibdenita hojosa en intercrecimiento con esfalerita, galena y calcopirita en una vetilla tipo B, 50X, PPL. **E.** Galena alterándose a boulangerita y en intercrecimiento con pirita, 200X, PPL. **F.** Tetrahedrita-tennantita masiva en intercrecimiento con esfalerita en una vetilla tipo D, 200X, PPL. **G.** Freibergita masiva y proustita prismática diseminadas en una vetilla tipo E, 200X, PPL. **H.** Titanomagnetita masiva alterándose a hematita y en intercrecimiento con pirita en una vetilla tipo M, 200X, PPL. **I.** Especularita laminar diseminada en una vetilla tipo M-A (temprana), 500X, PPL. **J.** Cristales prismáticos de rutilo diseminados en cuarzo, 200X, PPL. **K.** Grano de oro en intercrecimiento con pirita en una vetilla tipo D-E, 200X, PPL. **L.** Grano de plata alterándose a argentita en una vetilla tipo E, 500X, PPL. Todas las microfotografías fueron tomadas en luz reflejada. Abreviaturas: Py (Pirita), Ccp (Calcopirita), Sp (Esfalerita), Gn (Galena), Bn (Bornita), Mol (Molibdenita), Bou (Boulangerita), Ttr (Tetrahedrita-tennantita), Fb (Freibergita), Prs (Proustita), Tmag (Titanomagnetita), Hem (Hematita), Spe (Especularita), Rt (Rutilo), Au (Oro), Ag (Plata), Arg (Argentita), Qz (Cuarzo), Chl (Clorita), Cal (Calcita). Abreviaturas tomadas de [Warr \(2021\)](#).

Alteraciones hidrotermales: las alteraciones hidrotermales representan todos los cambios fisicoquímicos que experimentaron las rocas enmarcadas dentro del prospecto Campana. Dentro del prospecto se identificaron las alteraciones más comunes en este tipo de depósitos junto a las mineralizaciones asociadas en cada una de ellas (Figura 4). Estas se describen en orden cronológico.

Alteración sódico-cálcica. Esta alteración está marcada por la presencia o formación de actinolita a partir de las plagioclasas cálcicas a intermedias, hornblendas o piroxenos, con características subhedrales, hábitos prismáticos y tamaños promedio de 300 μm (Figura 4A). El otro mineral que marca la alteración es la formación de magnetita anhedral. Las vetillas observadas en esta alteración son principalmente tipo M (magnetita-cuarzo-albita, \pm actinolita), las más tempranas y de mayor temperatura dentro del prospecto Campana. La mineralogía de mena está representada por pirita y calcopirita con hábitos masivos, además de abundante magnetita (titanomagnetita) y especularita, diseminadas y formando vetillas M.

Alteración potásica. Está definida por la generación de feldespato potásico, tipo ortosa como producto de alteración selectiva (>70%) a partir de plagioclasa intermedia (Figura 4B), pseudomorfa de esta, con tamaños que oscilan entre los 800-1400 μm . Adicionalmente se presentan fenocristales de hornblenda prismática (>5000 μm) de la masa fundamental alterándose a biotita masiva (>500 μm). En la parte epitermal del sistema, la alteración está representada por las asociaciones: adularia (prismática; 100 μm)-cuarzo; adularia-anhidrita, adularia-carbonatos y adularia-esfalerita, presentándose de forma diseminada en la roca y en vetillas tipo D-E.

Texturalmente la alteración es pervasiva, con un grado de destrucción de la textura original de la roca moderada (40-50%), selectiva de los fenocristales de plagioclasa y feldespato alcalino en general, donde estos se están alterando a minerales como: feldespato, sericita, biotita y anhidrita, principalmente. Vetillas tipo A son las más comunes asociadas a esta alteración.

Los principales minerales de mena presentes en esta alteración son: pirita, calcopirita \pm molibdenita, rutilo-anatasa, \pm magnetita y oro. Eventos de telescopio se pudieron observar en ella, marcada por la asociación galena-esfalerita-tetraedrita-tennantita en vetillas tipo D-E que hacen parte de los eventos subepitermal a epitermal del sistema.

Alteración propilitica. Está caracterizada por la asociación mineral: epidota (zoisita, clinzoisita)-albita-clorita-carbonatos-sericita, pirita, hematita, \pm magnetita y, algunas veces, zeolitas o montmorillonita (esmectita)-illita (Figura 4H). En cuanto a los minerales de mena, incluye comúnmente: pirita-calcopirita-galena-esfalerita, diseminadas y formando vetillas tipo D.

Alteración filica (cuarzo-sericitica). La alteración filica (cuarzo-sericitica) en el prospecto está definida por la asociación: sericita+cuarzo+pirita, a partir, de plagioclasa y ortosa (Figura 4C). Otras fases minerales presentes son arcillas tales como: caolín-illita, carbonatos, anhidrita y minerales de mena como: pirita, calcopirita, molibdenita, galena, esfalerita, oro, etc., de forma diseminada. Las vetillas asociadas son principalmente de tipo B (compuestas por cuarzo drusiforme+molibdenita+calcopirita) y D (cuarzo+carbonatos+sulfosales de Ag, Cu, Fe) cortando a las vetillas B, sugiriendo un evento de telescopio para esta alteración. El grado de alteración es selectivo a pervasivo (30-65%). Hornblenda alterándose a clorita y pirita es común dentro de esta alteración, sobre todo en la transición a la alteración argílica intermedia.

Alteración argílica intermedia. La alteración argílica intermedia (Figura 4D) está marcada por la asociación de arcillas de baja temperatura como caolinita, grupo de la montmorillonita, illita + sericita + cuarzo + plagioclasa \pm clorita + pirita + calcopirita \pm yeso, etc. Los minerales de mena se presentan de forma diseminada y formando vetillas tipo C (pirita con halos de sericita-clorita verde).

Alteración argílica avanzada. Esta alteración en el prospecto Campana (Figura 4E, 4G) se presenta como producto de alteración de plagioclasas a arcillas de alta temperatura, tales como dickita y pirofilita. En la zona interna de la alteración se presenta caolinita y pirofilita, así como, zunyita y topacio donde están intercalados con venas de sulfuros y reemplazan la sericita inmediatamente adyacente a las venas. En la parte superior del halo o zona de alteración se presenta dickita. La alunita es más común, en la parte interna. Otras fases minerales típicas de esta alteración son andalucitas, diásporo, corindón, zircón y rutilo, este último como agujas incluidas en los corindones y diseminados en las rocas. Los tamaños están en rangos entre 5-60 μm . Las transiciones entre la alteración argílica avanzada con las otras alteraciones son de gradual a neta. La mineralización presente en esta alteración está dada por la asociación pirita, calcopirita, esfalerita, galena,

tetraedrita-tennantita, argentita (Figura 2L), plata nativa, magnetita, sulfosales de plata, marcasita, greigita, etc., diseminadas y formando vetillas tipo D-E.

Silicificación. Es una alteración ubicua presente en la parte epitermal del sistema, formando calcedonia (Figura 4I) junto a calcita, pervasiva (50%) y obliterando las rocas que afecta.

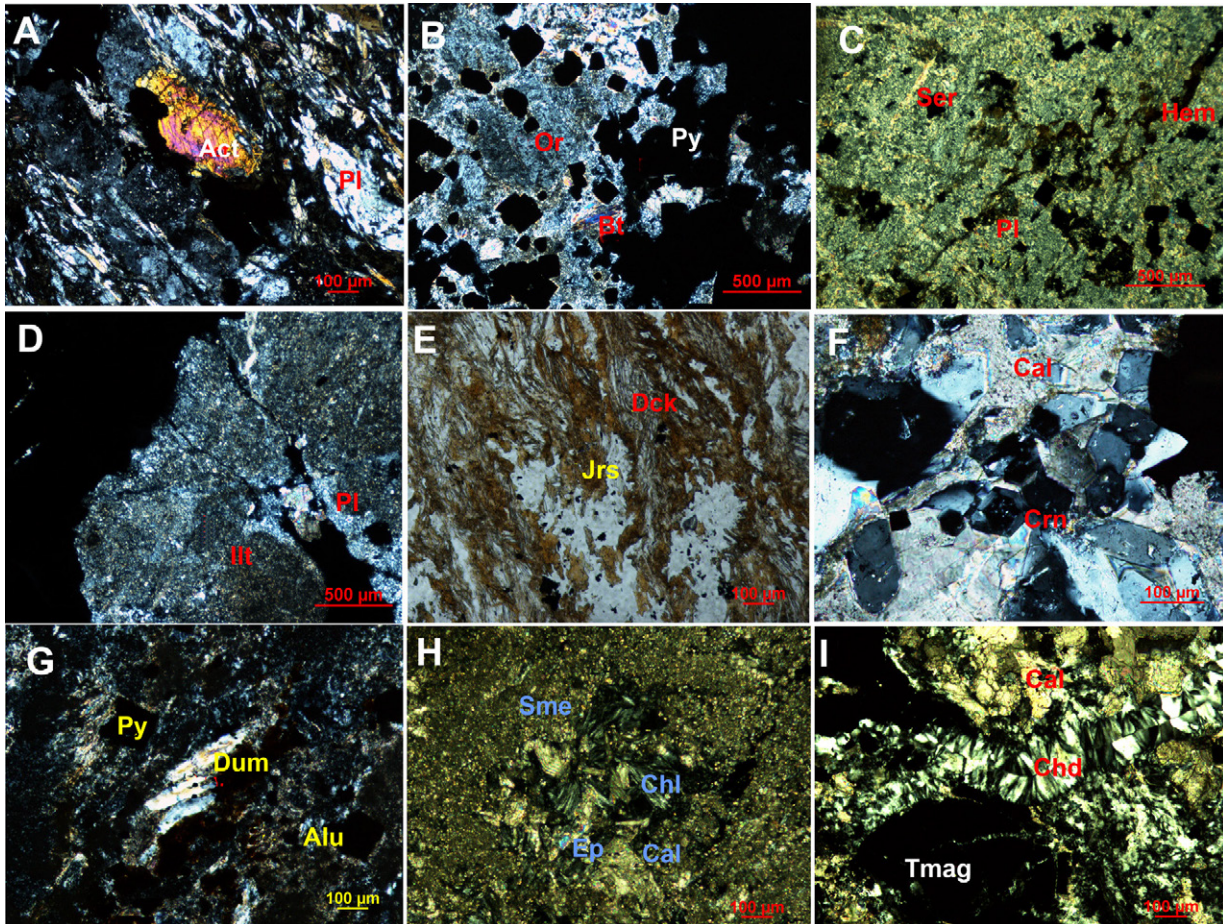


Figura 4. Petrografía de las principales alteraciones hidrotermales identificadas en el prospecto Campana. **A.** Alteración sódico-cálcica donde se observa el desarrollo de actinolita, 100X, XPL. **B.** Alteración potásica donde se observa una plagioclasa alterándose a ortosa y biotita a partir de una hornblenda, 50X, XPL. **C.** Alteración filica (cuarzo-sericitica) a partir de una plagioclasa alterándose pervasivamente a sericita, 50X, XPL. **D.** Alteración argilica intermedia donde se observa plagioclasa alterándose a illita, 50X, XPL. **E-G.** Alteración argilica avanzada donde se observan los principales minerales que la marcan. Jarosita y dickita (E), 100X, PPL., Corindón en (F), 200X, XPL, y dumortierita en (G), 100X, XPL. **H.** Alteración propilitica marcada por la formación de esmectita, clorita, epidota, calcita, 100X, XPL. **I.** Silicificación donde se observa una vetilla de calcedonia y calcita, 100X, XPL. Todas las microfotografías fueron tomadas en luz transmitida. Abreviaturas: Act (Actinolita), Pl (Plagioclasa), Qz (Cuarzo), Or (Ortosa), Bt (Biotita), Ser (Sericita), Ill (Illita), Jrs (Jarosita), Dck (Dickita), Crn (Corindón), Dum (Dumortierita), Sme (Esmectita), Chl (Clorita), Cal (Calcita), Ep (Epidota), Chd (Calcedonia), Py (Pirita), Hem (Hematita), Tmag (Titanomagnetita). Abreviaturas tomadas de Warr (2021).

Vetillas: la clasificación de las vetillas fue llevada a cabo de acuerdo con lo propuesto por Gustafson y Hunt (1975), Gustafson y Quiroga (1995) y Sillitoe (2000, 2010). Así pues, se realizó teniendo en cuenta características como: composición mineralógica, halos de alteración, morfología, espesor, sinuosidad y textura. A continuación, se hace la descripción en orden

cronológico (de las más antiguas a las recientes) de formación dentro del prospecto Campana (Figura 5).

Vetillas tipo M (magnetita). Macroscópicamente están compuestas por cristales de magnetita y cuarzo. A nivel microscópico están compuestas por titanomagnetita, cuarzo y pirita (Figura 5A). Morfológicamente, estas vetillas varían desde levemente sinuosas hasta rectas,

mostrando un carácter discontinuo. En presencia de cuarzo, el bandeamiento es incipiente. Un rasgo distintivo es que típicamente carecen de halo de alteración.

Vetillas tipo EB. Este tipo de vetillas, denominadas EB (*Early Biotite*) por Gustafson y Quiroga (1995), y un subtipo denominado EDM (*Early Dark Micaceous*), definidas así por Meyer (1965), son vetillas compuestas por micas verdes a oscuras, principalmente biotita. Estas se caracterizan por presentar biotita de alteración junto a ortosa, plagioclasa, halos de alteración de albita y clorita muy fina asociadas a pirita principalmente (Figura 5B). La asociación general está dada por biotita+pirita+carbonatos+ortosa+plagioclasa+sericita±clorita+apatito y son levemente sinuosas y continuas; sin embargo, algunas presentan desplazamiento. En cuanto a la temporalidad, son cortadas por las vetillas tipo B, y la relación con las vetillas tipo A es poco clara o difícil de diferenciar.

Vetillas tipo A. Estas vetillas (Figura 5C) se caracterizan mineralógicamente por presentar cuarzo (sacaroidal o granular) en un alto porcentaje (>50%) con presencia de feldespato potásico perfitico, anhidrita, y puede o no presentar bornita. Las vetillas observadas en este prospecto son principalmente de pirita y calcopirita. Morfológicamente se presentan discontinuas, segmentadas e irregulares, debido a múltiples episodios de recristalización y cizallamiento (*shearing*). El espesor de estas vetillas está entre 0,5 a 2,0 cm. Las vetillas de magnetita (40%) y cuarzo (60%) son consideradas aquí como variedades de vetillas tipo A, que se diferencian del tipo M porque estas últimas están compuestas por magnetita (≥70%). Estas vetillas tienden a tener paredes más paralelas y ocupan fracturas de forma más sistemática y continuas. Algunas de estas pueden presentar simetría interna, con feldespato potásico en la sutura o en los bordes de las vetillas, lo cual no ocurre en las más antiguas. La presencia o concentración de cuarzo es más abundante y grueso en este tipo de vetillas tardías.

Vetillas tipo B. Las vetillas tipo B marcan la transición mineralógica dentro del pórfido (etapa transicional de la mineralización). Las características morfológicas son: desarrollo de paredes paralelas, continuas, planares y simétricas, con sutura central y bandeamiento. El espesor es variable: desde 0,2 a 3 cm. Los sulfuros tienden a presentar tamaños medios a gruesos (Figura 5D), ocupando en muchas ocasiones las paredes de la vena y, como suturas en ellas. Adicionalmente, se observa anhidrita o yeso.

Las texturas exhibidas en estas vetillas son típicas de relleno de espacios abiertos (de tipo sintaxial), por lo que son texturas de cuarzo en peine (drusiforme) y crustificación o bandeamiento simétrico. Una de las características mineralógicas más importantes de este tipo de vetillas es la presencia de molibdenita. La presencia de pirita en las vetillas tipo B observadas se da en franjas y vetillas posteriores a éstas. La calcopirita está íntimamente asociada a la molibdenita. Igualmente, bornita fue observada en baja concentración y también se observaron texturas brechoides en la molibdenita, sumado a una reapertura de estas vetillas son comunes en el prospecto, las cuales fueron rellenas posteriormente por carbonatos y pirita, principalmente. En cuanto a la temporalidad de formación, estas vetillas B cortan a las vetillas tipo M, EB y A.

Vetillas tipo C (vetillas con halos de sericita-clorita verde). Este tipo de vetillas (Figura 5E) están compuestas por más de un 50% de sulfuros, micas oscuras (biotita), sericita verde, anhidrita y cuarzo en menor proporción. Los espesores varían entre 1-2 cm. Mineralógicamente, estas vetillas están compuestas por sulfuros como pirita+calcopirita y poseen halos de alteración de sericita verde, feldespato potásico, biotita, clorita, anhidrita y ±esfalerita. La hematita es común como producto de alteración supergénica de los sulfuros ricos en hierro y, según con la morfología, se caracterizan por presentar bandeamiento, rectas o planares y ser discontinuas.

Vetillas tipo D-E. Estas vetillas (Figura 5F) representan generalmente la mineralización tardía dentro del prospecto. Composicionalmente, estas presentan pirita, que es el principal mineral de mena, con hábito euhedral (cúbica, principalmente), calcopirita, galena, y esfalerita anhedrales. El cuarzo con halos de alteración posee sericítica (± clorita), calcopirita y ± bornita, esto se da en zonas transicionales profundas. Estas vetillas presentan texturas compuestas (sintaxial + antitaxial), masiva (*bulk*), peine (*comb*), y cristales estirados con crecimiento no direccional y brechoide. Del mismo modo, el yeso (fibroso) o la anhidrita (prismática) son comunes en los bordes de las vetillas. Las sulfosales son muy comunes en estas últimas: tetraedrita-tennantita, proustita y freibergita, siendo la tetraedrita-tennantita la más común de todas. El carbonato más común es calcita o dolomita.

Dependiendo de la alteración a la cual estén asociadas, las vetillas llegan a presentar halos de arcillas, tales como caolinita, esmectita/illita, principalmente. Morfológicamente exhiben características anastomosadas

o sinuosas (a nivel interno), hasta rectas (externo). Los espesores de las vetillas van desde 0,2 a 5 cm en promedio. En cuanto a la temporalidad de formación, estas vetillas cortan a las vetillas M, EB, A, B y son coetáneas con el tipo C y E. Estas últimas son compuestas principalmente por carbonatos en mayor proporción respecto al cuarzo, diferenciándolas de las D. Composicionalmente presentan sulfatos (yeso+anhidrita<60%), mineralizaciones de

sulfuros (pirita, calcopirita, esfalerita, galena) y óxidos de hierro (hematita). Morfológicamente tienen como característica el ser rectas, continuas, con bandeamientos y de espesores muy variables (0,5-2,5 cm). A nivel macroscópico, se estableció una relación de corte para el prospecto teniendo en cuenta el modelo de Sillitoe (2010) (Figura 5G), que resume la secuencia de formación de estas dentro de él.

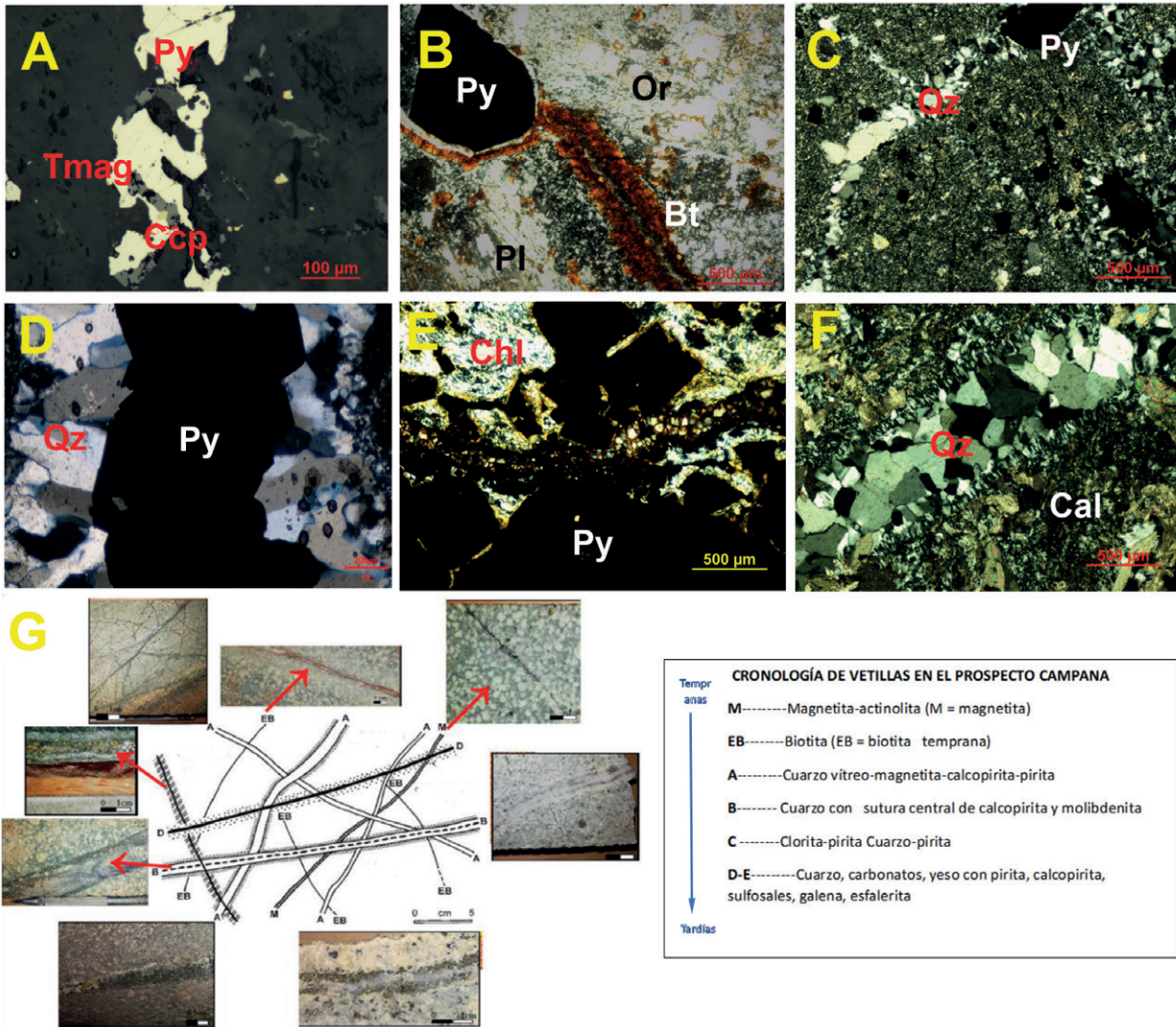


Figura 5. Tipos de vetillas identificadas en el prospecto Campana. **A.** Vetilla tipo M compuesta por titanomagnetita, pirita y calcopirita, 50X, XPL, LR. **B.** Vetilla tipo EB, compuesta por biotita de alteración hidrotermal, pirita, ortosa y plagioclasa, 50X, XPL, LT. **C.** Vetilla tipo A, compuesta por cuarzo y pirita con morfología sinuosa. Se observa el entrecruzamiento (stockwork) del mismo tipo de vetillas, 50X, XPL, LT. **D.** Vetilla tipo B, compuesta por cuarzo con textura sintaxial (peine) y sutura de pirita, 5X, XPL, LT. **E.** Vetilla tipo C, compuesta por pirita y halo de clorita, 5X, XPL, LT. **F.** Vetilla tipo D compuesta por cuarzo, carbonatos, 5X, XPL, LT. **G.** Esquema macroscópico de las vetillas identificadas en el prospecto adaptadas y modificadas del modelo de Sillitoe (2010). Abreviaturas tomadas de Warr (2021).

Secuencia paragenética

La secuencia paragenética determinada para el prospecto Campana (Figura 6) con base a los análisis

petrográficos y metalográficos de las diferentes alteraciones y mineralizaciones permitió identificar la cantidad y tipo de procesos involucrados en la formación del prospecto.



Figura 6. Secuencia paragenética de los principales eventos mineralizantes e hidrotermales realizada a partir de los estudios petrográficos, metalográficos y microtermométricos de inclusiones fluidas del prospecto Campana.

Etapa temprana. En el prospecto está marcada por la generación de las alteraciones de alta temperatura como son: sódico-cálcica y potásica. La alteración sódico-cálcica se formó coetáneamente con la potásica y básicamente está en los esquistos cuarzo actinolíticos del Complejo Arquía, lo que dificulta separar debidamente los procesos hidrotermales de los metamórficos previos. La alteración está marcada por la presencia de magnetita (titanomagnetita), ilmenita, albita y actinolita. Las vetillas principales de alteración son tipo M y de pirita, donde estas últimas cortan a las M. Esta etapa es la de mayor precipitación o presencia de oro.

Subetapa de moderada temperatura. Está representada por la alteración fílica (sericita-clorita-arcilla) y sobreimpuesta a la potásica principalmente. Las plagioclasas fueron alteradas a sericita y arcillas (caolinita-illita), clorita (diseminada y en los halos de alteraciones de las vetillas) y silicificación, tanto en las vetillas (tipo B) como diseminado en las rocas. La molibdenita es la mena caracterizante de la etapa, pero también hay presencia de oro. La transición hacia la etapa argílica intermedia está marcada por el aumento en arcillas (illita/esmectita) y los sulfuros, óxidos, y sulfosales se limitan a las vetillas tipo D. La alteración argílica avanzada marca el final de la subetapa de moderada temperatura. La presencia de arcillas de alta temperatura y acidez (pH bajo) como la dickita/pirofilita son el límite mineralógico con la argílica intermedia. Otros minerales importantes en ella son: andalucita, corindón y sulfatos como alunita/jarosita, que marcan las condiciones ácidas de esta alteración, y dentro de la secuencia se agrupan por su asociación típica en esta. Los minerales de mena se restringen básicamente a las vetillas tipo D y E (más ricas en carbonatos) con alta presencia de sulfuros (pirita, esfalerita, galena), sulfosales (tetraedrita) y telururos. El telescopio de esta alteración sobre las de la etapa temprana es notable, a nivel mineralógico y textural.

Etapa tardía. Marcada por la subetapa de baja temperatura en las cuales las alteraciones propilítica (epidota+clorita+carbonatos a partir de las plagioclasas) y silicificación (calcedonia, jaspe y cuarzo de baja temperatura en general) se encuentran diseminadas y en vetillas (con tetraedrita, pirita, calcopirita, galena, esfalerita, etc.). La alteración propilítica es más somera y de menor temperatura que la potásica, pero son

posiblemente coetáneas en formación por lo cual se ubica en esta subetapa y no en la temprana.

Microtermometría de inclusiones fluidas

La petrografía de las inclusiones fluidas se realizó mediante 70 mediciones en los 5 tipos de vetillas principales del prospecto Campana, analizando cuarzo (vetillas tipo M, EB, A, B) y esfalerita (vetillas tipo D-E). Los análisis siguieron los parámetros dispuestos por diferentes autores (Roedder, 1984; Van Den Kerkhof y Hein, 2001; Wilkinson, 2001; Kouzmanov y Pokrovski 2012), determinando: i) tamaño (variable entre 3-47,5 μm), ii) las formas (ovoides, prismáticas, irregulares), iii) composición (líquido, vapor, sólidos) y iv) 3 trenes aislados que son: primarias, secundarias y pseudosecundarias de acuerdo con Roedder (1984) (Figura 7A1).

Sin embargo, para sistemas tipo pórfido se ha diseñado un estudio en el cual se propone abordar estos análisis microtermométricos desde una perspectiva composicional (genética) de las inclusiones fluidas (Kouzmanov y Pokrovski 2012), la cual se basa en las propiedades del fluido en el momento del entrapamiento. Para esto, se definieron los cuatro tipos principales de inclusiones fluidas (de la clasificación composicional) agrupadas en tres familias o FIAs (*Fluid Inclusion Assemblage*), de acuerdo con el concepto propuesto por Goldstein (2003), teniendo en cuenta las proporciones de las fases a temperatura ambiente, temperatura de homogeneización, salinidad, densidad y contenido metálico.

1. *Inclusiones con intermedia densidad (FIA I).* Composicionalmente son LV (líquido acuoso+vapor) en donde la proporción puede ser mayor a igual entre las dos fases, con tamaños entre 5-35 μm , prismáticas a ovoides, primarias. Estos hacen parte del evento IPM y PMT y medidas en vetillas tipo M y EB (Figura 7A2).
2. *Inclusiones ricas en vapor (70-90 %) (FIA IIA).* Composicionalmente son monofásicas vapor-V o bifásicas LV (líquidoacuoso+vapor) o VL. Los tamaños varían entre 2,55-35 μm con prismáticas a ovoides, primarias. Estas hacen parte del evento PML, y medidas en una vetilla tipo A (Figura 7B1, 7B2).

3. *Hipersalinas (FIA IIB)*. Polifásicas LVS ricas en vapor (70-90 %), tamaño entre 3-45 μm y prismáticas a ovoides, primarias. La fase sólida está representada por halita, silvita, y opacos como calcopirita y hematita. Estos hacen parte del evento PIM, en la transición de las alteraciones potásica a filica hospedadas en cuarzo de una vetilla tipo B (Figura 7B3, 7B4).
4. *Acuosas, baja a intermedia salinidad, ricas en vapor (> 90 %) con baja densidad (FIA III)*.

Estas son inclusiones bifásicas LV o VL con tamaños entre 3-47,5 μm y prismáticas a ovoides, primarias. También hacen parte del evento PML, en la transición de las alteraciones filica-argílica y tienen propilitica lateralmente. La presencia de adularia sugiere una posible alteración potásica (epitermal), hospedadas en cuarzo y esfalerita de una vetilla tipo D-E de la parte somera del prospecto (Figura 7C1-7C4). Todos los datos microtermométricos se presentan en la Tabla 1.

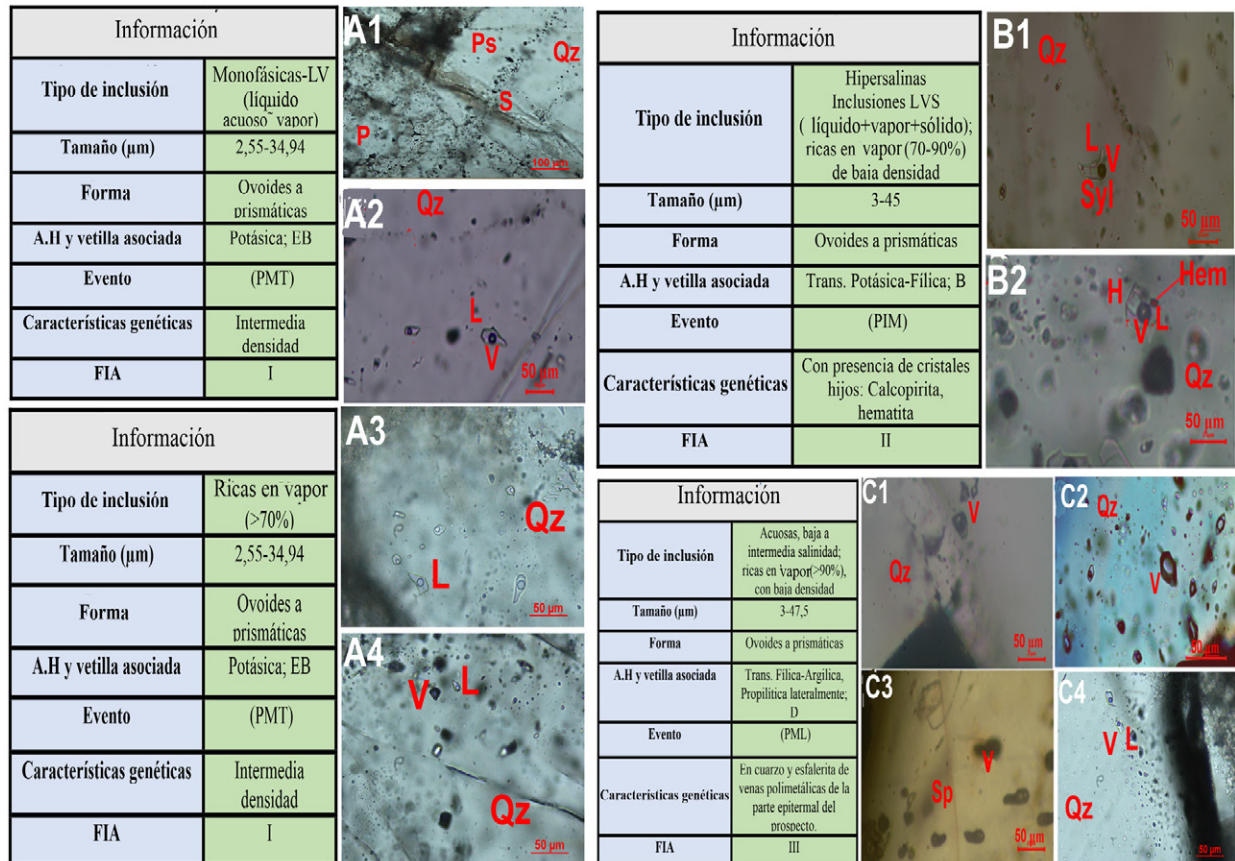


Figura 7. Tipos de inclusiones fluidas con sus características genéticas identificadas en el prospecto Campana. **A1.** Tipo de inclusiones fluidas de acuerdo con su origen: P, Ps, S. **A2.** Inclusiones tipo 1, bifásicas (líquido+vapor) de una FIA tipo I. **B1-B2.** Inclusiones tipo 2, bifásicas (L+V) con minerales, en FIA I- **B3-B4.** Inclusiones tipo 3, polifásicas LVS, cuya fase sólida contiene halita y silvita, además presentan cristales hijos de calcopirita y hematita (las líneas rojas señalan la posición de estos minerales), respectivamente, en una FIA tipo II. **C1-C4.** Inclusiones fluidas tipo 4, bifásicas (vapor+líquido) en donde la proporción de vapor es aproximadamente mayor al 90% en FIAs tipo III. Todas las microfotografías se tomaron a 500X, PPL, LT. Abreviaturas: P (primarias), S (secundarias), Ps (Pseudosecundarias). V: Vapor, H: Halita, L: Líquido, Qz: Cuarzo, Sp: Esfalerita, Hem: Hematita, Syl: Silvita, H: Halita.

Tabla 1. Resumen de los datos microtermométricos de las inclusiones fluidas en las diferentes vetillas del prospecto Campana.

Tipo de vetilla	A.H y mineral hospedante	Tipo de inclusión FIAs	Composición	Te (°C)	Tm (Hielo) (°C)	Tm (Halita) (°C)	Th Total (°C)	Salinidad (NaCl) (wt% Equiv) X(NaCl)	Th Modo	Volumen Molar (cm ³ /mol)	Fracción volumen del líquido (%)	Densidad (gr/cm ³)	P ^o Homogeneización (MPa)
M	Sódico-cálcica (cuarzo)	I	LV	-46,4 a -39,1	-2,3 a -2,5		350,9 a 402,2	3,87 a 2,57 0,0122 a 0,008	L	28,33 a 41,16		0,65 a 0,45	16,35 a 28,64
		I	VL	-56,4 a -36,4	-7,4 a -0,7		391,9 a 525,4	10,98 a 1,23 0,036 a 0,0038	V	38,29 a 45,29	47,21 a 39,84	0,51 a 0,40	65,99 a 26,19
EB	Potásica (cuarzo)	I	LV	-71,1 a -67,7	-4,6 a -8,8		367,4 a 490,2	7,31 a 12,62 0,024 a 0,043	L	28,28 a 34,89	63,85 a 51,85	0,67 a 0,56	19,57 a 54,77
		I	VL	-36,3 a -27,1	-4,9 a -1,5	226,3 a 283,7	450,8 a 411,1	7,72 a 2,57 0,025 a 0,008	V	37,35 a 44,35	48,32 a 40,68	0,51 a 0,41	41,97 a 30,84
A	Fílica (cuarzo)	2	LV	-57 a -48,8	-1,0 a -0,9		358,8 a 343,3	1,73 a 1,57 0,005 a 0,0049	L	30,98 a 28,79	58,22 a 62,67	0,59 a 0,63	18,20 a 15,08
		IIA	VL	-46,4 a -30,9	-0,6 a -0,1	295,1	391,2 a 381,6	1,05 a 0,177 0,0032 a 0,00055	V	46,84 a 59,10	38,51 a 30,53	0,39 a 0,30	26,031 a 23,81
B	Potásica-fílica (cuarzo)	3	LVS	-47,2 a -16,6			511 a 530,1	50,09 a 43,34 0,24 a 0,19	L	26,85 a 27,73	91,64 a 84,03	1,03 a 0,93	42,62 a 53,68
		IIB											
E	Potásica-epitermal (esfalerita)	4	LV	-80,9 a -45,1	-0,9 a -2,2		296,6 a 307,2	1,57 a 3,71 0,0049 a 0,012	L	24,67 a 24,85	73,14 a 72,59	0,74 a 0,74	8,11 a 9,32
		III	VL	-75,4 a -62,7	-7,9 a -4,8		330,4 a 357,3	11,57 a 7,58 0,039 a 0,02	L	24,71 a 27,32	73,18 a 66,06	0,79 a 0,69	12,07 a 17,21

Temperatura ambiente=21,2°C. Th=Temperatura de homogeneización, Te=Temperatura eutéctica, Tm(i)=Temperatura de fusión final del hielo, Tm (Halita)=Temperatura de fusión final de la halita. A.H=Alteración Hidrotermal.

Los estudios microtermométricos realizados sobre estas inclusiones fueron calculados mediante el software AqSo_NaCl incluido en el paquete de software FLUIDS versión 2 (Bakker, 2018) (sistema H₂O-NaCl). Los minerales hijos (halita±silvita) se disolvieron antes de la homogeneización de la burbuja (fase) de vapor en las inclusiones LVS. El cálculo de las salinidades en el tipo LVS se hizo con la temperatura de fusión de la halita (Tm-halita) y en el tipo LV, VL con la temperatura de fusión final del hielo (Tm-hielo).

Discusión de resultados

Evolución de los fluidos, mineralizaciones y alteraciones (asociadas a partir de los datos microtermométricos)

Dentro del prospecto Campana, el cual presenta características de un sistema tipo Pórfido Cu-Au±Mo, se pudieron identificar múltiples etapas de sobreimpresión litológicas, en donde las rocas

hipoabisales varían en composición entre dioríticas a tonalíticas y brechas magmáticas hasta freáticas, de alteraciones y mineralizaciones (IPM, PMT, PIM, PML), las cuales resultaron del enfriamiento del fluido hidrotermal acuoso desde más de 540,1°C hasta 296,6°C (Tabla 1) a medida que se iba solidificando el reservorio magmático infrayacente saturado con volátiles. La parte central del sistema presenta alteración potásica y fílica (Figura 4B, 4C) con mineralizaciones de Cu-Mo-Au (Figura 3B, 3C), las cuales representan los eventos PMT y PIM. Los procesos de sobreimpresión de alteraciones y quizás, la erosión en la zona causó el telescopio, en el que aparte de existir sobreimpresión de alteraciones hidrotermales someras (argílicas avanzadas sobre fílicas y potásicas) (Figura 4C, 4D, 4E, 4F, 4G), también hay zonación de metales con un núcleo interno de Cu-Mo-Au bordeado por zonas sucesivas de Cu-Zn, Zn-Pb-Ag, Pb-Ag (Figura 3D), en las que se observa esfalerita en intercrecimiento con molibdenita.

Lo anterior puede complicar la interpretación de los eventos y de los fluidos hidrotermales a partir de los análisis de inclusiones fluidas, debido a las modificaciones post-entrapamiento y reequilibrio de las inclusiones fluidas (Kouzmanov y Pokrovski 2012). La fase exsuelta del fluido es predominantemente acuosa, pero contiene cantidades considerables de SO_2 ($\pm\text{H}_2\text{S}$) también en KCl, NaCl y posiblemente CaCl_2 (Touray y Guilhaumou, 1984). Esto dicho según las temperaturas eutécticas (T_e) obtenidas en las mediciones microtermométricas de las inclusiones fluidas (Tabla 1). Los rangos de las temperaturas eutécticas de aproximadamente -70°C indican fluidos ricos en H_2S (Touray y Guilhaumou, 1984).

En los niveles epitermales del sistema, la interacción de aguas meteóricas con los fluidos magmáticos

ascendentes causó dilución y enfriamiento del agua meteórica tardía (Figura 8) y también actuaron como un condensador del vapor magmático que llevó a la acidificación y creación del *lithocap* (alteración argílica avanzada) (Figura 4E, 4F, 4G) sobre el centro porfirítico, tal y como lo proponen Seedorff *et al.* (2005). Cada tipo de inclusión tiene una distribución espacial en el sistema porfirítico del prospecto Campana. Las inclusiones tipo 1 son típicas de los niveles profundos centrales y periféricos. Estas inclusiones de líquido hipersalino y vapor marcan el nivel donde la separación de fases tomó lugar, en el ambiente porfirítico y el vapor flotante de baja densidad ($0,30\text{-}0,79 \text{ gr/cm}^3$) ascendió hacia la superficie, en donde los fluidos acuosos de baja salinidad ($1,57\text{-}3,71 \text{ \%eq. peso NaCl}$) dominan el ambiente superficial del sistema (inclusiones tipo 4, FIA III).

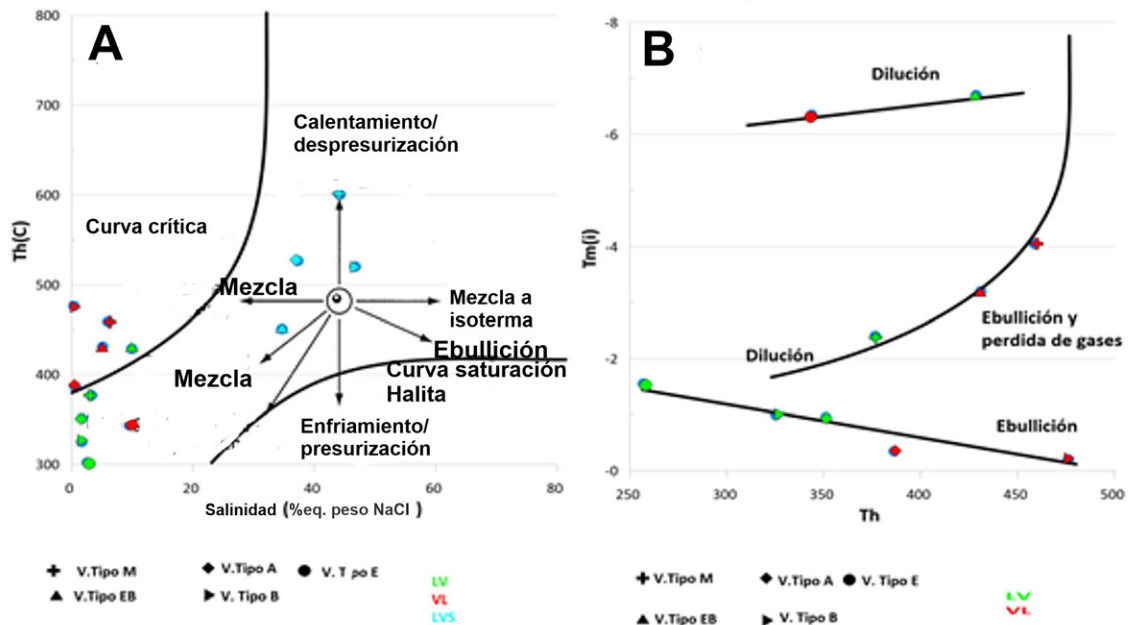


Figura 8. Diagramas Th vs salinidad-Tm(i) en los procesos de precipitación de minerales e interacción de fluidos de diferente origen identificados a partir de los datos microtermométricos de las inclusiones fluidas del prospecto Campana. A. Diagrama Th vs Salinidad de Wilkinson (2001). B. Diagrama Tm(i) vs Th de Hedenquist y Henley (1985). Abreviaturas: Th: temperatura de homogenización, Tm(i): Temperatura de fusión del hielo. Todas las temperaturas están en $^\circ\text{C}$.

Aunque la alteración potásica en el núcleo del sistema puede producir fluidos magmáticos de una única fase (inclusiones tipo 1 y 2), también se puede formar aquellas en las cuales coexisten vapor + líquido hipersalino (tipo 3, FIA IIB) (Figura 7B3, 7B4) que se enfrió desde temperaturas desde 530°C a $342,7^\circ\text{C}$ (temperaturas altas a moderadas). En la parte superficial, de baja presión y temperatura, los fluidos son acuosos de baja a moderada

salinidad (inclusiones tipo 4, FIAs III) (Figura 7C1-7C4).

Las formas de evolución de los fluidos fueron fuertemente controladas por la densidad inicial ($0,65\text{-}0,40 \text{ gr/cm}^3$), salinidad ($2,57\text{-}12,62 \text{ \%eq. peso NaCl}$) y volátiles del fluido magmático exsuelto (Tabla 1). Durante la descompresión, el fluido magmático ascendió a la

superficie, lugar en donde las dos fases líquidas+vapor (V-L Solvus) coexistieron extendiéndose sobre rango de temperatura desde los 490,2°C a 307,2°C. La fase de vapor más voluminosa (inclusiones tipo 1) y de densidad inferior (0,65-0,41 gr/cm³), rica en componentes volátiles (según las temperaturas eutécticas), dominó la parte central del sistema y formó vapores magmáticos sobre el tope del intrusivo porfirítico debido a su baja densidad.

El hecho de encontrar tales inclusiones indica procesos de desmezcla o de inmiscibilidad de fluidos magmáticos de una única fase homogénea (inclusiones tipo 1 y 2) que fueron formados por entrapamiento simultáneo de inclusiones líquidas hipersalinas o de vapor a lo largo del sellamiento de fracturas, es decir, en el mismo tipo de vetillas (tipo M-B), tal y como lo propone Kouzmanov y Pokrovski (2012). Durante la evolución del fluido magmático ascendente, y a medida que se iba enfriando, hubo separación de las fases de vapor y correspondiente fraccionamiento de metales de Au (Figura 3K), junto con un consecuente incremento en el pH de la fase líquida debido al particionamiento preferencial de componentes volátiles ácidos (CO₂, HCl, H₂S, y SO₂) dentro de la fase de vapor. Esto último fue evidenciado por la formación de sulfuros de Fe-Cu (calcopirita, bornita) (Figuras 3B, 3C) en las fases tempranas de formación de la parte porfirítica en el prospecto, generando alteraciones más ácidas, como las argílicas (intermedia y avanzada) en la parte más somera del sistema.

La descompresión (presión de homogenización) junto con la solubilidad retrógrada del cuarzo, con rangos de temperatura entre 350,9°C y 490,2°C y presiones de aproximadamente 54,77 MPa (0,5477 kbar) pudieron ser los causantes de la formación de vetillas tipo M en la parte más profunda, junto con la alteración sódico-cálcica durante el evento IPM hasta las E (Figura 5) en las alteraciones argílica avanzada y propilítica, afectando el flujo de fluidos por los cambios en la permeabilidad.

Conclusiones

El prospecto Campana representa una manifestación mineral promisoría para mineralizaciones tipo pórfido Cu-Au±Mo, ya que cuenta con todas las características metalogénicas para su formación. El mismo está compuesto por una serie de intrusiones o etapas de generación (cuatro) (IPM, PMT, PIM, PML) con sus respectivos subeventos que fueron

igualmente acompañadas por el desarrollo de brechas magmático-hidrotermales, reflejando, en parte, la evolución del sistema completo. De acuerdo con los estudios petrográficos y metalográficos realizados en diferentes muestras de roca y vetillas del prospecto se pudieron determinar las características texturales de las mineralizaciones, tales como: diseminadas, exsoluciones, inclusiones, y diferentes tipos de reemplazamientos que indican una compleja y constante actividad magmático-hidrotermal en el prospecto, cambios o variabilidad litológica, además de otros procesos desencadenados a partir de estos eventos internos tales como procesos volcánicos que generaron telescopio junto a las alteraciones hidrotermales identificadas (sódico-cálcica, potásica, fílica, argílica intermedia, argílica avanzada, propilítica) de varias partes del sistema, evidenciados por la paragénesis mineral de sulfuros y óxidos de alta temperatura (magmáticos, mesotermales) coexistiendo con los de baja temperatura (epitermales).

Los diferentes tipos de vetillas (M, EB, A, B, C, D, E) permitieron conocer las características de los fluidos mineralizantes mediante análisis microtermométricos de las diferentes inclusiones fluidas (tipo 1, 2, 3, 4), ayudando a determinar las temperaturas de formación de las diferentes mineralizaciones de sulfuros (pirita, calcopirita, bornita, galena, esfalerita, argentita, etc.), óxidos (titanomagnetita, especularita, rutilo, anatasa) (Figura 3H, 3I, 3J) y elementos nativos (oro, plata, electrum) con temperaturas de homogenización (Th) que van desde >530,1°C hasta los 296,6°C y salinidades entre 50,09-0,177 %eq. peso NaCl, reflejando el desarrollo del sistema desde la transición de la etapa magmática-hidrotermal con las mayores temperaturas hasta las etapas epitermales más someras y de menor temperatura dentro del cuerpo mineralizado. Toda esta información obtenida a partir de los estudios realizados permite concluir que esta zona representa un sistema porfirítico completo, desde la parte intrusiva interna hasta las etapas o zonas más someras representadas por las vetas de características epitermales de baja a intermedia sulfuración. Sin embargo, ciertas partes típicas de estos sistemas no se han observado aun, posiblemente debido a los procesos erosivos en la zona, además de los eventos relacionados al vulcanismo, los cuales obliteraron gran parte del sistema. Todo esto se resume en la Figura 9, donde se puede observar un modelo de las alteraciones hidrotermales (Figura 9A, 9B, 9C) y el evolutivo de los fluidos mineralizantes (Figura 9D).

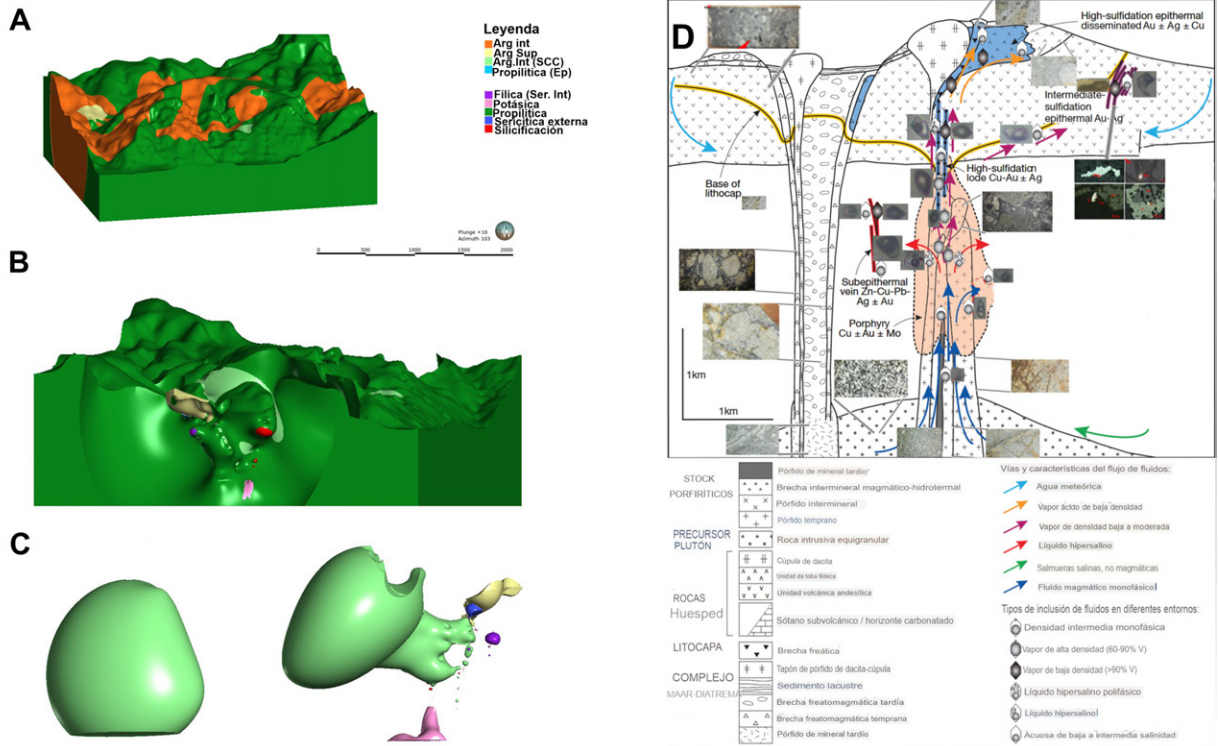


Figura 9. Modelos interpretativos de la génesis del prospecto Campana a partir de los datos macroscópicos (logueo), petrográficos, metalográficos y microtermométricos de las mineralizaciones y alteraciones hidrotermales identificados en él. **A-C.** Modelos tridimensionales de las alteraciones hidrotermales identificadas macroscópicamente (logueo) realizadas en el software Leapfrog Geo (versión 5.0). En C, se observan las alteraciones internas al desactivar la alteración propilitica que las envuelve. **D.** Modelo de la evolución de los fluidos mineralizantes en Campana a partir de los estudios metalográficos y microtermométricos de inclusiones fluidas adaptados al modelo de Kouzmanov y Pokrovski (2012) basados en el modelo general de Sillitoe (2010).

Agradecimientos

Esta investigación se dio en gran medida a la colaboración de las empresas Campana Minera S.A.S y Collective Mining por permitir realizar la investigación en su área de concesión y la información suministrada, a la Universidad de Caldas y a los evaluadores anónimos por sus importantes sugerencias para mejorar este trabajo.

Referencias

Álvarez-Agudelo, A.J. (1971). Informe preliminar sobre geoquímica de la Cordillera Occidental. INGEOMINAS.

Bakker, R.J. (2018). AqSo_NaCl: Computer program to calculate p-T-V-x properties in the H₂O-NaCl fluid system applied to fluid inclusion research and pore fluid calculation. *Computers y Geosciences*, 115, 122-133. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2018.03.003>

Cediel, F.; Shaw, R.P.; Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. In: C. Bartolini, R.T. Buffler, J. Blickwede (eds.). *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics* (pp. 815-848). AAPG, Vol. 79. <https://doi.org/10.1306/M79877C37>

Chiaradia, M.; Caricchi, L. (2017). Stochastic modelling of deep magmatic controls on porphyry copper deposit endowment. *Scientific Reports*, 7, 44523. <https://doi.org/10.1038/srep44523>

Goldstein, R.H. (2003). Petrographic analysis of fluid inclusions. In: I. Samson, A. Anderson, D. Marshall (eds). *Fluid inclusions: Analysis and interpretation* (pp. 9-54). Mineralogical Association of Canada. <https://doi.org/10.3749/9780921294672.CH02>

- Goldstein, R.H.; Reynolds, T.J. (1994). *Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals*. Society of Sedimentary Geology. <https://doi.org/10.2110/SCN.94.31>
- Gómez, J.; Montes, N.; Nivia, A.; Diederix, H. (2015). Plancha 5–10 del Atlas Geológico de Colombia 2015. Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- González, H. (2001). Mapa geológico del departamento de Antioquia escala 1:100.000 geología, recursos minerales y amenazas potenciales. Memoria explicativa. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS).
- Gray, C.A.; Van Rythoven, A.D. (2020). A comparative study of porphyry-type copper deposit mineralogies by portable X-ray fluorescence and optical petrography. *Minerals*, 10(5), 431. <https://doi.org/10.3390/MIN10050431>
- Gustafson, L.B.; Hunt, J.P. (1975). The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 70(5), 857-912. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.70.5.857>
- Gustafson, L.B.; Quiroga, J. (1995). Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 90(1), 2-16. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.90.1.2>
- Hedenquist, J.W.; Henley, R.W. (1985). The importance of CO₂ on freezing point measurements of fluid inclusions; evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition. *Economic Geology*, 80(5), 1379-1406. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.80.5.1379>
- Kirkham, R.V. (1971). Intermineral intrusions and their bearing on the origin of porphyry copper and molybdenum deposits. *Economic Geology*, 66(8), 1244-1249. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.66.8.1244>
- Kouzmanov, K.; Pokrovski, G.S. (2012). Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (-Mo-Au) systems. In: J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus (eds.). *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the World. A tribute to Richard H. Sillitoe* (pp. 573-618). Chapter 22. Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/SP.16.22>
- Leal-Mejía, H. (2011). Phanerozoic gold metallogeny in the colombian andes: a tectono-magmatic approach. PhD. Thesis. Universitat de Barcelona, España.
- Marín-Cerón, M.I.; Vinasco-Vallejo, C. (2012). Contribuciones al conocimiento de la evolución geológica del sistema de fallas de Romeral. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 32, 61-64.
- Meyer, C. (1965). An early potassic type of wall-rock alteration at butte, Montana. *American Mineralogist*, 50(10), 1717-1722.
- Moreno-Sánchez, M.; Gómez-Cruz, A.J.; Toro-Toro, L.M. (2007). Proveniencia del material clástico del complejo Quebradagrande y su relación con los complejos estructurales adyacentes. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 22, 27-38.
- Park, J.W.; Campbell, I.H.; Malaviarachchi, S.P.K.; Cocker, H.; Hao, H.; Kay, S.M. (2019). Chalcophile element fertility and the formation of porphyry Cu ± Au deposits. *Mineralium Deposita*, 54, 657-670. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0834-0>
- Redwood, S.D. (2021). NI 43-101 Technical report for the San Antonio Gold Project, Department of Caldas, Colombia.
- Richards, J.P. (2003). Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*, 98(8), 1515-1533. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.98.8.1515>
- Roedder, E. (1984). *Fluid inclusions*. Volume 12. Mineralogical Society of America.
- Seedorff, E.; Dilles, J.H.; Proffett, J.M.; Einaudi, M.T.; Zurcher, L.; Stavast, W.J.A.; Johnson, D.A.; Barton, M. D. (2005). Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb, J.P. Richards (eds.). *One Hundredth Anniversary Volume* (pp 251-298). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/AV100.10>

- Sillitoe, R.H. (2000). Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. In: S.G. Hagemann, P.E. Brown (eds.). *Gold in 2000* (pp. 315-345). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/REV.13.09>
- Sillitoe, R. (2008). Special paper: 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>
- Sillitoe, R. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3-41. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.105.1.3>
- Touray, J.C.; Guilhaumou, N. (1984). Characterization of H₂S bearing fluid inclusions. *Bulletin de Minéralogie*, 107(2), 181-188. <https://doi.org/10.3406/BULMI.1984.7748>
- Van Den Kerkhof, A.M.; Hein, U.F. (2001). Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1-4), 27-47. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00037-2)
- Velásquez-Ruiz, F.; Martínez, J.C.; Tobón-Acevedo, A.; Yepes-Metaute, A.; Zapata, A.M.; Cataño-Salas, D.P. (2022). Modeling of the large Miocene epithermal and porphyry gold deposits of the Cauca Metallogenic Belt of Colombia using Monte Carlo simulations. *Earth Sciences Research Journal*, 25(4), 415-421. <https://doi.org/10.15446/esrj.v25n4.95289>
- Warr, L.N. (2021). IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85(3), 291-320. <https://doi.org/10.1180/MGM.2021.43>
- Wilkinson, J.J. (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1-4), 229-272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)

Fecha de recibido: 22 de julio de 2022

Fecha de aceptado: 09 de abril de 2025
