

Universidad de Caldas

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DEL DEPÓSITO DE Au TOLDAFRÍA EN EL FLANCO OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA CENTRAL DE COLOMBIA EN CALDAS

VALENTINA OSORIO BOLAÑOS

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

Manizales, Caldas 2023

**Caracterización geoquímica del depósito de Au Toldafría en el flanco occidental de la
Cordillera Central de Colombia en Caldas**

Valentina Osorio Bolaños

Universidad de Caldas

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Programa de Geología

Manizales, Caldas 2023

**Caracterización geoquímica del depósito de Au Toldafría en el flanco occidental de la
Cordillera Central de Colombia en Caldas**

Valentina Osorio Bolaños

Trabajo de tesis para optar por el título de Geóloga

Director Académico

Juan Sebastián Hernández González

Asesores Institucionales

Lucas Cortés Salamanca

Gabriel Patiño Velásquez

Universidad de Caldas

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

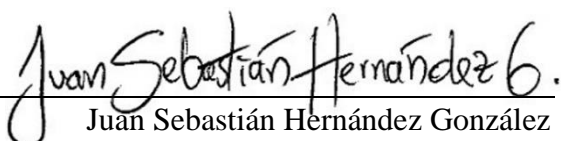
Programa de Geología

Manizales, Caldas 2023

Nota de aceptación

Director de tesis

APROBADO


Juan Sebastián Hernández González

Asesores Institucionales

APROBADO

Lucas Cortés Salamanca

APROBADO

Gabriel Patiño Velásquez

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi padre en el cielo, quien siempre fue y será mi mayor inspiración. A mis guerreras madres fuente de fortaleza en esta vida, a mis hermanos, sobrinos y en especial a mi hijo Valentino por quien lucho cada día para ser una mejor persona y profesional. Ellos, quienes me han dado su amor, paciencia y apoyo incondicional en mi proceso de aprendizaje, merecen todo y más por ser mi gran y hermosa familia.

Los amo.

Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente a mi director de tesis Juan Sebastián Hernández González, quien con su vocación y convicción por enseñar sobre geología aportó en gran medida a mi carrera profesional. También por regalarme enseñanzas invaluable para mi vida en general.

Agradezco por la gran oportunidad, su buena disposición y energía de mi asesor Lucas Cortés Salamanca y a la empresa Aura Minerals por facilitar la base de datos con la química de los núcleos de perforación, por la logística y financiación de este trabajo.

Mis sinceros agradecimientos al coordinador del PAR Manizales Gabriel Patiño Velásquez, por ser guía en el proceso de práctica académica institucional en la Agencia Nacional de Minería (ANM) y por permitir migrar la práctica a la presentación de una tesis de grado.

Finalmente, a mi familia por su inagotable paciencia y amor hacia mi hijo y que por su enorme ayuda me permitió culminar este proceso.

Resumen

Las mineralizaciones del depósito de Au Toldafría se localizan en el flanco occidental de la Cordillera Central de los Andes Colombianos. Estas mineralizaciones de manera preliminar han sido reconocidas como epitermales, con un aparente control estructural y litológico, las cuales están encajadas en esquistos negros y verdes del Complejo Cajamarca, correspondiente al basamento polimetamórfico pre-Jurásico de la Cordillera Central. A partir del fotologeo de 7 pozos de perforación y del tratamiento estadístico de 2156 análisis químicos de muestras distribuidas en estos pozos, que abarcan la zona occidental del depósito Toldafría, se identificaron múltiples estilos de mineralización asociados a zonas de permeabilidad o discontinuidades (p.e. planos de foliación, fallas, límites litológicos, diaclasas), de los cuales algunos presentan continuidad y otros son discontinuos. Así mismo, algunos de los estilos son concordantes y discordantes a la foliación y a los límites litológicos. A partir del cálculo de parámetros estadísticos de los datos químicos, teniendo en cuenta la afinidad del Au con otros elementos, se definieron tres asociaciones de elementos relacionados a Au: i) asociación Au+Ag acompañada de pirrotina, relacionada con un fluido hidrotermal reducido; ii) asociación Au+Ag+Zn+Pb+Cu+As, con mayor carga metálica y un pH ácido, y iii) asociación Au+Ag+Zn+Pb, probablemente de menor temperatura que la primera asociación y con menor sulfuración (pirita, galena y esfalerita). El análisis conjunto de las descripciones litológicas y las asociaciones químicas permite inferir que los factores que controlaron la mineralización son principalmente estructurales y químicos, sin fuerte alteración hidrotermal de la roca encajante. Adicionalmente, las vetas presentan carbonatos relacionados con la mineralización, permitiendo inferir que los fluidos hidrotermales son de pH ácido a moderadamente ácido. Finalmente, la correlación lito- y quimioestratigráfica de los datos permite proponer tres áreas para cada una de las asociaciones químicas definidas, mostrando un

empobrecimiento gradual de oro y metales base hacia el norte del depósito, con un incremento en la mineralización en sentido N-S sugiriendo una posible fuente de fluidos en dirección E-SE.

Abstract

The mineralizations of the Au Toldafría deposit are located on the western flank of the Central Cordillera of the Colombian Andes. These mineralizations have been preliminarily recognized as epithermal, with an apparent structural and lithological control, which are embedded in black and green schists of the Cajamarca Complex, corresponding to the pre-Jurassic polymetamorphic basement of the Central Cordillera. Based on the photologging of 7 drilling holes and the statistical processing of 2156 chemical analyses of samples distributed in these holes, covering the western zone of the Toldafría deposit, multiple mineralization styles were identified associated with permeability zones or discontinuities (e.g., foliation planes, faults, lithological boundaries, joints), some of which present continuity and others are discontinuous. Likewise, some of the styles are concordant and discordant to foliation and lithological limits. From the calculation of statistical parameters of the chemical data, taking into account the affinity of Au with other elements, three associations of elements related to Au were defined: i) Au+Ag association accompanied by pyrrhotite, related to a reduced hydrothermal fluid; ii) Au+Ag+Zn+Pb+Cu+As, with higher metallic load and an acidic pH, and iii) Au+Ag+Zn+Pb association, probably of lower temperature than the first association and with low sulfidation (pyrite, galena, and sphalerite). The joint analysis of lithological descriptions and chemical associations allows inferring that the factors that controlled the mineralization are mainly structural and chemical, without strong hydrothermal alteration of the host rock. Additionally, the veins present carbonates related to mineralization, allowing concluding that hydrothermal fluids are acidic to moderately acidic. Finally, the litho- and chemostratigraphic correlation of the data allows proposing three areas for each of the defined chemical associations, showing a gradual impoverishment of gold and base metals towards the

north of the deposit, with an increase in mineralization in the N-S direction suggesting a possible fluid source in the E-SE direction.

Tabla de contenido

1	Introducción	1
1.1	Objetivo general	4
1.2	Objetivos específicos.....	4
1.3	Localización	5
2	Contexto tectónico y geología regional	6
3	Marco teórico. Controles geoquímicos en los fluidos mineralizantes en depósitos vetiformes de Au.....	10
3.1	Depósitos epitermales	10
3.2	Fluidos hidrotermales	15
3.3	Solubilidad y ebullición	17
3.4	Potencial redox (reducción – oxidación: Eh)	18
4	Materiales y métodos	20
4.1	Fase preliminar: compilación de información de los núcleos de perforación y de análisis químicos	20
4.2	Fase de campo: descripción y muestreo de los núcleos de perforación	21
4.3	Petrografía	21
4.4	Geoquímica de roca total.....	22
5	Resultados.....	25
5.1	Descripción litológica a partir de fotologeo y descripción en campo de núcleos de perforación	25
5.2	Petrografía	41
5.3	Geoquímica de roca total.....	44

	5.3.1	Definición de umbrales para la determinación de las asociaciones químicas con el Au	50
	5.3.2	Correlación geoquímica entre los pozos de perforación.	59
6		Discusión.....	64
	6.1	Controles estratigráficos y estructurales en el emplazamiento de los fluidos mineralizantes	64
	6.2	Controles geoquímicos en la precipitación de los metales y definición de las áreas prospectivas	69
7		Conclusiones	73
		Referencias.....	75

Lista de tablas

Tabla 1. Tabla con orientación; localización y número de muestras de las perforaciones seleccionadas para el análisis.....	25
Tabla 2. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-002. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).....	45
Tabla 3. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-004. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).....	45
Tabla 4. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-006. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).....	46
Tabla 5. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-009. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).....	47
Tabla 6. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-012. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).....	47
Tabla 7. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-015. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).....	48

Tabla 8. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-016. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).....	49
Tabla 9. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-002.....	51
Tabla 10. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-004.....	53
Tabla 11. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-006.....	54
Tabla 12. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-009.....	55
Tabla 13. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-0012.....	56
Tabla 14. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-0015.....	57
Tabla 15. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-0016.....	58

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización y geología regional. VC: Valle del Cauca; VM: Valle del Magdalena; FG: Falla de Garrapatas; ZCR: Zona de Cizalla de Romeral; FOP: Falla Otú-Pericos; FO: Falla de Oca; FSMB: Falla Santa Marta-Bucaramanga; SFG: Sistema de Falla de Guaicarámo. Adaptado de Montes <i>et al.</i> , (2019) y Gómez <i>et al.</i> (2020).....	5
Figura 2. Rango de temperatura del diagrama de transporte de metales AuCl y AuHs asociado sistemas minerales. Adaptado de Pirajno (2009).....	12
Figura 3. Anatomía de un sistema de pórfido de Cu y su relación con otros tipos de depósitos. Depósitos epitermales de sulfuración alta e intermedia suprayacentes junto a el entorno de lithocap. Adaptado de Sillitoe (2010).	14
Figura 4. Campos de temperatura-salinidad y curva de gradiente medio para una variedad de sistemas hidrotermales: (1) Au orogénico Arqueano; (2) Au-Ag epitermal; (3) sulfuros masivos volcanogénicos;(4) Tennant Creek Au-Cu, Australia; (5) Pórfido Cu-Au. Adaptado de Large <i>et al.</i> (1988).	16
Figura 5. Mapa de geología local con la ubicación de los pozos del depósito Toldafría7	24
Figura 6. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-002.....	27
Figura 7. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-004.	29
Figura 8. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-006.....	31
Figura 9. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-009.....	33
Figura 10. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-012.....	35
Figura 11. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-015.....	37
Figura 12. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-016.....	39

- Figura 13.** Muestras de testigos de perforación. **A.** Muestra del pozo DH-TF-004 de esquisto verde (alteración de clorita-epidota), con venas de cuarzo concordantes con la foliación con pirita (Py) + pirrotina (Po) + esfalerita (Sp) y fracturas con hematita (Hem). **B.** Muestra del pozo DH-TF-006 de esquisto negro y pardo con foliación milonítica, con venas de cuarzo y carbonatos, con halo de clorita y sericita, y mineralización de Py + calcopirita (Ccp) + y Po. **C.** Muestra del pozo DH-TF-015 de esquisto negro y pardo con foliación milonítica, con inyecciones graníticas concordantes a la foliación, clorita y sericita de alteración y una vena de cuarzo con Py + Ccp + Sp + galena (Ga)..... 41
- Figura 14.** Microfotografías de la muestra DH-TF-004. **A.** Oro (Au) incluido y asociado a esfalerita (Sp), a su vez asociada con calcita (Cal). 50X-LR. **B.** Au asociado a calcopirita (Ccp) y hessita (He), a su vez asociados a Sp y pirita (Py). 50X-LR. **C.** Cal asociada a pirrotina (Po) con corona de Py, y a (Sp) con inclusión de Ccp. 20X-LR. **D.** Detalle de la Figura 14C. Se observa grano de Au en forma subangular como inclusión en Po. 50X-LR. 42
- Figura 15.** Microfotografías de la muestra DH-TF-006. **A.** Po asociada con Ccp. 10X-LR. **B.** Au libre teluros (Te) incluidos en cuarzo (Qz). 20X-LR. **C.** Au incluido en Cb. 20X-LR. **D.** Te asociados a Cb. 20X-LR. 43
- Figura 16.** Microfotografías de la muestra DH-TF-015. **A.** Clorita (Chl) y moscovita (Ms). 5X-NX-LT. **B.** Silvanita (Syl) con inclusión de Au. 20X-LR. **C.** Py alterándose a melnicovita (Mel) incluida en Qz. 10X-LR. **D.** Au incluido en arsenopirita (Apy). 20X-LR **E.** Asociación Gn + Sp + Ccp. 10X-LR. **F.** Au libre incluido en Qz. 10X-LR..... 44

Figura 17. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-002.....	60
Figura 18. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-004.....	60
Figura 19. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-006.....	61
Figura 20. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-009.....	61
Figura 21. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-012.....	62
Figura 22. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-015.....	62
Figura 23. . Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-016.....	63
Figura 24. Correlación lito- y quimioestratigráfica de la sección norte. Pozos DH-TF-006 y DH-TF-016. MSC: esquistos cloríticos, MSG: esquistos grafitosos, MSS: esquistos cuarzo-sericíticos, QB: sobrecarga y QS: saprolito.	66
Figura 25. Correlación lito- y quimioestratigráfica de la sección centro. Pozos DH-TF-004 y DH-TF-009. MSC: esquistos cloríticos, MSG: esquistos grafitosos, MSS: esquistos cuarzo-sericíticos, QB: sobrecarga y QS: saprolito.	67
Figura 26. Correlación lito- y quimioestratigráfica de la sección centro. Pozos DH-TF-002, DT-HF-012 y DH-TF-015. MSC: esquistos cloríticos, MSG: esquistos grafitosos, MSS: esquistos cuarzo-sericíticos, QB: sobrecarga y QS: saprolito.....	68

Figura 27. Interpretación de la zonación metálica y distribución de elementos químicos del depósito de Au Toldafría. Adaptado de Pirajno (2009).....	70
Figura 28. Mapa de distribución de las asociaciones químicas interpretadas para depósito de Au Toldafría.	72

1 Introducción

Uno de los tipos de yacimientos minerales más explorados en el mundo son los depósitos vetiformes, los cuales se caracterizan por la alta concentración de gran variedad de metales como oro, plata, cobre y zinc, entre otros, embebidos en minerales que representan un fluido hidrotermal (p.e. cuarzo y calcita) y emplazados en sistemas de fracturas, comúnmente en forma de vetas o lentes (Ridley, 2013). La formación de los depósitos vetiformes ha sido relacionada a varios procesos, los cuales incluyen fuentes magmático-hidrotermales en la corteza media y superior, segregación de fluidos durante los procesos metamórficos en la corteza, o fluidos sub-corticales como fuente de metales (Goldfarb & Groves, 2015).

En márgenes convergentes, en zonas de subducción, en las regiones de arco y trasarco (zona de suprasubducción), se presentan las condiciones para el desarrollo de depósitos tipo pórfido y epitermales (Groves *et al.*, 1998; Richards, 2009; Sillitoe, 2010). Los depósitos epitermales se forman a partir de fluidos hidrotermales, de los cuales precipitan elementos minerales como Au, Ag, As, Sb, Hg, Tl, Te, Pb, Zn y Cu, en condiciones de temperatura y presión relativamente baja a moderada (entre 50 y 500°C y desde la presión atmosférica hasta varios cientos de bares, respectivamente) (White & Hedenquist, 1995; Simmons & Brown, 2006). Estos depósitos pueden ser de baja, media o alta sulfuración dependiendo, además de las condiciones de temperatura y presión, de la salinidad de los fluidos hidrotermales (concentración de NaCl), el enriquecimiento en gases volátiles (p.e. CO₂ y CH₄) y la densidad de los fluidos (Lang & Baker, 2001; Heinrich, 2007; Sillitoe & Hedenquist, 2003).

Los fluidos hidrotermales que dan origen a los depósitos epitermales son soluciones acuosas que comúnmente precipitan minerales de importancia económica, a medida que la solución experimenta cambios fisicoquímicos en un determinado tiempo (Stefánsson & Seward,

2004; Zhu *et al.*, 2011). Esta evolución de los fluidos y la precipitación de los minerales, están condicionadas por la modificación de las condiciones de solubilidad y ebullición, así como los cambios en las condiciones de acidez (pH) y óxido reducción (Eh) (Stumm & Morgan, 1996; Masterton & Hurley, 2008; Pirajno, 2009).

En Colombia, han sido descritos depósitos epitermales (vetiformes) a lo largo y ancho de la actual Cordillera Central, los cuales se encuentran emplazados entre planos de foliación de rocas metamórficas (Castaño-Dávila *et al.*, 2019; Leal-Mejía *et al.*, 2019) El basamento metamórfico del centro de la Cordillera Central, está representado por los complejos Cajamarca y Quebradagrande (Maya & González, 1995), los cuales están presentes en la zona de deformación de la Falla San Jerónimo, estructura que define el límite oriental de la Zona de Cizalla de Romeral – ZCR (Vinasco, 2019). Estos basamentos metamórficos hospedan plutones que se formaron como intrusiones durante el Paleógeno (p.e. el Stock de Manizales; Bustamante *et al.*, 2017) y durante el Cuaternario (p.e. los domos de Sancancio y Tesorito; Thouret *et al.*, 1990). Además, los planos de foliación de las rocas metamórficas también hospedan vetas de cuarzo con mineralizaciones de Au y otros metales asociados (*cf.* Alvarán, 2006; Sepúlveda Ospina *et al.*, 2020).

Uno de los depósitos vetiformes de la Cordillera Central, hospedados en rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, es el depósito de Au Toldafría, el cual hace parte del Distrito Minero Manizales-Villamaría (DMMV), y a partir del análisis de las alteraciones hidrotermales y la mineralogía de mena, ha sido interpretado como un depósito epitermal de baja sulfuración (Salazar Narváez, 2015; Clavijo Betancurth, 2023). Sin embargo, no se cuenta con un estudio detallado dirigido al entendimiento de los controles geoquímicos en la distribución, concentración y precipitación del oro y los elementos metales relacionados. Por lo tanto, el desarrollo y la implementación de metodologías basadas en el análisis litogeoquímico, son necesarios para el

entendimiento de las condiciones particulares que controlaron la concentración de los metales en dicho depósito.

En el marco del convenio de cooperación 080-2021 entre la Universidad de Caldas y la Agencia Nacional de Minería (ANM), en el cual se analizó la información geológica del DMMV, y con la participación y apoyo de la empresa Aura Minerals Inc., encargada de la exploración del depósito de Au Toldafría, se realizó el análisis geoquímico detallado de siete pozos de perforación de este proyecto. Fueron analizados también los datos geológicos (litología, estructuras, datos químicos), los cuales se representaron en columnas estratigráficas y adicionalmente se realizaron análisis petrográficos y metalográficos, para soportar las interpretaciones.

Por lo tanto, a partir del análisis e interpretación de la correlación litológica y geoquímica, se presenta en esta tesis la caracterización geoquímica del depósito de Au Toldafría, donde se propone un modelo geoquímico conceptual que comprende tres asociaciones principales del oro, que muestra la distribución de los metales en el área del proyecto, y que facilita a la empresa la exploración de otras áreas.

Finalmente, este documento está organizado en siete capítulos, distribuidos como se describe a continuación: en el primer capítulo se presenta la introducción, los objetivos, y la localización del área de estudio con un mapa donde se ubica el área de interés, en el segundo capítulo se presenta el contexto tectónico y la geología regional, seguido el tercero donde se describe el marco teórico sobre el cual se soporta la investigación. En el cuarto capítulo se describen los materiales y métodos empleados, con los cuales se obtuvieron los datos presentados en el capítulo quinto, que conforman el capítulo de resultados. Finalmente, en los capítulos seis y siete se integran todos los capítulos anteriores, y se interpretan generando la discusión y las conclusiones de la investigación.

1.1 Objetivo general

Realizar la caracterización geoquímica del depósito de Au Toldafría del flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia, con el fin de identificar las condiciones de distribución del Au y otros elementos asociados.

1.2 Objetivos específicos

- Compilar los datos obtenidos en la campaña de exploración del título minero donde está incluido el depósito de Toldafría, incluyendo las orientaciones, las profundidades de los pozos perforados y la ubicación de los muestreos para análisis químicos.
- Describir los pozos y las zonas con estructuras mineralizadas relacionando en las diferentes profundidades los datos químicos reportados por el laboratorio.
- Realizar un análisis estadístico descriptivo y la correlación geoquímica entre las perforaciones, teniendo en cuenta las tendencias estructurales de mineralización, con el fin de definir asociaciones geoquímicas del depósito, a través de la representación de columnas estratigráficas con las descripciones de los pozos y ubicando los elementos Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Cd y As.
- Elaborar un modelo geoquímico conceptual como herramienta eficaz en la interpretación del origen (génesis) del depósito, que pueda ser tenido en cuenta como información técnica en la toma de decisiones para la exploración.

1.3 Localización

El título minero depósito de Au Toldafría se encuentra localizado en el flanco occidental de la Cordillera Central de los Andes colombianos, en la vereda Montañón del municipio de Villamaría, Caldas. Está a 20 km del casco urbano de la ciudad de Manizales, con caminos rurales como principales vías de acceso. El depósito se encuentra incluido dentro de la plancha topográfica 206 del IGAC.

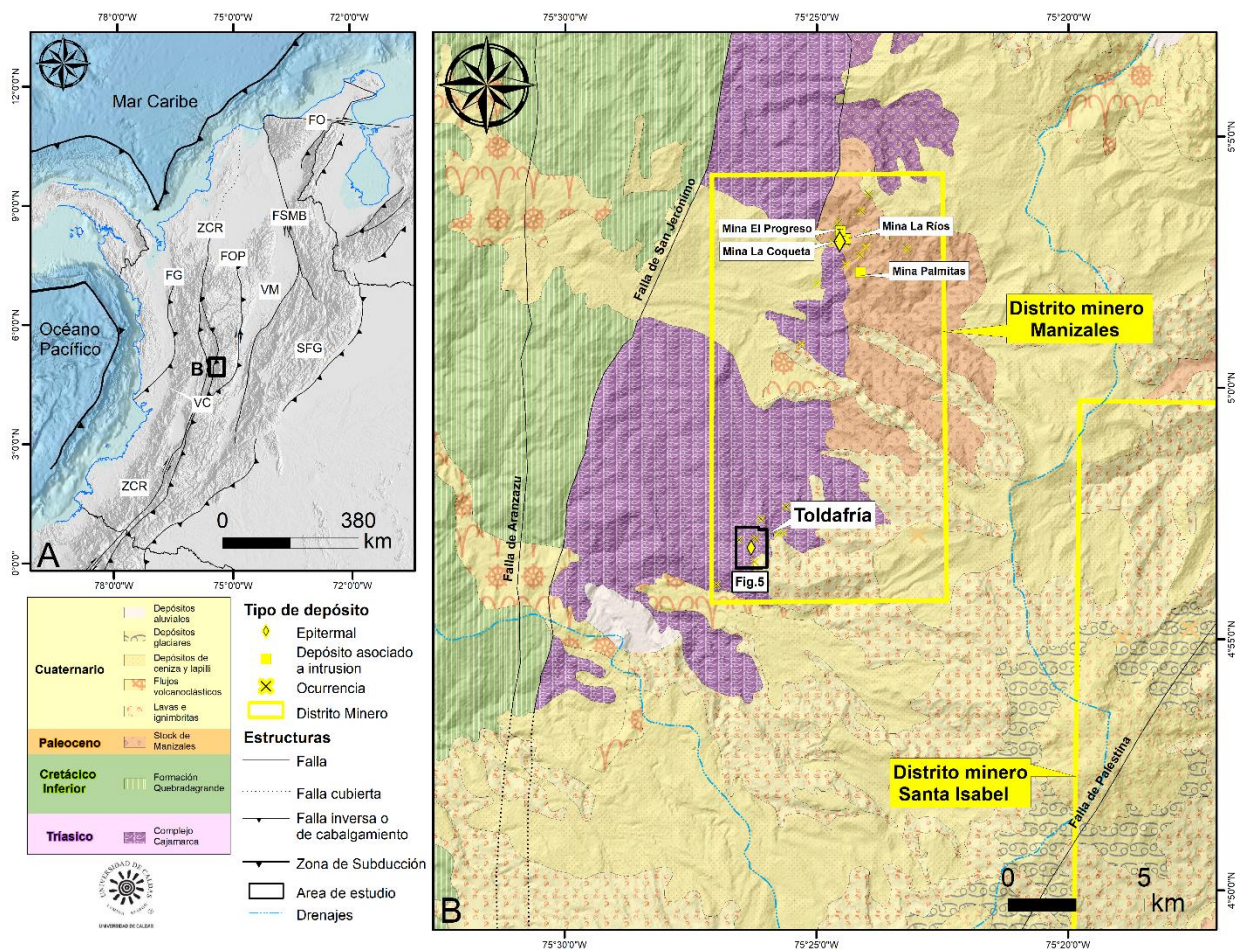


Figura 1. Mapa de localización y geología regional. VC: Valle del Cauca; VM: Valle del Magdalena; FG: Falla de Garrapatas; ZCR: Zona de Cizalla de Romeral; FOP: Falla Otú-Pericos; FO: Falla de Oca; FSMB: Falla Santa Marta-Bucaramanga; SFG: Sistema de Fallas de Guacarámó. Adaptado de Montes *et al.* (2019) y Gómez *et al.* (2020).

2 Contexto tectónico y geología regional

La tectónica de placas en el noroeste de Suramérica se caracteriza por un complejo escenario de interacción entre la placa de Nazca, la placa Suramericana y la placa del Caribe. Esta interacción ha resultado en la formación de un extenso sistema montañoso, conocido como los Andes Colombianos (Gutscher *et al.*, 1999; Taboada *et al.*, 2000; Montes *et al.*, 2012). Esta cadena montañosa se subdivide en tres principales cordilleras: la Cordillera Occidental, la Cordillera Central y la Cordillera Oriental. Las tres cordilleras están separadas por valles de gran importancia geológica y geográfica, como el Valle del Cauca, que se ubica entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Central, y el Valle del Magdalena, que sirve de división entre la Cordillera Central y la Cordillera Oriental. Adicionalmente, la Serranía de Baudó se presenta como un rasgo geomorfológico adyacente a la Cordillera Occidental (Montes *et al.*, 2012).

La región comprendida entre el flanco occidental de la Cordillera Central, la Cordillera Occidental, el Valle del Cauca y la Serranía de Baudó, ha sido considerada de naturaleza de corteza oceánica (Millward *et al.*, 1984; Álvarez, 1987; Nivia, 1996; Nivia *et al.*, 2006; Moreno-Sánchez & Pardo-Trujillo, 2003). Por otra parte, el eje y el flanco oriental de la Cordillera Central se componen principalmente por rocas de naturaleza de corteza continental y está conformado por rocas metamórficas de origen pre-Triásico, el cual está recubierto por estratos sedimentarios meso-cenozoicos (Vinasco *et al.*, 2006; Cochrane *et al.*, 2014). Tanto las rocas de este basamento, como las sucesiones sedimentarias, son hospedantes de plutones que evidencian varios eventos tectonomagmáticos, los cuales varían cronológicamente desde el Triásico hasta el Neógeno (Feininger *et al.*, 1972; Álvarez, 1983). Estos eventos incluyen, por ejemplo, plutones triásicos (Vinasco *et al.*, 2006); Cochrane *et al.*, 2014) plutones del Cretácico (p.e. el Stock de Mariquita) y plutones del Neógeno; (Bustamante *et al.*, 2017; Spikings & Paul, 2019; Vinasco, 2019 ; Leal-

Mejía *et al.*, 2019). Ambos tipos de corteza, están separadas por una paleosutura con múltiples reactivaciones durante el Fanerozoico, denominada Zona de Cizalla de Romeral – ZCR, conformada por varios sistemas de fallas de escala regional (p.e. Fallas de San Jerónimo, Silvia-Pijao, Cauca-Almaguer, entre otras).

En la parte central de la Cordillera Central, afloran dos unidades que representan estos basamentos metamórficos, los cuales corresponden con los complejos Cajamarca y Quebradagrande (Maya & González, 1995), que se presentan en la zona de deformación de la Falla San Jerónimo. Esta falla define el límite oriental de la ZCR y su actividad data desde el final del Cretácico temprano (Villagómez *et al.*, 2011). Las rocas metamórficas del basamento (complejos Cajamarca y Quebradagrande) están afectadas por intrusiones paleógenas (p.e. el Stock de Manizales; Bustamante *et al.*, 2017) y cuaternarias (p.e. los domos de Gallinazo y Tesorito; (Salazar-Muñoz *et al.*, 2021).

El Complejo Cajamarca, el cual conforma un bloque tectónico denominado terreno Cajamarca-Valdivia (Cediel *et al.*, 2003) o terreno Tahamí (*sensu* Restrepo & Toussaint, 2020), está compuesto principalmente por esquistos cuarzo moscovíticos, esquistos verdes, cuarcitas, pizarras, filitas, anfibolitas, neises y fajas de mármol. La edad de esta unidad es muy variable y está comprendida entre el Carbonífero y el Jurásico, con un retrabajamiento tectónico relacionado con la orogenia Apalache u orogenia Alleghaniana (Vinasco, 2019 y referencias citadas en el), dando origen a fases deformativas complejas (Hincapié & Moreno-Sánchez, 2001).

Por otra parte, el Complejo Quebradagrande conforma un bloque tectónico denominado Melange de Romeral (Cediel *et al.*, 2003), o terreno Ebéjico (Restrepo & Toussaint, 2020) que está compuesto por fajas metamórficas que incluyen rocas metavolcánicas en facies esquistos verdes, prehnita-pumpellyita y zeolitas, asociadas a protolitos andesíticos y lavas basálticas con

materiales piroclásticos, que geoquímicamente tienen afinidad toleítica y calcoalcalina (Nivia *et al.*, 2006). Presenta un basamento que ha sido interpretado como de afinidad oceánica, en donde se han reconocido gabros MORB (Toro *et al.*, 2010). Estudios de análisis de proveniencia sedimentaria argumentan que las sedimentitas del Complejo Quebradagrande presentan una proveniencia volcanoclástica en su margen occidental, y proveniencia continental (fragmentos de cuarcitas y rocas metamórficas) en su margen oriental (Moreno Sánchez *et al.*, 2008). Otros estudios de proveniencia sedimentaria concluyen que las fuentes del Complejo Quebradagrande corresponden con sedimentos depositados en una cuenca de trasarco desarrollada en el Cretácico temprano, la cual se cerró durante el Cretácico tardío, previo a la colisión arco-continente (Zapata-Villada *et al.*, 2017; Zapata *et al.*, 2019).

En la zona de contacto entre los complejos Cajamarca y Quebradagrande, se presentan en contacto intrusivo las rocas graníticas del Stock de Manizales (Aguirre-Sánchez & López-Isaza, 2003). Se han reportado diferentes edades de cristalización del Stock de Manizales, sin embargo, todas son del Paleoceno. Por ejemplo, McCourt *et al.* (1984) reportó edades de 57 ± 2 Ma y 56 ± 3 Ma por el método de K/Ar en biotita, y, por otra parte, (Bayona *et al.*, 2012) asignó una edad de $59,8 \pm 0,7$ Ma por el método U-Pb en circón.

Adicionalmente, en la parte central de la Cordillera Central, la fase magmática más reciente que intruye tanto las rocas metamórficas, como las rocas ígneas y las sucesiones sedimentarias, está representada por los pulsos relacionados con el Campo Volcánico Monogenético Cuaternario Villamaría-Termal (VTMVF), el cual es predominantemente de composición andesítica e incluye los volcanes efusivos monogenéticos Victoria, Gallinazo y Tesorito (Osorio *et al.*, 2018). La edad de los volcanes Victoria y Gallinazo datan de $1,97 \pm 0,06$ Ma y $1,92 \pm 0,06$ Ma, edades que fueron obtenidas por el método K/Ar en matriz vítrea (Salazar-Muñoz *et al.*, 2021) y la edad

reportada para el volcán Tesorito es de $1,2 \pm 0,2$ Ma por el método K/Ar en roca total (Thouret *et al.*, 1990).

Finalmente, las mineralizaciones de Au del depósito Toldafría se presentan en vetas y venas encajadas en esquistos negros y verdes del Complejo Cajamarca, en la zona de alta deformación de la Falla San Jerónimo, en la parte sur del límite entre los bloques tectónicos denominados terreno Cajamarca-Valdivia y el Melange de Romeral (*sensu* Cediél *et al.*, 2003), o entre los terrenos Tahamí y Ebéjico (*sensu* Restrepo & Toussaint, 2020).

3 Marco teórico. Controles geoquímicos en los fluidos mineralizantes en depósitos vetiformes de Au

Los depósitos vetiformes se caracterizan por la alta concentración de minerales metálicos y no metálicos, en sistemas de fracturas, embebidos en minerales que representan un fluido hidrotermal emplazado en estas fracturas, comúnmente en forma de vetas o lentes (Ridley, 2013). Estos depósitos generalmente incluyen variedad de metales como oro, plata, cobre y zinc, entre otros, en diferentes concentraciones, y su estudio es fundamental tanto desde un punto de vista geológico (metalogenia) como económico (Groves *et al.*, 1998). Por lo tanto, los depósitos vetiformes son fuentes significativas de oro, plata, y otros metales preciosos y metales base.

Existen diversos modelos geológicos que intentan explicar el origen de los depósitos vetiformes, sin embargo, las diferencias en la composición química y mineralógica, la escala y la geometría de estos depósitos, ha dificultado su entendimiento (Sillitoe, 2010). No obstante, el análisis mineralógico y geoquímico detallado de las vetas, así como su interacción con las rocas encajantes en depósitos específicos, proporciona elementos críticos sobre la naturaleza y origen de los fluidos mineralizantes, así como los mecanismos que rigen su emplazamiento (Groves *et al.*, 1998; Sillitoe, 2010; Ridley, 2013).

3.1 Depósitos epitermales

Las zonas de márgenes convergentes, especialmente en la interacción de placas asociadas con arcos continentales e insulares de subducción y regiones de trasarco extensionales o post-subducción, proporcionan un entorno geológico idóneo para el desarrollo de depósitos tipo pórfido y epitermales (Groves *et al.*, 1998; Richards, 2009; Sillitoe, 2010).

Los sistemas epitermales representan una clase de depósitos hidrotermales que se forman en condiciones de temperatura y presión relativamente bajas a moderadas. Estos sistemas generalmente se desarrollan en un rango de temperatura que varía de aproximadamente 50 a 500°C y en condiciones de presión que abarcan desde la presión atmosférica hasta varios cientos de bares (Figura 2) (White & Hedenquist, 1995; Simmons & Brown, 2006). Los fluidos implicados en estos sistemas también exhiben una variabilidad considerable en sus propiedades químicas. Van desde fluidos débilmente salinos, con una salinidad que varía del 1 al 5% en peso equivalente de NaCl, hasta fluidos meteóricos, que son generalmente de baja salinidad y a menudo ricos en gases volátiles como CO₂ y CH₄ (Lang & Baker, 2001; Heinrich, 2007). Los sistemas epitermales no son homogéneos y pueden clasificarse en varias subcategorías, como los epitermales de baja, media y alta sulfuración, cada uno con sus propias características geoquímicas y mineralógicas distintivas (Sillitoe & Hedenquist, 2003).

La mineralización epitermal tiene una serie de características comunes y distintivas, como la presencia de calcedonia de grano fino, cuarzo, calcita, pseudomorfos de cuarzo (probablemente indicativos de fluidos en ebullición) y brechas hidrotermales. La asociación elemental común incluye elementos minerales como Au, Ag, As, Sb, Hg, Tl, Te, Pb, Zn y Cu (Pirajno, 2009). Los depósitos que se forman desde la superficie hasta aproximadamente una profundidad de 1,5 km, se caracterizan por ser vetas y *stockworks*. Estas características, pueden ocurrir juntas o de manera independiente, y constituyen depósitos generalmente fáciles de explotar en operaciones a cielo abierto o subterráneas poco profundas, con tonelajes relativamente grandes y leyes bajas de Au+Ag, o tonelajes pequeños y altos grados de Au+Ag (Pirajno, 2009). Otra característica de estos depósitos es la morfología y la composición química del oro, las cuales pueden variar

considerablemente, y una de las variaciones más notables se encuentra en la relación entre el oro y la plata. En depósitos epitermales, la presencia de oro suele estar asociada con altas concentraciones de plata (Morrison *et al.*, 1991; Simmons & Brown, 2006). Por ejemplo, los depósitos epitermales de baja sulfuración muestran una amplia variabilidad en el contenido de Ag en las aleaciones de oro, lo cual depende tanto de las condiciones fisicoquímicas del sistema como de la naturaleza de los fluidos mineralizantes (Simpson & Mauk, 2011).

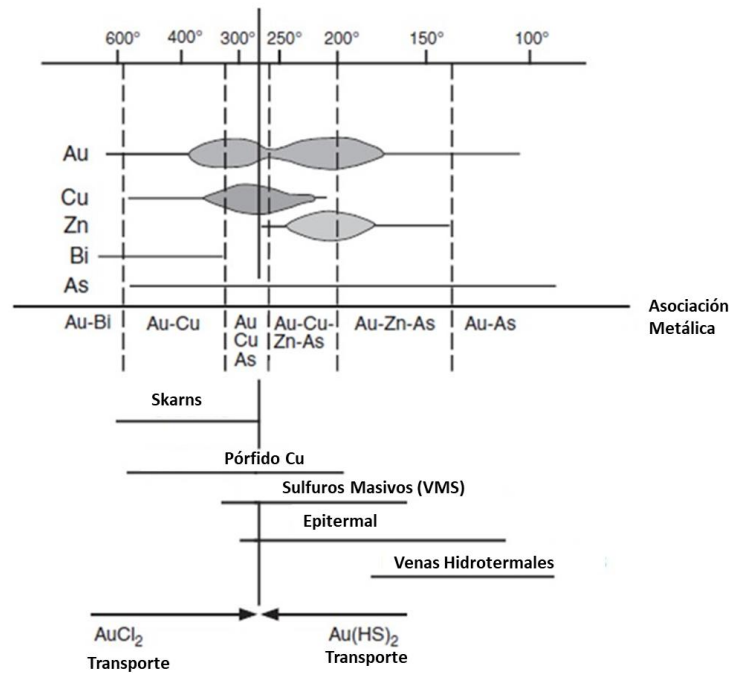


Figura 2. Rango de temperatura del diagrama de transporte de metales AuCl y AuHS asociado sistemas minerales. Adaptado de Pirajno (2009).

En particular, los fluidos magmáticos ácidos tienen una capacidad significativamente mayor para retener oro en solución, en comparación con los fluidos epitermales de baja sulfuración que son casi neutrales a ligeramente ácidos y que operan a temperaturas más bajas (Binder & Keppler, 2011). Además, la oxidación completa de sulfuros tiene un papel crucial en el comportamiento de estos elementos, influyendo en la movilidad y en la deposición final del oro y

otros metales preciosos (Zhu *et al.*, 2011). Por ejemplo, la formación de mena distal en los sistemas de pórfidos de Cu es menos común, sin embargo, dentro de halos propilíticos tienden a desarrollarse vetas subepitermales de Zn-Pb-Cu-Ag \pm Au, controladas por fallas y fracturas (Sillitoe, 2010) (Figura 3).

Por lo tanto, un entendimiento integral de las condiciones fisicoquímicas y redox de un sistema hidrotermal es crucial para la modelización de los depósitos epitermales y, por ende, para la exploración eficaz de los recursos minerales.

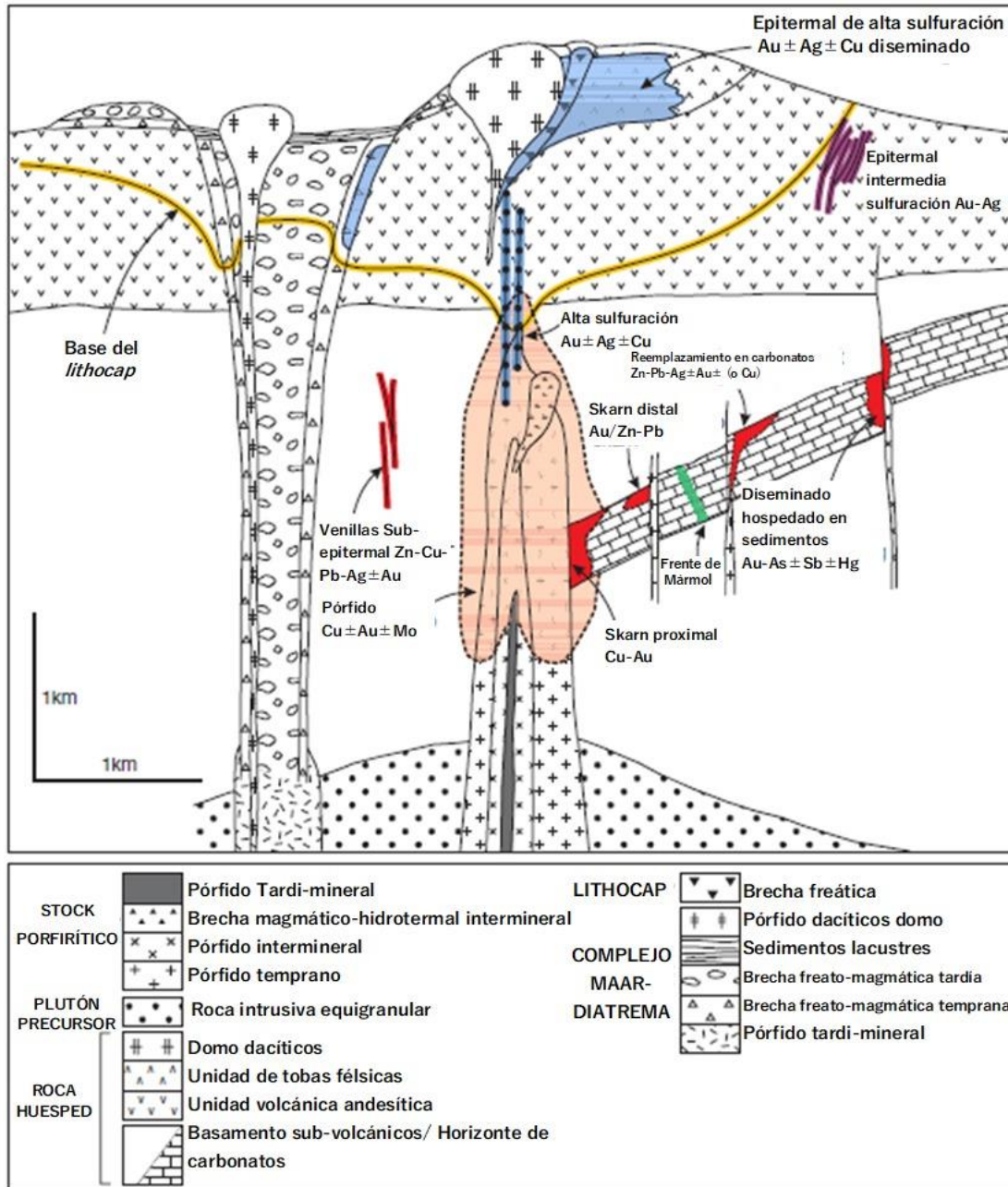


Figura 3. Anatomía de un sistema de pórfido de Cu y su relación con otros tipos de depósitos. Depósitos epitermales de sulfuración alta e intermedia suprayacentes junto a el entorno de *lithocap*. Adaptado de Sillitoe (2010).

3.2 Fluidos hidrotermales

Los fluidos mineralizantes son soluciones acuosas de alta temperatura, que oscilan entre 50 y más de 500°C, y suelen ser ricos en solutos metálicos y no metálicos que precipitan cuando hay cambios en las propiedades fisicoquímicas del fluido, como la presión, temperatura, y composición química, dentro de un rango espacial y temporal específico (Stefánsson & Seward, 2004; Zhu *et al.*, 2011). Aunque a menudo se usan de manera intercambiable los términos “fluido” y “solución”, el término “fluido” se refiere específicamente a la fase supercrítica del sistema que existe antes de las condiciones finales que inducen la precipitación del mineral, la cual puede ser líquida o gaseosa, o una combinación de ambas fases (Simmons & Brown, 2006; Pirajno, 2009).

En el estudio de los sistemas hidrotermales, es fundamental tener en cuenta las fluctuaciones en variables como la temperatura, la presión y la densidad del fluido (Pirajno, 2009; Garofalo & Ridley, 2014). La temperatura afecta tanto la solubilidad de los minerales como las reacciones químicas que ocurren en el fluido, por ejemplo, un aumento en la temperatura puede llevar a una mayor solubilidad de ciertos minerales, lo que puede favorecer su movilidad en el fluido (Stefánsson & Seward, 2004). Por otra parte, las variaciones de presión pueden afectar la fase del fluido, es decir, si es líquido, gas o una mezcla de ambos, y puede influir en la capacidad del fluido para transportar minerales en solución o en suspensión (Pirajno, 2009). La densidad tiene un impacto en la flotación y sedimentación de partículas en el fluido, además, las variaciones de densidad pueden indicar la presencia de diferentes fases del fluido o la dilución del fluido con agua meteórica o magmática (Garofalo & Ridley, 2014).

En consecuencia, el estudio de las vetas, tomando en consideración las variables principales (temperatura, presión y densidad del fluido), es crucial para una comprensión integral

del proceso de formación de depósitos minerales. Para lograrlo, se pueden emplear diversas metodologías, entre las que se incluyen la geoquímica de la veta y la roca encajante, así como la microtermometría de inclusiones fluidas para determinar aspectos como la salinidad (Figura 4) y las condiciones de presión y temperatura del fluido mineralizante (Roedder, 1984; Bodnar, 1993; Goldstein, 2003; Ridley, 2013). El estudio básico de la geoquímica de las vetas arroja luz sobre la naturaleza y origen de los fluidos a partir de los cuales se precipitaron los minerales de interés, y permite refinar los modelos teóricos existentes para el desarrollo de estrategias más efectivas de exploración mineral (Cathles *et al.*, 1997; Pirajno, 2009; Garofalo & Ridley, 2014).

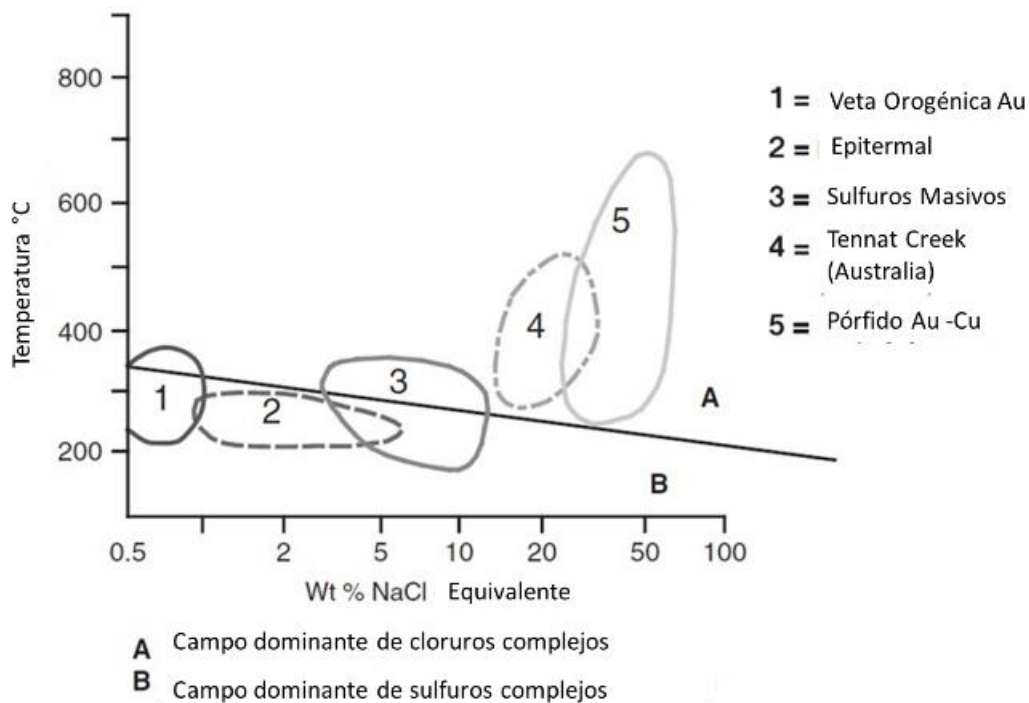


Figura 4. Campos de temperatura-salinidad y curva de gradiente medio para una variedad de sistemas hidrotermales: (1) Au orogénico Arqueano; (2) Au-Ag epitermal; (3) sulfuros masivos volcanogénicos; (4) Tennant Creek Au-Cu, Australia; (5) Pórfido Cu-Au. Adaptado de Large *et al.* (1988).

3.3 Solubilidad y ebullición

La precipitación de minerales en sistemas hidrotermales está fuertemente influenciada por factores como la solubilidad y la ebullición de los componentes involucrados. La solubilidad es una propiedad que está determinada por las interacciones entre las fuerzas de atracción del soluto y el disolvente, así como las fuerzas de atracción entre iones de cargas opuestas (Masterton & Hurley, 2008). En este contexto, las reglas de solubilidad propuestas por (Masterton & Hurley, 2008 y referencias citadas en el) ofrecen un marco útil para predecir la solubilidad de distintos iones en solución, como nitratos, cloruros, sulfatos, carbonatos e hidróxidos:

NO_3 : todos los nitratos son solubles.

Cl : todos los cloruros son solubles, excepto AgCl , Hg_2Cl_2 .

SO_2 : todos los sulfatos son solubles excepto CaSO_4 , SrSO_4 , BaSO_4 , PbSO_4 , Ag_2SO_4 .

CO_2 : todos los carbonatos son insolubles excepto los de los elementos del Grupo I (Na, K, etc.).

OH : todos los hidróxidos son insolubles excepto los elementos del Grupo I, $\text{Sr}(\text{OH})_2$ y $\text{Ba}(\text{OH})_2$.

S_2 : todos los sulfuros son insolubles, excepto los elementos de los Grupos I y II.

La solubilidad también depende de las variaciones en la temperatura y la presión que afectan a un sistema. La ruptura de una red cristalina para facilitar la disolución representa un proceso endotérmico, donde la absorción de calor es necesaria (Haynes *et al.*, 2014). En general, la solubilidad de sólidos en líquidos tiende a aumentar con la temperatura, según la reacción: $\text{Sólido} + \text{Solvente} \rightarrow \text{Solución}$ (Atkins & De Paula, 2006; Pirajno, 2009).

Además de la solubilidad, la ebullición también juega un papel significativo en la precipitación de minerales. Cambios en la temperatura y/o la presión pueden llevar a la ebullición del fluido, lo cual puede resultar en una separación de fases y, en consecuencia, en la formación de depósitos minerales (Heinrich, 2007; Stefánsson & Seward, 2004). En un proceso exotérmico, la disolución de un gas en un líquido libera calor, conforme a la reacción: Gas + Líquido → Solución. Es notable que, al aumentar la temperatura, los gases generalmente se vuelven menos solubles en líquidos (Sander, 2015). En un sistema gas-líquido, la presión tiene un efecto significativo en la solubilidad del gas a una temperatura dada. A medida que la presión aumenta, la concentración de moléculas en la fase gaseosa también aumenta, favoreciendo su entrada en la solución (Atkins & De Paula, 2006).

En el contexto de soluciones hidrotermales, el punto de ebullición se alcanza cuando la presión de vapor del líquido es igual a la presión ejercida sobre la fase líquida. Bajo estas condiciones, los compuestos volátiles como CO₂ y H₂S son eliminados, lo cual es particularmente crucial para la precipitación de elementos como Au, As, Sb y Ag (Heinrich, 2007).

3.4 **Potencial redox (reducción – oxidación: Eh)**

Los procesos redox se basan en la transferencia de electrones entre diferentes elementos, permitiendo determinar si un ambiente es oxidante o reductor. En el contexto de la química de elementos como el hierro (Fe), un estado oxidado se caracteriza por la pérdida de electrones que luego se asocian con otros átomos. Inversamente, en un estado reductor, el elemento oxidado adquiere electrones de otro compuesto (Stumm & Morgan, 1996). Esta transferencia electrónica es esencial para comprender la movilidad de elementos metálicos y su potencial de formar concentraciones de minerales de interés económico en depósitos hidrotermales (Pirajno, 2009).

Un alto potencial redox (Eh) es indicativo de un sistema oxidante, mientras que un bajo Eh señala un ambiente reductor. Estos estados pueden tener un efecto significativo en la solubilidad y en la movilidad de metales como oro, plata y otros elementos en soluciones hidrotermales (Seward, 1978). Eh y pH son dos parámetros fundamentales que interactúan para controlar dicha movilidad y, por consiguiente, los diagramas Eh-pH se utilizan con frecuencia para ilustrar las condiciones bajo las cuales pueden tener lugar diversos procesos redox (Pirajno, 2009).

4 Materiales y métodos

La presente tesis se llevó a cabo en cuatro etapas principales, las cuales se describen a continuación.

4.1 Fase preliminar: compilación de información de los núcleos de perforación y de análisis químicos

A partir de la base de datos geoquímicos de los pozos de perforación del Proyecto Toldafría, y de las fotos de los núcleos de perforación, se procedió a una etapa inicial de filtrado y selección de la información relevante para el presente estudio. Los datos proporcionados incluían mapas geológicos detallados, las ubicaciones, orientaciones y profundidades de los pozos perforados, descripciones litológicas, ubicaciones en profundidad y resultados geoquímicos de las muestras, y las descripciones de las zonas mineralizadas. Con el fin de realizar un análisis coherente y enfocado, se llevó a cabo una selección rigurosa de los pozos a estudiar. Para ello, se evaluó la ubicación espacial de cada uno de los 17 pozos en un mapa georreferenciado, tomando en cuenta su orientación desde el Sur al Norte. Tras esta evaluación, se seleccionaron los pozos DH-TF-002, DH-TF-004, DH-TF-006, DH-TF-009, DH-TF-012, DH-TF-015 y DH-TF-016 para su análisis posterior. Los criterios de selección se basaron en la orientación de los pozos y su relación con las estructuras mineralizadas proyectadas, según el plan de perforación previamente propuesto por Aura Minerals Inc. Específicamente, los pozos seleccionados tenían orientaciones que buzan hacia el Este, los cuales, según los modelos geológicos existentes, se determinó que estos pozos interceptarían las estructuras de una manera casi perpendicular.

Una vez seleccionados los pozos, se procedió a representarlos en columnas estratigráficas a escala 1:100 a partir del fotologeo de los núcleos de perforación, contrastando constantemente

la información contenida en la base de datos. En las columnas estratigráficas se plasmó la información geológica, estructural y geoquímica, con las respectivas ubicaciones de las muestras con resultados geoquímicos.

4.2 Fase de campo: descripción y muestreo de los núcleos de perforación

Con la información representada en las columnas estratigráficas, se procedió a seleccionar tres (3) pozos representativos de los siete (7) pozos trabajados (Figura 5), con el fin de realizar su descripción, la cual se llevó a cabo en las instalaciones de la empresa Aura Minerals Inc. Con esta descripción, y con la información suministrada previamente en la base de datos, se identificaron las zonas con mayor acumulación de minerales metálicos y con altas concentraciones de Au, con el fin de describir la mineralogía asociada.

4.3 Petrografía

Fueron tomadas tres (3) muestras para la elaboración de secciones delgadas pulidas y para su posterior descripción metalográfica, las cuales corresponden a venas mineralizadas en contacto con la roca encajante. De las tres muestras seleccionadas, se realizaron dos (2) secciones delgadas pulidas en el laboratorio MINERLAB Ltda y fueron analizadas con el microscopio Nikon 50i POL del Laboratorio de Yacimientos Minerales de la Universidad de Caldas, mediante microscopia óptica de luz reflejada y luz transmitida, empleando aumentos de 5X, 10X, 20X y 50X. Se registraron las asociaciones minerales presentes y sus texturas, en microfotografías. La descripción de los tamaños de los cristales se realizó a partir de los parámetros propuestos por British Geological Survey (1999) de la siguiente manera: muy grueso (> 16 mm), grueso (16 - 2 mm), medio (2 - 0,25 mm), fino (0,25 - 0,032 mm) y muy fino (< 0,032 mm). Las abreviaturas de los

minerales fueron tomadas de Whitney & Evans (2010): Au: oro; Ag: plata; Py: pirita; Ccp: calcopirita; Po: pirrotina; Sp: esfalerita; Gn: galena; Qz: cuarzo; Cal: calcita; Ms: moscovita; Gr: grafito.

4.4 Geoquímica de roca total

De la base de datos proporcionada, se extrajeron un total de 2156 resultados químicos, los cuales fueron obtenidos mediante análisis de roca total. Estos resultados pertenecen exclusivamente a las muestras recopiladas de los siete pozos que fueron previamente seleccionados, con el fin de asegurar la relevancia y precisión en la evaluación geoquímica de las zonas de interés. Las muestras fueron secadas y trituradas, y posteriormente analizadas mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*), ensayos al fuego de oro y plata y espectrometría de absorción atómica, en el laboratorio SGS S.A., mediante los análisis ICM40B (análisis multielementales: 50 analitos con límites de detección variables), FAA313 (ensayo al fuego con acabado de absorción atómica con límites de detección entre 5 y 5000 ppb) y FAG303 (ensayo al fuego con acabado gravimétrico).

Mediante el procesamiento de los resultados químicos con el software ioGAS, usando el atributo *Downhole*, se contrastaron las variables de profundidad y concentración del oro y la plata, y de los metales base en cuestión (Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S) para reconocer el comportamiento de los elementos en profundidad y su posible correlación quimioestratigráfica. A los resultados químicos se les realizó un tratamiento geoestadístico con el *software* Excel, hallando las variables de estadística descriptiva e identificando la mediana, las desviaciones estándar, el *background* y los umbrales para los elementos de interés. Se determinó el *background* usando la mediana, el

Umbral 1 corresponde a una mediana más una desviación estándar, el Umbral 2 es una mediana más dos desviaciones estándar y el Umbral 3 una mediana más tres desviaciones estándar. Teniendo en cuenta los parámetros estadísticos calculados, se representaron en las columnas estratigráficas los valores considerados anómalos (por encima del *background*) y en cada pozo se segmentaron los picos (valores más altos) de los metales base (Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S).

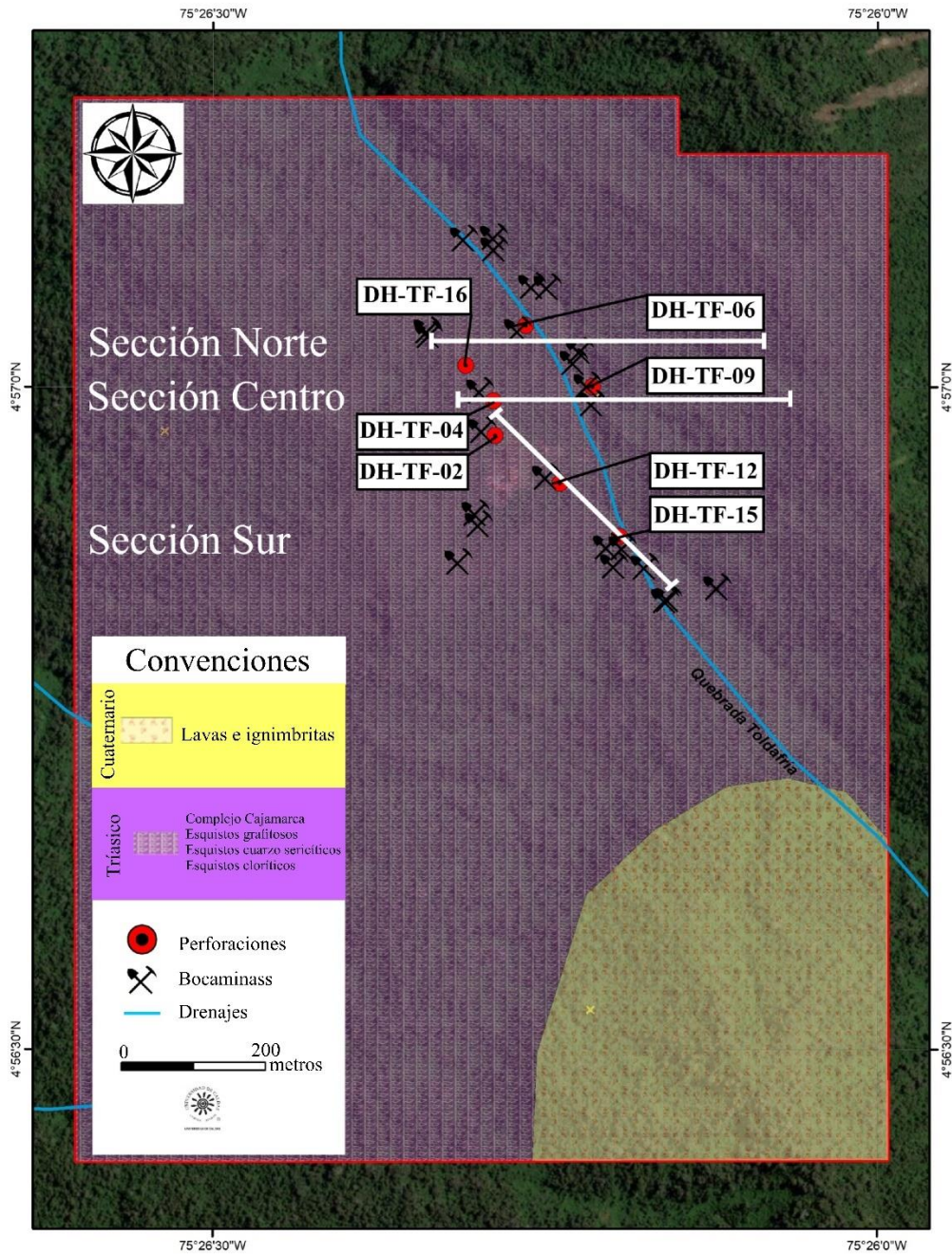


Figura 5. Mapa de geología local con la ubicación de los pozos del depósito Toldafria

5 Resultados

5.1 Descripción litológica a partir de fotologeo y descripción en campo de núcleos de perforación

A partir de los datos geológicos y químicos contenidos en la base de datos, se representó la información de litología y muestreo de siete pozos (Tabla 1) seleccionados previamente (ver capítulo de Materiales y métodos) en columnas estratigráficas (Figuras 6 a 12).

Tabla 1. Tabla con orientación; localización y número de muestras de las perforaciones seleccionadas para el análisis

Pozo	X	Y	Z	Azimut	Inclinación	Profundidad (m)	Número de muestras
DH-TF-002	75°26'17,2"	4°56'57,8"	2989	90 °	60 °	311	311
DH-TF-004	75°26'17,3"	4°56'59,4"	2980	90 °	60 °	312	306
DH-TF-006	75°26'15,8"	4°57'02,8"	2940	90 °	50 °	335,4	314
DH-TF-009	75°26'12,8"	4°57'0"	2943	90 °	50 °	276	278
DH-TF-012	75°26'14,3"	4°56'55,7"	2969	135 °	50 °	346	395
DH-TF-015	75°26'11,5"	4°56'53,3"	2959	90 °	50 °	276	296
DH-TF-016	75°26'18,5"	4°57'01,0"	2975	90 °	60 °	275	256

Pozo DH-TF-002. Las capas superficiales del pozo (los primeros siete metros) corresponden a sobrecarga y saprolito, donde las estructuras primarias y composición mineralógica no fueron identificadas. Las litologías observadas en el pozo, con una profundidad total de 311 m (Figura 6), corresponden principalmente a esquistos grafitosos (MSG) en intervalos de espesor que varían de pocos metros (< 5 m) a espesores de más de 10 m, alcanzando más de 50 m. Presentan intercalaciones de esquistos cuarzo-sericíticos (MSS) con espesores que varían entre pocos metros (< 5 m) a espesores de aproximadamente 10 m, alcanzando localmente espesores de más de 10 m. De manera subordinada, se presentan intercalaciones de esquistos cloríticos (MSC), con espesores menores de 10 m. Al interior de los intervalos de esquistos grafitosos y de esquistos cuarzo-sericíticos, se presentan 12 estructuras de falla (FLT) y lentes de pirita, esfalerita y goethita (LES). Los ángulos de foliación medidos en los núcleos de perforación muestran alta deformación dúctil, con formación de foliación penetrativa (S_1) y localmente crenulación (S_2). Entre los planos de foliación y algunas fracturas que cortan dichos planos, se presentan venas de 1 cm a 10 cm de espesor (VNA), así como venillas con espesor de 0,1 cm a 1 cm (VTS), y en menor proporción se observaron cuatro (4) estructuras de vetas (VEN). El dominio principal de estilo de mineralización es VNA.

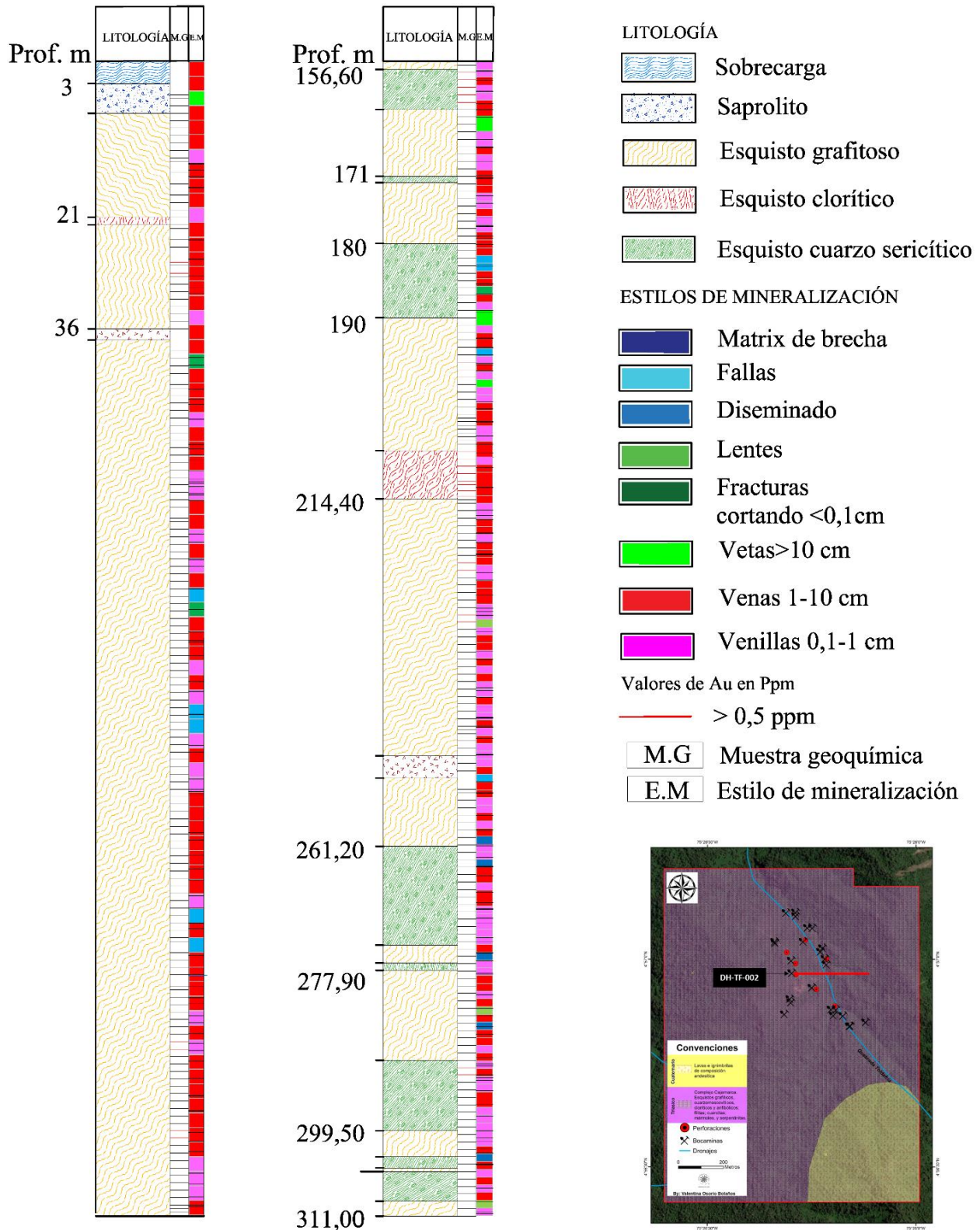


Figura 6. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-002.

Pozo DH-TF-004. Los primeros 15 m del pozo no fueron recuperados, es decir que no fue posible identificar estructuras primarias y composición mineralógica. Las litologías observadas en el pozo de 312 m de profundidad (Figura 7) están representadas principalmente a esquistos grafitosos (MSG), con espesores que varían de pocos metros (1 m) hasta espesores que alcanzan 65 m. Presentan intercalaciones de esquistos cloríticos (MSC) con espesores que varían entre menos de 5 m y aproximadamente 10 m. De manera subordinada, se presentan cuatro (4) capas intercaladas de esquistos cuarzo-sericíticos (MSS), variando entre menos de 1 m y más de 25 m de espesor. Al interior de las capas de MSS se presentan de manera discordante cuatro (4) estructuras mineralizadas, así como fracturas de menos de 0,1cm (FRC), además, los ángulos medidos en los planos de foliación y la presencia de estructuras plegadas, evidencian alta deformación dúctil, de acuerdo con formación de foliación penetrativa (S_1) y crenulación (S_2). Se presentan delgadas venas de pirita y minerales arcillosos cortando los planos de foliación. Entre los planos de foliación se presentan vetas de más de 10 m de espesor (VEN), así como venas que varían entre 1 cm y 10 cm (VNA) y venillas de 0,1 cm a 1 cm de espesor (VTS). El estilo de mineralización dominante es VTS.

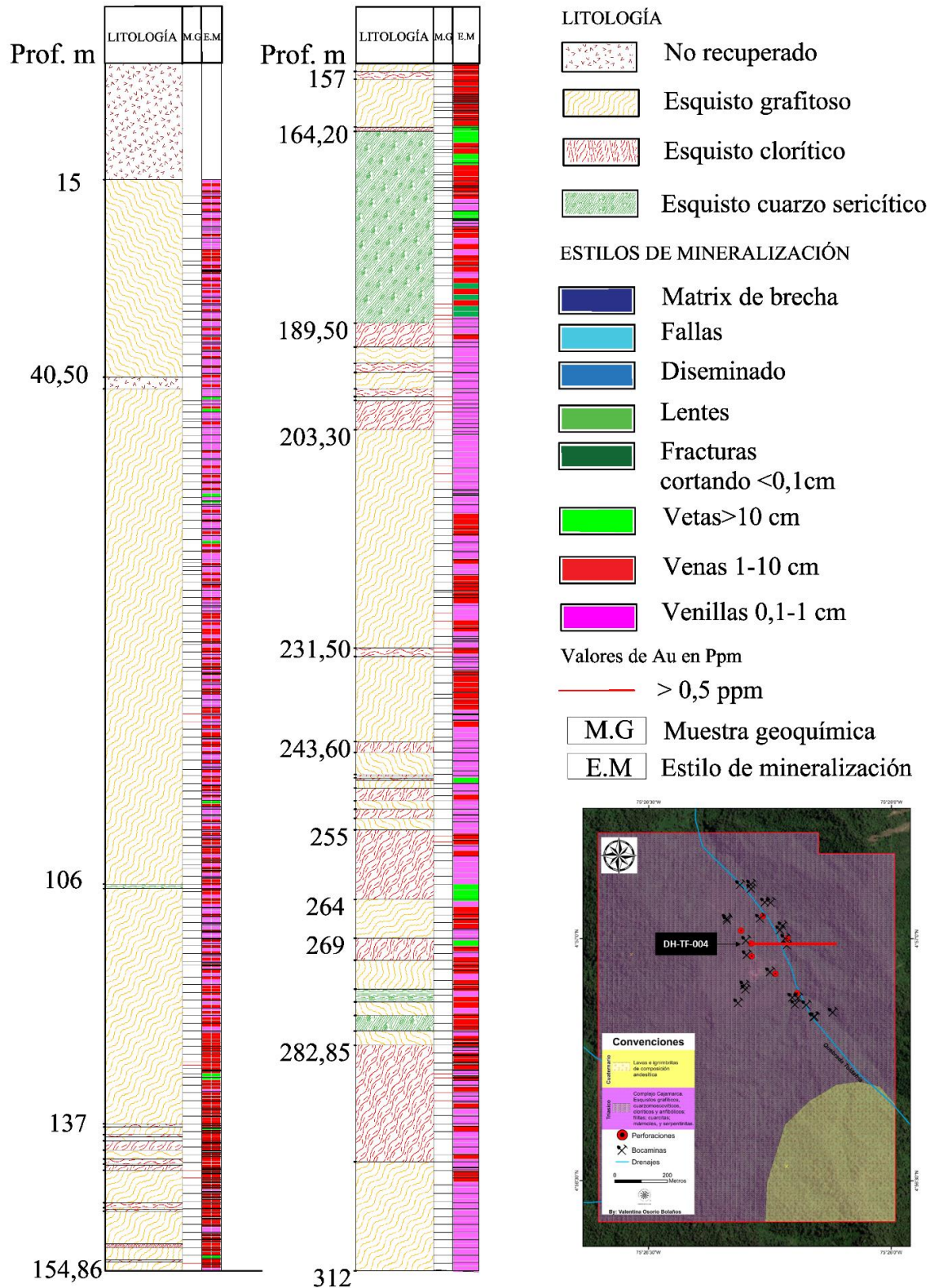


Figura 7. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-004.

Pozo DH-TF-006. Los ocho metros iniciales corresponden a saprolito y coluvión, y por lo tanto, no fueron identificadas las estructuras primarias y la composición mineralógica. El pozo tiene una profundidad de 335 m (Figura 8), representado principalmente por esquistos grafitosos (MSG) con intercalaciones de esquistos cloríticos (MSC), ambos con espesores que varían entre 1 m hasta más de 70 m aproximadamente, y subordinadas se presentan dos (2) capas de esquistos cuarzo-sericíticos (MSS), una de ellas con un espesor menor a 1 m, y la otra de 5 m. Estos intervalos presentan variedad de estilos de mineralización, siendo las venillas de 0,1 cm a 1 cm de espesor (VTS) las dominantes, venas 1 cm a 10 cm (VNA) y en menor proporción cuatro (4) estructuras de vetas de menos de 10 m de espesor (VEN), compuestas por cuarzo, con pirita, esfalerita y pirrotina. Estas vetas están de manera concordante a la foliación de los esquistos. Adicionalmente, se presentan 13 lentes (LES) de manera discordante entre los metros 200 y 300 del pozo, compuestos por calcita, minerales arcillosos, clorita y pirrotina, y hacia la base y el tope del pozo, se presentan lentes concordantes con la foliación compuestos por cuarzo, pirita y pirrotina. El pozo también presenta 52 fracturas cortando de menos de 0,1 cm de espesor (FRC), siendo la mayoría discordantes, así como 15 intervalos de falla (FLT) y cuatro (4) zonas con pirrotina diseminada (DSM) en esquistos cloríticos. El estilo de mineralización principal es VTS.

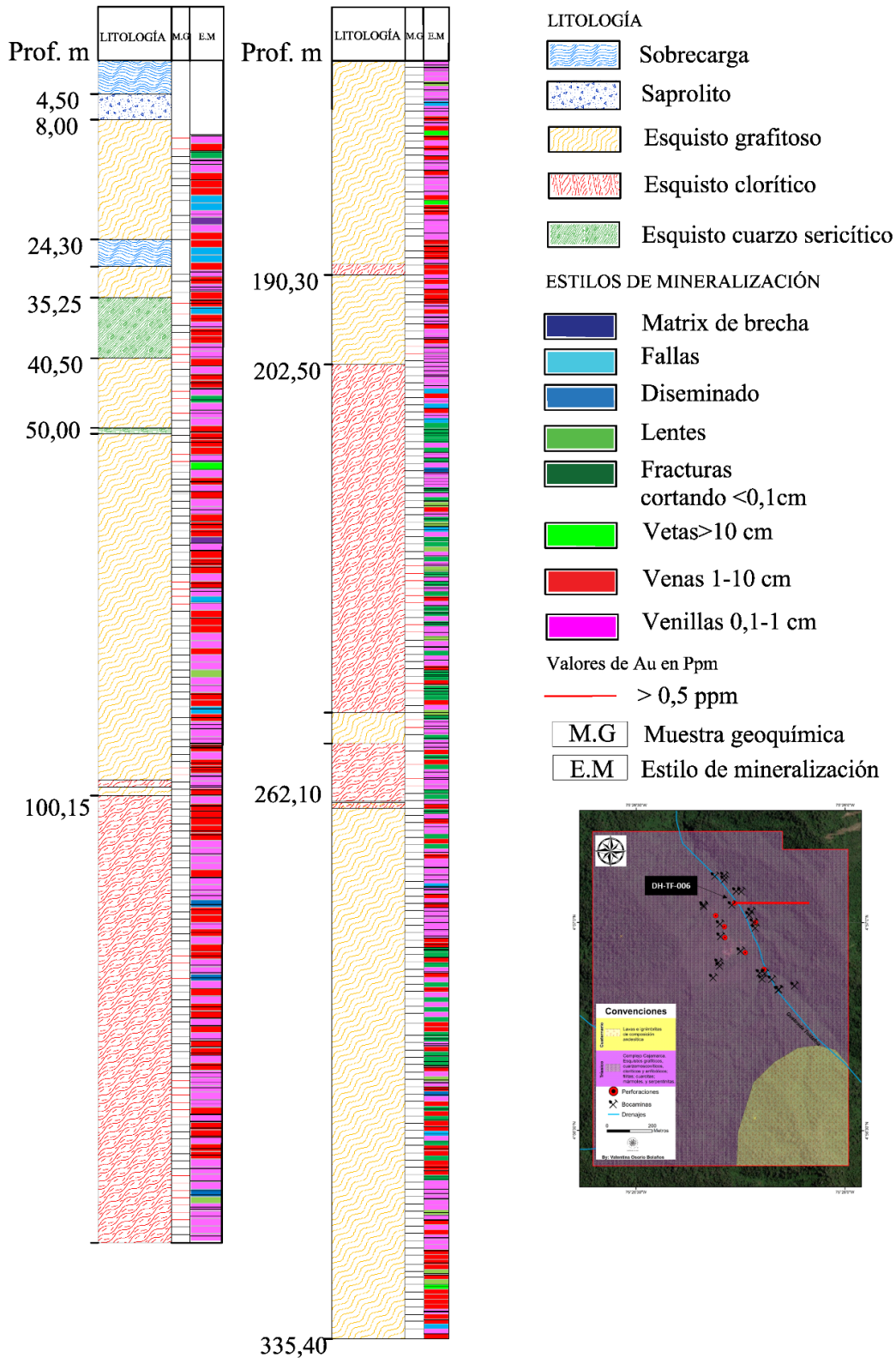


Figura 8. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-006.

Pozo DH-TF-009. Los 4,5 m superficiales del pozo son sobrecarga, donde las estructuras primarias y la composición mineralógica no fueron identificadas. Las litologías observadas en el pozo, el cual presenta una profundidad total de 276 m (Figura 9) corresponden a esquistos grafitosos (MSG) en intervalos de espesor que varían de pocos metros (< 2 m) a espesores de más de 10 m, localmente alcanzando más de 100 m. Presentan intercalaciones de esquistos cuarzo-sericíticos (MSS) con espesores que varían entre pocos metros (< 2 m) y alcanzando localmente espesores de más de 10 m. Es notoria la alta deformación dúctil, con formación de foliación penetrativa (S_1) y crenulación (S_2). Entre los planos de foliación y algunas fracturas que cortan dichos planos, se presentan venas de 1 cm a 10 cm de espesor (VNA), así como venillas con espesor de 0,1 cm a 1 cm (VTS), y en menor proporción se observaron ocho (8) estructuras de vetas de cuarzo (VEN) concordantes con la foliación y con presencia de pirita, pirrotina y calcopirita. Se presentan también de manera concordante cinco (5) lentes de cuarzo (LES) con presencia pirita y pirrotina, y una zona de fracturas de menos de 10 cm (FRC) con calcita y pirita, cinco (5) zonas de falla (FLT) aparentemente concordantes con la foliación, con presencia de pirita, clorita y sericita, y finalmente 10 zonas con pirita y pirrotina diseminadas (DSM), especialmente en los MSG. El estilo de mineralización principal es VNA.

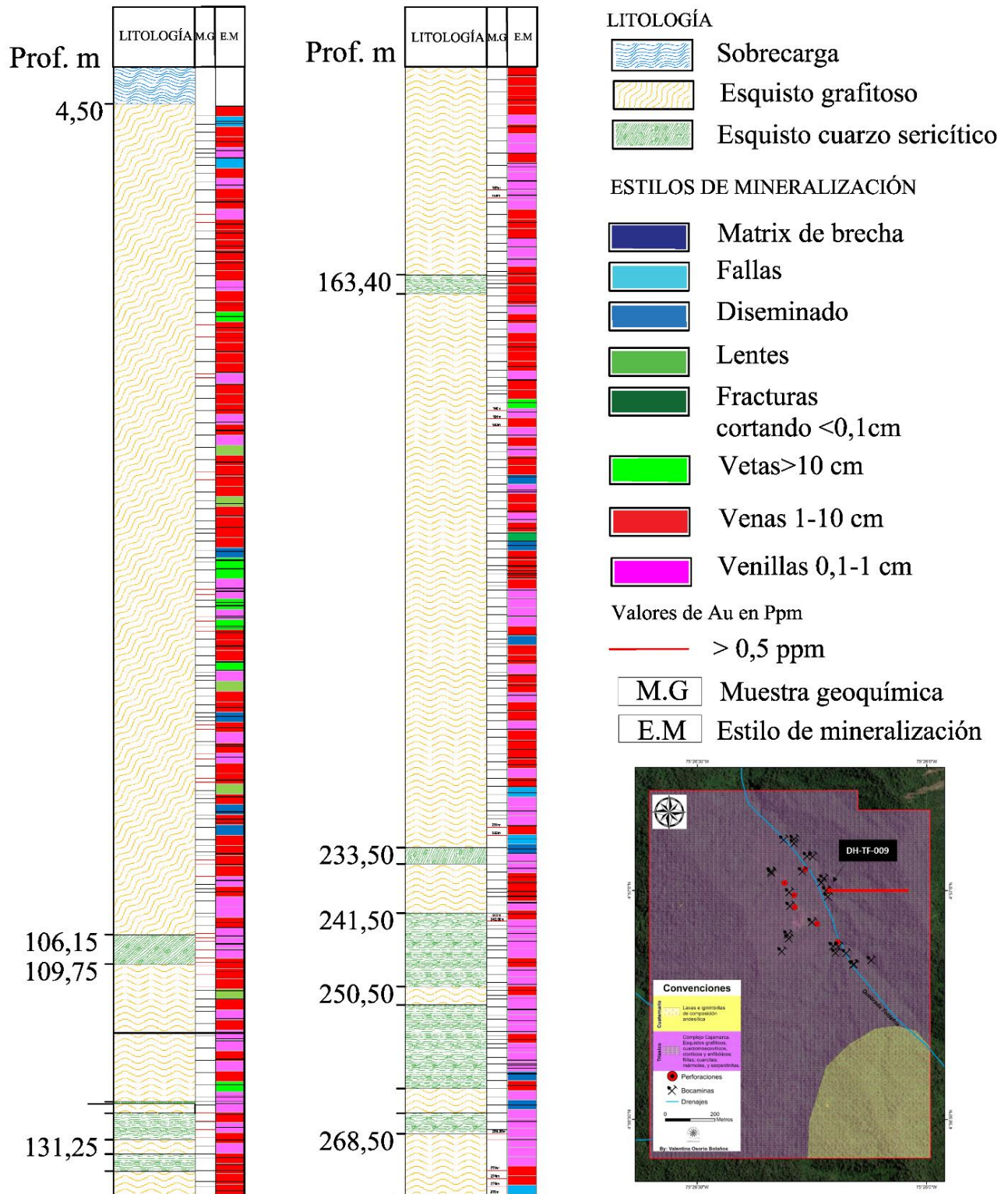


Figura 9. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-009.

Pozo DH-TF-012. Los 30 metros iniciales corresponden a saprolito, y, por lo tanto, no fueron identificadas las estructuras primarias y la composición mineralógica. El pozo tiene una profundidad de 344,95 m (Figura 10), representado principalmente por esquistos grafitosos (MSG) en intervalos de espesor que varían de 10 m a 85 m, con intercalaciones de esquistos cloríticos (MSC), con espesores que varían entre pocos metros (< 3 m) hasta aproximadamente 30 m. De manera subordinada se presentan intercalados esquistos cuarzo-sericíticos (MSS), con espesor variando entre 1 m y 3 m. La foliación es penetrativa (S_1) y localmente presenta crenulación (S_2). Entre los planos de foliación y algunas fracturas que cortan dichos planos, se presentan venas de 1 cm a 10 cm de espesor (VNA), así como venillas con espesor de 0,1 cm a 1 cm (VTS), y en menor proporción se observaron 11 estructuras de vetas de cuarzo (VEN) concordantes con la foliación, con minerales arcillosos, pirita, pirrotina, esfalerita y calcopirita. También se presentan 31 lentes de cuarzo con formas de *boudines* (LES) de manera concordante, con una zona de menos de 0,1 m de fracturas (FRC), con presencia de cuarzo, pirita, pirrotina y clorita. Además, se observaron cinco (5) zonas de falla (FLT) con presencia de cuarzo, minerales arcillosos, calcita y pirita, así como cinco (5) zonas de pirita, pirrotina y esfalerita diseminadas (DSM) Finalmente, se observaron tres (3) intervalos de matriz de brecha (BXM) de manera discordante y con presencia de cuarzo, grafito y minerales arcillosos, con pirita, galena y pirrotina. El estilo de mineralización dominante es VNA.

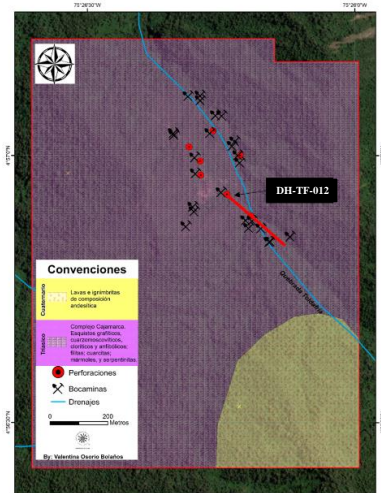
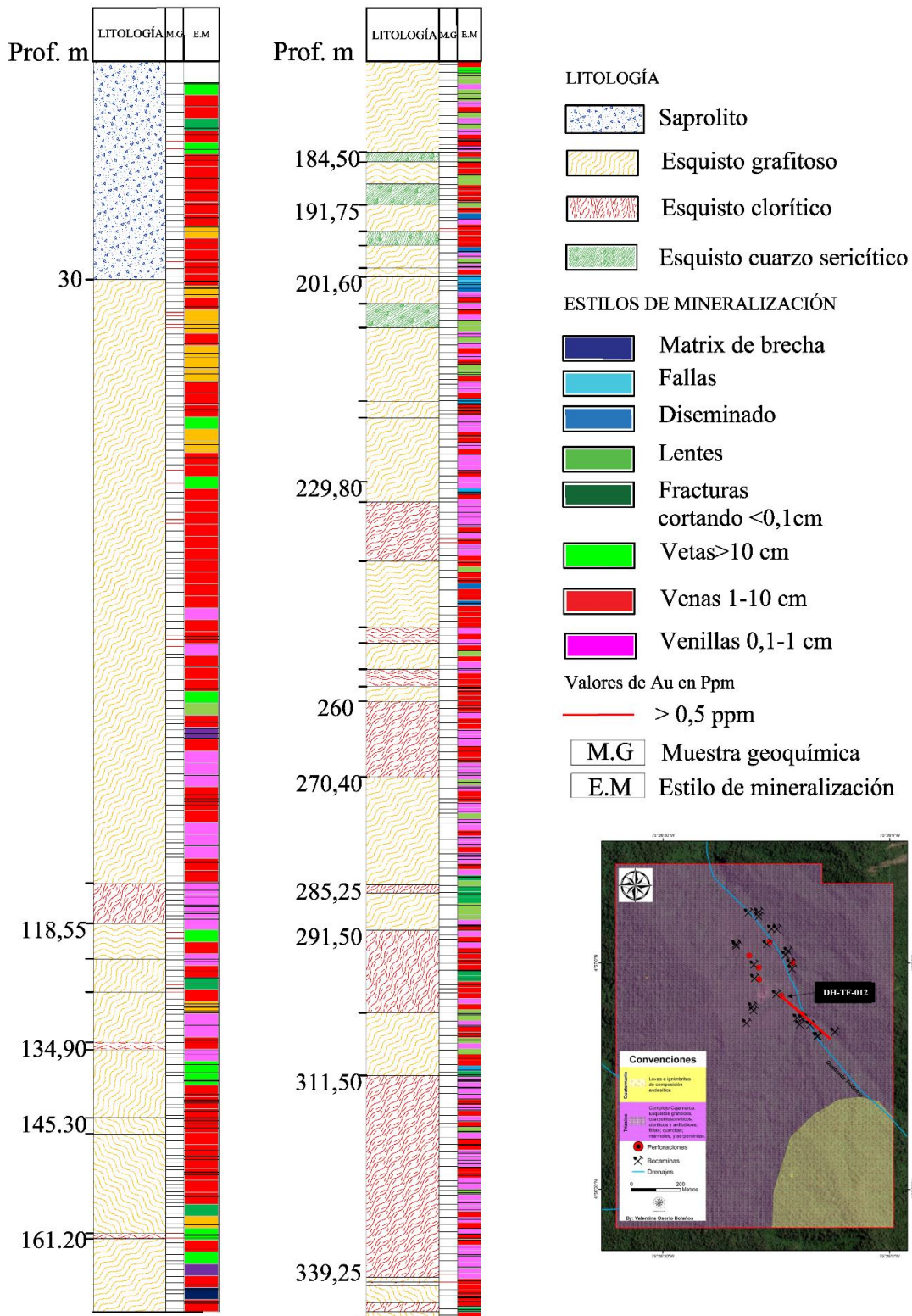


Figura 10. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-012.

Pozo DH-TF-015. La capa superficial del pozo (los primeros seis metros) corresponden a coluvión. Las litologías observadas en el pozo, con una profundidad total de 276 m (Figura 11), corresponden principalmente a esquistos grafitosos (MSG) en intervalos de espesor que varían de pocos metros (< 1 m) a espesores que alcanzan 100 m. Presentan intercalaciones de esquistos cloríticos (MSC) con espesores que varían entre pocos metros (< 1 m) a espesores de aproximadamente 7 m. Entre los intervalos de MSG se presentan intercaladas dos (2) capas de esquistos cuarzo-sericíticos (MSS) con espesores de menos de cinco (5) metros. Los ángulos de foliación medidos en los núcleos de perforación muestran alta deformación dúctil, con formación de foliación penetrativa (S_1) y localmente crenulación (S_2). Entre los planos de foliación y algunas fracturas que cortan dichos planos, se presentan venas de 1 cm a 10 cm de espesor (VNA), así como venillas con espesor de 0,1 cm a 1 cm (VTS), y en menor proporción se observaron (4) estructuras de vetas (VEN) concordantes con la foliación, con pirita, pirrotina, galena, calcita y esfalerita. De manera concordante con la foliación, se presentan 64 lentes de cuarzo (LES) con calcita, pirita, pirrotina, calcopirita, galena y esfalerita. Los MSG se encuentran fracturados (FRC), con presencia de cuarzo, calcita, clorita, pirita, pirrotina y esfalerita; además, se observaron 17 zonas de falla (FLT) con cuarzo, pirita, galena, pirrotina, esfalerita, sericita, minerales arcillosos y calcita, así como también dos (2) intervalos de pirita, pirrotina, calcita y sericita diseminadas (DSM), y de manera subordinada cuatro (4) intervalos de matriz de brecha (BXM), los cuales se presentan de manera discordante y con presencia de cuarzo, calcita, pirita, esfalerita, galena. El estilo de mineralización principal es VNA.

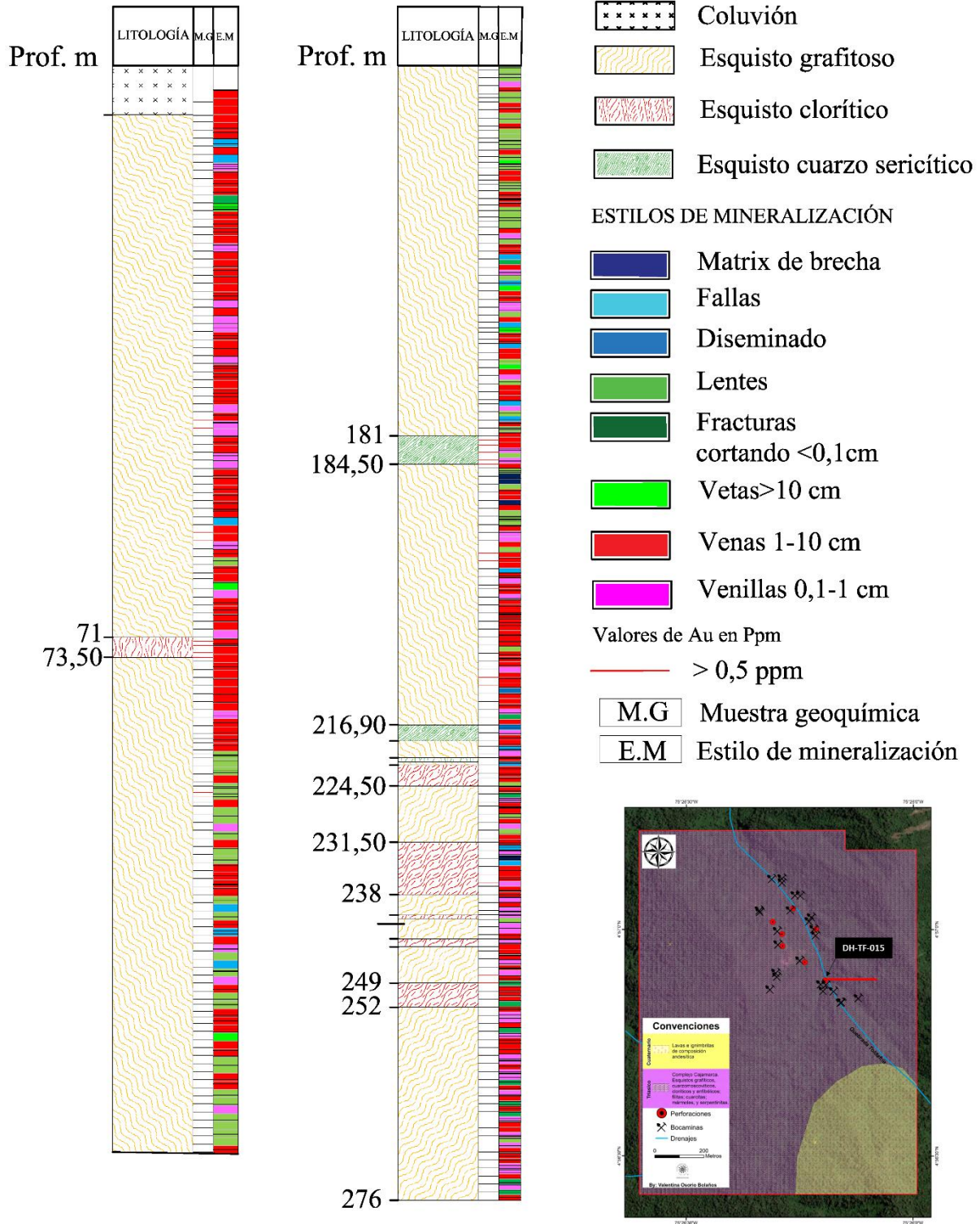


Figura 11. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-015.

Pozo DH-TF-016. Los 13 metros iniciales corresponden a saprolito, y por lo tanto, no fueron identificadas las estructuras primarias y la composición mineralógica. El pozo tiene una profundidad de 276 m (Figura 12), representado principalmente por esquistos grafitosos (MSG) en intervalos de espesor que varían de menos de 2 m a 100 m, con intercalaciones de esquistos cloríticos (MSC), con espesores que varían entre pocos metros (< 1 m) hasta aproximadamente 13 m. De manera subordinada se presentan intercalados esquistos cuarzo-sericíticos (MSS), con espesor de menos de 3 m. La foliación es penetrativa (S_1) y localmente presenta crenulación (S_2). Entre los planos de foliación y algunas fracturas que cortan dichos planos, se presentan venas de 1 cm a 10 cm de espesor (VNA), así como venillas con espesor de 0,1 cm a 1 cm (VTS), y en menor proporción se observaron 11 estructuras de vetas de cuarzo (VEN) concordantes con la foliación, con calcita, minerales arcillosos, pirita, galena, calcopirita y esfalerita. También se presentan 23 lentes de cuarzo de manera concordante, con cuarzo, calcita, clorita, pirita, pirrotina y esfalerita. Además, se observaron 17 zonas fracturadas con cuarzo, calcita, sericita, pirita, pirrotina, arsenopirita, óxidos de hierro, galena y esfalerita. Adicionalmente, se observaron tres (3) zonas de falla (FLT) discordantes con la foliación, con presencia de cuarzo, calcita, minerales arcillosos, clorita, pirita y esfalerita, así como una zona de pirita y calcita diseminadas (DSM) El estilo de mineralización dominante es VNA y VTS.

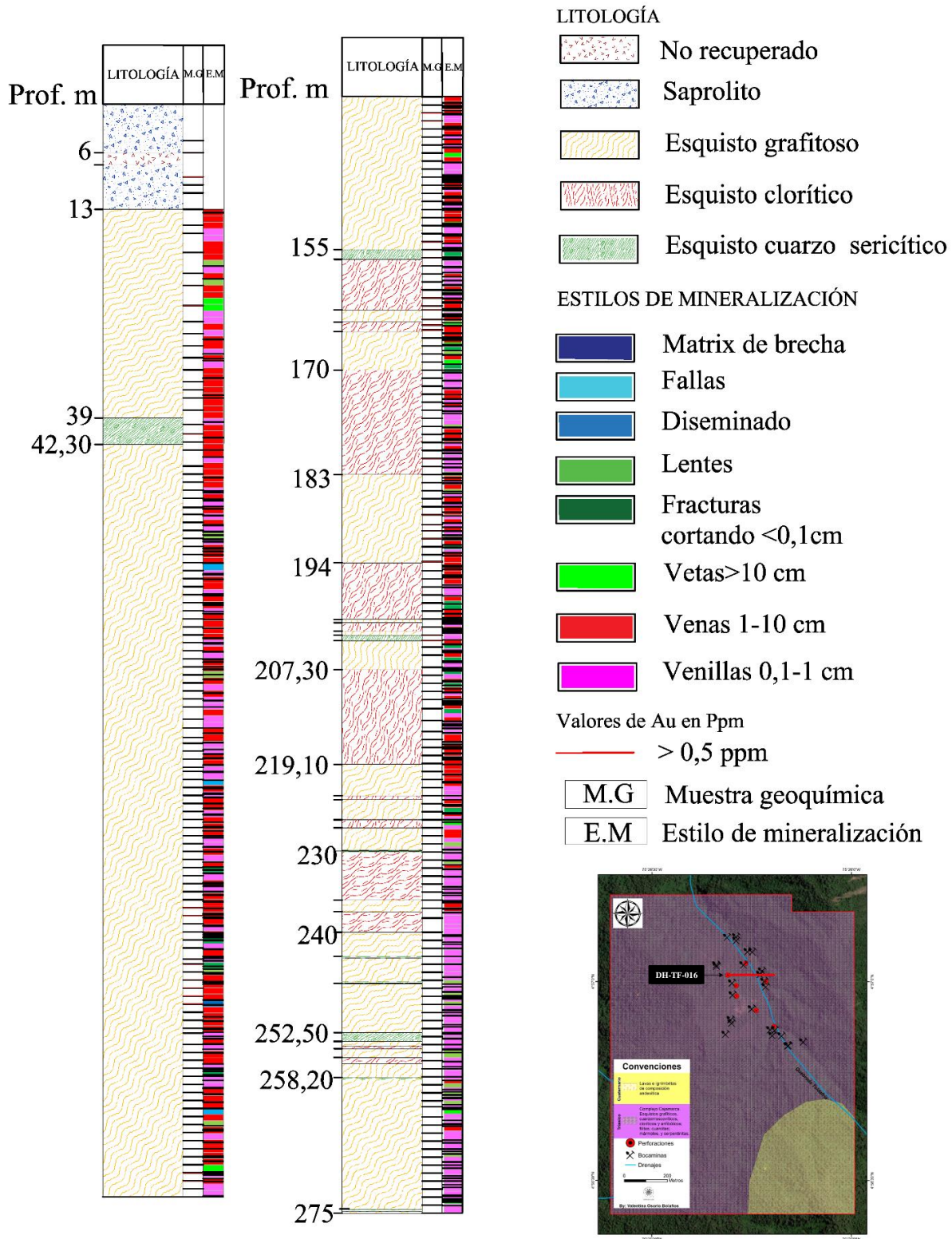


Figura 12. Estratigrafía y estructuras del pozo DH-TF-016.

De los siete pozos de perforación descritos, se seleccionaron tres de ellos (DH-TF-004, DH-TF-006 y DH-TF-015), distribuidos de sur a norte en toda el área de estudio, para realizar un muestreo de roca y a partir de estas muestras, elaborar secciones delgadas pulidas. Posteriormente, se seleccionaron tres intervalos (uno en cada pozo) con mineralización y valores altos de Au y Ag y se elaboraron dos secciones delgadas pulidas representativas de estos intervalos para llevar a cabo el análisis metalográfico de los minerales de mena. En las descripciones de las muestras de mano y en la petrografía, se usaron las abreviaturas de los minerales propuestas por Whitney & Evans (2010).

Del pozo DH-TF-004 se analizó la descripción reportada por Alvarán *et al.* (2012) de una muestra situada en la caja número 66, a una profundidad entre 199,5 m y 200 m. Esta muestra corresponde a una roca de estructura esquistosa con tonalidades verdes, debido a una alteración débil de minerales clorita-epidota (Figura 13A). Entre los planos de foliación, se presenta una drusa de cuarzo y venillas de carbonato, con mineralización de sulfuros, entre los que se encuentran pirita (Py), pirrotina (Po) y esfalerita (Sp), y fracturas con hematita (Hem). En el pozo DH-TF-006, se extrajo una muestra de roca con foliación milonítica, caracterizada por la intercalación de colores negros y pardos (Figura 13B). Esta muestra presenta venas de carbonatos y cuarzo, con un espesor de 8 mm, paralelas a los planos de foliación. Adicionalmente, se observan vetillas de menos de 1 mm de espesor, cortando la foliación milonítica. Respecto a las alteraciones, se nota el desarrollo de un halo con débil alteración de clorita-sericita y una mineralización de sulfuros, principalmente Py, calcopirita (Ccp) y Po, con moderada oxidación. Finalmente, en el pozo DH-TF-015, se obtuvo una muestra de roca con foliación milonítica, de colores negros y pardos intercalados, que presenta inyecciones graníticas concordantes con la foliación milonítica o siguiendo los planos intrafoliales de la roca (Figura 13C). Los tamaños de estas inyecciones varían

entre 0,2 mm y 0,9 mm. Tanto la roca caja como las inyecciones graníticas son atravesadas por una vena de cuarzo de 1 cm de espesor, acompañada de mineralización de sulfuros que corresponden con Py, Ccp, Sp y galena (Gn). En general, la roca muestra una débil alteración a clorita-sericita.

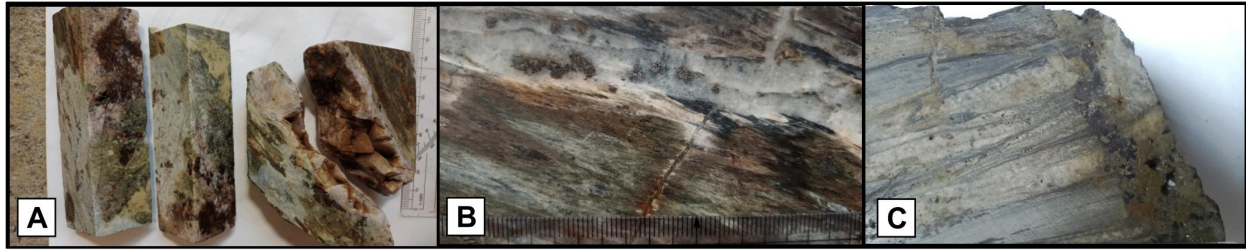


Figura 13. Muestras de testigos de perforación. **A.** Muestra del pozo DH-TF-004 de esquistos verde (alteración de clorita-epidota), con venas de cuarzo concordantes con la foliación con pirita (Py) + pirrotina (Po) + esfalerita (Sp) y fracturas con hematita (Hem). **B.** Muestra del pozo DH-TF-006 de esquistos negro y pardo con foliación milonítica, con venas de cuarzo y carbonatos, con halo de clorita y sericita, y mineralización de Py + calcopirita (Ccp) + y Po. **C.** Muestra del pozo DH-TF-015 de esquistos negro y pardo con foliación milonítica, con inyecciones graníticas concordantes a la foliación, clorita y sericita de alteración y una vena de cuarzo con Py + Ccp + Sp + galena (Ga).

5.2 Petrografía

Como se mencionó previamente, de los tres intervalos descritos se elaboraron dos secciones delgadas pulidas (muestras DH-TF-006 y DH-TF-15) y se compiló la información reportada por Alvarán *et al.* (2012) de la muestra DH-TF-004, donde fueron detalladas las venas con sulfuros, que se presentan concordantes y discordantes con los planos de foliación de los esquistos encajantes. En la muestra DH-TF-004 (Figura 14), el oro (Au) se presenta redondeado a subangular en una relación de inclusión y asociación con esfalerita (Sp), estando a su vez vinculada con calcita (Cal) (Figura 14A). El Au también se presenta en asociación con calcopirita (Ccp) y hessita (He). Estos minerales se encuentran asociados a esfalerita (Sp) y pirita (Py), exhibiendo una relación intermineral compleja (Figura 14B). La Cal a su vez se presenta asociada a pirrotina (Po), y esta última exhibe una corona distintiva de pirita (Py), además, la esfalerita (Sp) presenta inclusiones de calcopirita (Ccp) (Figura 14C-D).

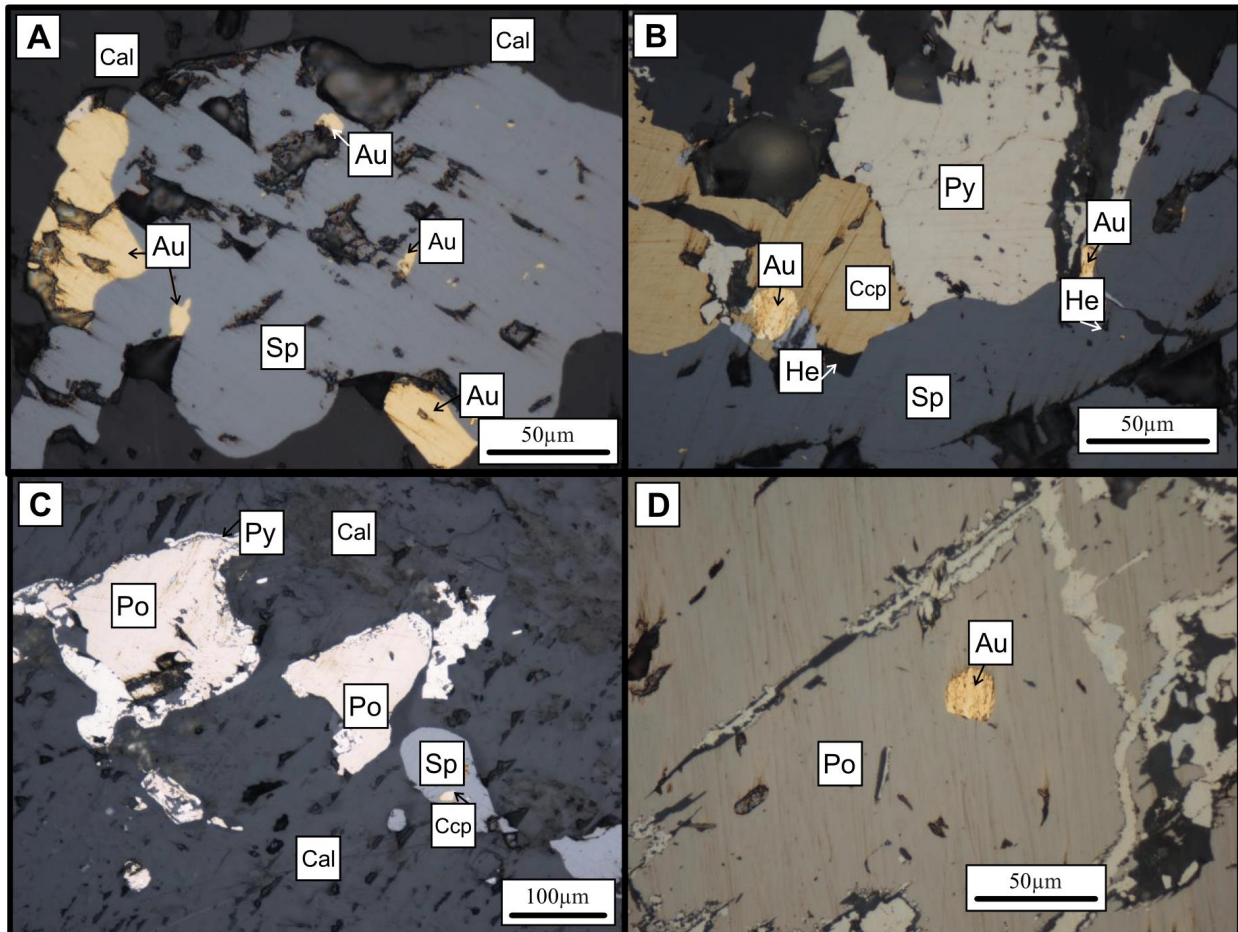


Figura 14. Microfotografías de la muestra DH-TF-004. **A.** Oro (Au) incluido y asociado a esfalerita (Sp), a su vez asociada con calcita (Cal). 50X-LR. **B.** Au asociado a calcopirita (Ccp) y hessita (He), a su vez asociados a Sp y pirita (Py). 50X-LR. **C.** Cal asociada a pirrotina (Po) con corona de Py, y a (Sp) con inclusión de Ccp. 20X-LR. **D.** Detalle de la Figura 14C. Se observa grano de Au en forma subangular como inclusión en Po. 50X-LR. Imágenes tomadas y modificadas de Alvarán *et al.* (2012).

En la muestra DH-TF-006 (Figura 15), se evidencia la presencia de Po en una asociación con Ccp (Figura 15A). Adicionalmente, el Au libre y los telurios (Te) resaltan por encontrarse incluidos en cuarzo (Qz) (Figura 15B). No obstante, el Au también se presenta como inclusión en carbonato (Cb) (Figura 15C). Además, los Te se caracterizan por su asociación marcada con Cb (Figura 15D).

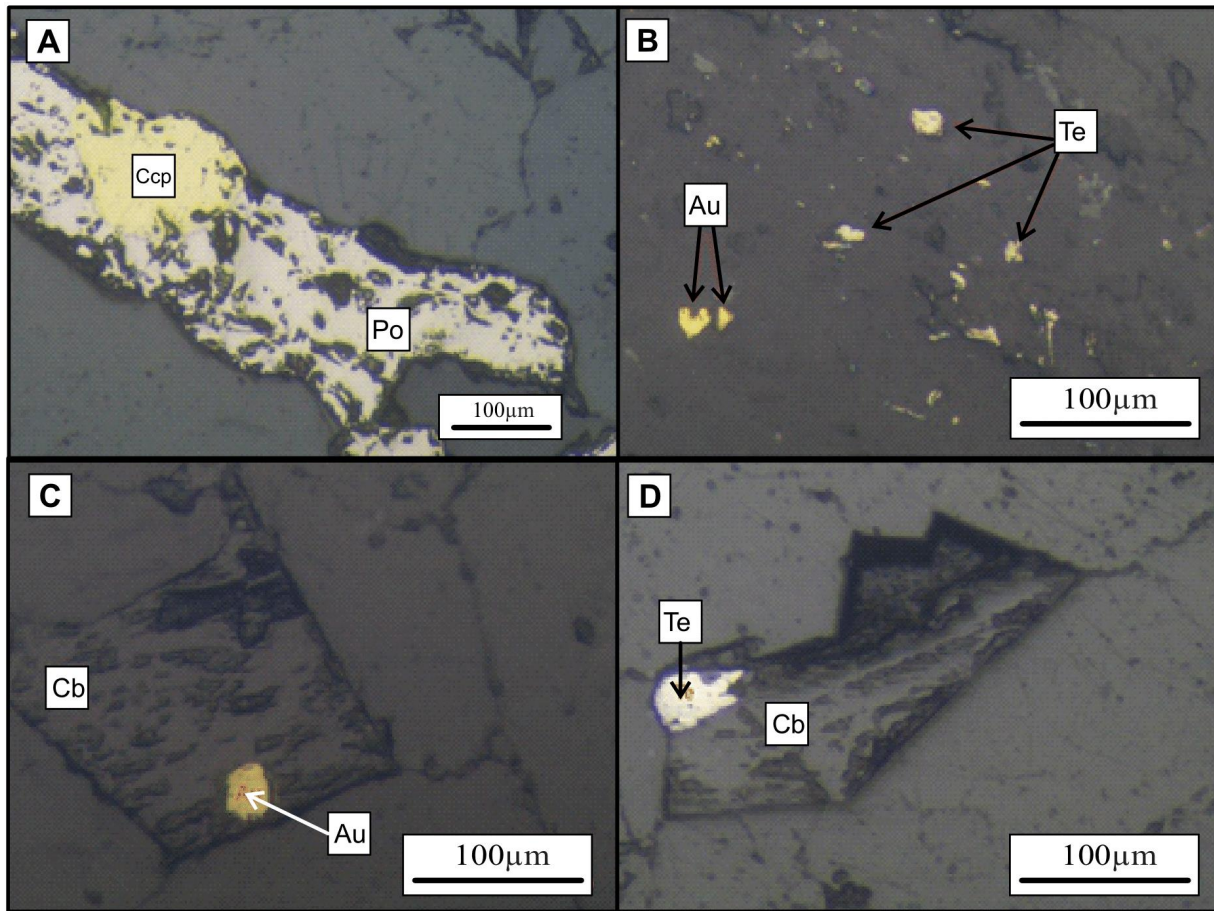


Figura 15. Microfotografías de la muestra DH-TF-006. **A.** Po asociada con Ccp. 10X-LR. **B.** Au libre teluros (Te) incluidos en cuarzo (Qz). 20X-LR. **C.** Au incluido en Cb. 20X-LR. **D.** Te asociados a Cb. 20X-LR.

La muestra DH-TF-015 (Figura 16), presenta clorita (Chl) y moscovita (Ms) de alteración, como minerales de ganga (Figura 16A). Se observa silvanita (Syl) que alberga inclusiones de Au, subrayando una relación intramineral importante (Figura 16B). Adicionalmente, se identifica Py en proceso de alteración a melnicovita (Mel), la cual está incluida en Qz (Figura 16C). El Au también se presenta incluido en arsenopirita (Apy) (Figura 16D). Adicionalmente, la Gn se presenta en asociación con Sp y Ccp (Figura 16E). Para concluir, el Au se observa en estado libre, generalmente asociado con el Qz (Figura 16F).

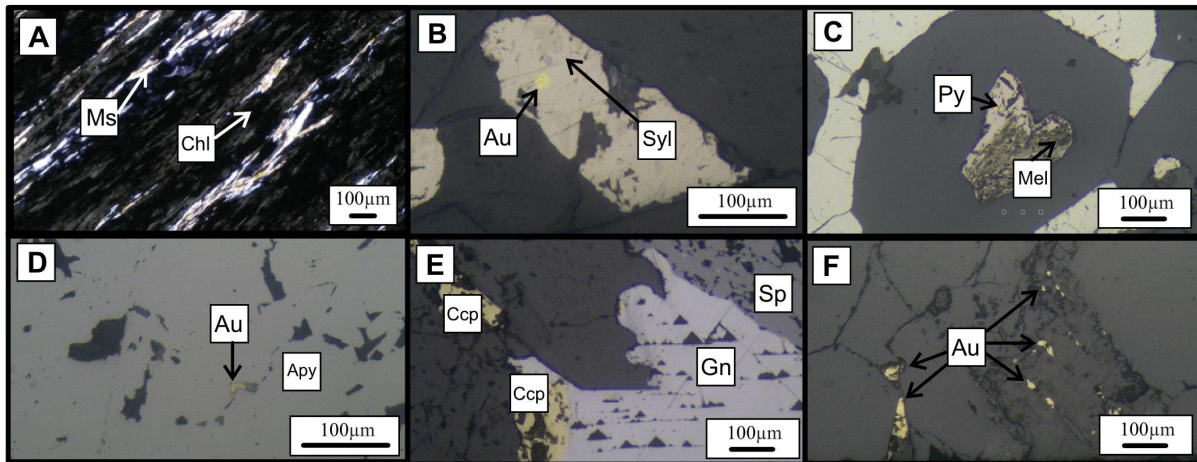


Figura 16. Microfotografías de la muestra DH-TF-015. **A.** Clorita (Chl) y moscovita (Ms). 5X-NX-LT. **B.** Silvanita (Syl) con inclusión de Au. 20X-LR. **C.** Py alterándose a melnicovita (Mel) incluida en Qz. 10X-LR. **D.** Au incluido en arsenopirita (Apy). 20X-LR **E.** Asociación Gn + Sp + Ccp. 10X-LR. **F.** Au libre incluido en Qz. 10X-LR.

5.3 Geoquímica de roca total

Para comprender las asociaciones de los elementos químicos con el oro, principalmente metales base, se realizó un tratamiento estadístico de los datos, a partir de matrices de correlación para las muestras de los siete pozos trabajados (Tabla 1, Figuras 6 a 12). Los elementos analizados fueron oro (Au), plata (Ag), cobre (Cu), manganeso (Mn), azufre (S), zinc (Zn), arsénico (As), cadmio (Cd), molibdeno (Mo) y plomo (Pb).

En el pozo DH-TF-002 (Tabla 2), es notable una marcada correlación directa entre el Cu y S, sin embargo, el Cu presenta un bajo coeficiente de correlación con la Ag. Por otra parte, el Cd y Zn muestran una correlación directa significativa, mientras que el Zn y el Pb exhiben un coeficiente de correlación bajo. Adicionalmente, el Au manifiesta bajos coeficientes de correlación tanto con Ag como con Cd, en tanto que el Cd y el Pb también exhiben una correlación débil. El Mo muestra una correlación inversa con todos los demás elementos, lo que resalta su comportamiento diferencial en comparación con los otros elementos analizados.

Tabla 2. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-002. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).

Elemento	Au	Ag	Cu	Mn	S	Zn	As	Cd	Mo	Pb
Au	1									
Ag	0,459124	1								
Cu	0,301831	0,466289	1							
Mn	0,238166	0,221832	0,448901	1						
S	0,29038	0,371404	0,769031	0,400654	1					
Zn	0,391367	0,321533	0,294505	0,431019	0,367972	1				
As	0,168269	0,200892	0,176362	0,248235	0,244555	0,327899	1			
Cd	0,411101	0,294733	0,288521	0,424982	0,360613	0,975103	0,3289	1		
Mo	-0,15409	-0,05425	-0,22287	-0,40473	-0,15051	-0,04097	0,023942	-0,05979	1	
Pb	0,347575	0,38342	0,210478	0,189876	0,323044	0,460702	0,363108	0,411706	-0,00123	1

En el pozo DH-TF-004 (Tabla 3), el Cu y S presentan una correlación directa, aunque el Cu exhibe un bajo coeficiente de correlación con la Ag, indicando una interacción limitada entre ellos. Similarmente, el Cd y el Zn presentan una correlación directa resaltante, de manera contraria con la débil correlación observada entre Zn y Pb. Se evidencia además un bajo coeficiente de correlación entre el Au y la Ag, así como con el Cd, similar a la correlación entre el Cd y el Pb, evidenciando una débil asociación entre estos dos elementos. De manera similar a las correlaciones del pozo DH-TF-002, el Mo se caracteriza por una correlación inversa con todos los elementos analizados.

Tabla 3. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-004. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).

Elemento	Au	Ag	Cu	Mn	S	Zn	As	Cd	Mo	Pb
Au	1									
Ag	0,690605	1								
Cu	0,211818	0,519746	1							
Mn	0,193751	0,395069	0,472297	1						
S	0,183519	0,4871	0,897921	0,496884	1					
Zn	0,368181	0,599955	0,58823	0,411706	0,567807	1				
As	0,215813	0,302787	0,163909	0,32937	0,299772	0,273816	1			
Cd	0,32145	0,541464	0,54659	0,368797	0,530046	0,984601	0,263845	1		
Mo	-0,06269	-0,11337	-0,14985	-0,28846	-0,10485	-0,07979	-0,08459	-0,05891	1	
Pb	0,181923	0,418022	0,348621	0,303982	0,438766	0,330392	0,378752	0,28954	-0,04905	1

En el pozo DH-TF-006 (Tabla 4), se observan que el Cu y el S presentan una marcada correlación directa, mientras que el Cu también demuestra una correlación directa con la Ag. Esto evidencia una interacción consistente entre estos elementos, sugiriendo la influencia de la mineralización asociada a los sulfuros, específicamente esfalerita y calcopirita. Además, el Zn y el Cd presentan una correlación directa, y el S continúa mostrando una correlación directa tanto con Ag como con Cu. Por otra parte, el Pb exhibe un bajo coeficiente de correlación con Ag y As, y el Mo resalta por su correlación inversa con todos los elementos analizados.

Tabla 4. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-006. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).

Elemento	Au	Ag	Cu	Mn	S	Zn	As	Cd	Mo	Pb
Au	1									
Ag	0,399311	1								
Cu	0,304291	0,612162	1							
Mn	0,193951	0,45095	0,297462	1						
S	0,299228	0,609149	0,968586	0,403809	1					
Zn	0,017759	0,220238	0,095618	0,296495	0,158374	1				
As	0,039189	0,199691	-0,04727	0,198719	0,016428	0,247021	1			
Cd	-0,01078	0,157054	0,081373	0,170538	0,131867	0,965809	0,202971	1		
Mo	-0,25698	-0,34347	-0,38951	-0,52375	-0,40999	-0,09345	-0,00615	-0,02804	1	
Pb	0,12807	0,468916	0,065088	0,276104	0,09249	0,199238	0,373237	0,15472	-0,12774	1

En el pozo DH-TF-007 (Tabla 5), se identifica una correlación directa entre Au y Ag, subrayando la presencia de estos metales preciosos en las vetas y venas mineralizadas. De manera similar, el Cu y el S muestran una marcada correlación directa, de igual forma que la correlación directa que presentan el Zn y Cd. Adicionalmente, el S evidencia una correlación directa con Ag, Au y Cu, en contraste con el Pb, el cual muestra un bajo coeficiente de correlación con As. Alineado con las observaciones previas de otros pozos, el Mo presenta una correlación inversa con todos los elementos estudiados, reafirmando su distinto comportamiento mineralógico, como se ha evidenciado en los demás pozos.

Tabla 5. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-009. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).

Elemento	Au	Ag	Cu	Mn	S	Zn	As	Cd	Mo	Pb
Au	1									
Ag	0,533966	1								
Cu	0,3907	0,452815	1							
Mn	0,038193	0,081196	0,136299	1						
S	0,421849	0,43834	0,918854	0,249923	1					
Zn	0,131348	0,213839	0,295574	0,221756	0,357864	1				
As	0,148904	0,140091	0,050688	0,189446	0,104902	0,292688	1			
Cd	0,081997	0,202264	0,256463	0,1339	0,311271	0,882409	0,2495	1		
Mo	-0,05331	-0,07764	-0,19616	-0,22316	-0,25118	-0,12316	-0,06805	-0,10033	1	
Pb	0,186437	0,209159	-0,00405	-0,08348	0,004741	0,281778	0,549038	0,337487	0,001802	1

En el pozo DH-TF-012 (Tabla 6), es evidente la correlación directa entre Au y Ag, entre Cu y S, reafirmando su concordancia en la mineralización presente. El Zn y Cd también muestran una significativa correlación directa, así como el S resalta por su correlación directa con Ag y Cu. No obstante, el Pb presenta un bajo coeficiente de correlación con Au y Ag. Siguiendo el patrón observado en los demás pozos, el Mo continúa destacando por su correlación inversa con los demás elementos analizados.

Tabla 6. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-012. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).

Elemento	Au	Ag	Cu	Mn	S	Zn	As	Cd	Mo	Pb
Au	1									
Ag	0,776919	1								
Cu	0,338036	0,491993	1							
Mn	0,018886	0,175748	0,372991	1						
S	0,447448	0,559597	0,918579	0,261286	1					
Zn	0,296805	0,392577	0,609151	0,203302	0,634785	1				
As	0,296821	0,225908	0,015143	0,108785	0,135199	0,068958	1			
Cd	0,287173	0,385098	0,601311	0,190981	0,622728	0,99405	0,05376	1		
Mo	-0,05771	-0,09488	-0,17648	-0,33688	-0,15174	-0,07114	-0,02362	-0,05783	1	
Pb	0,529273	0,540954	0,109589	0,000781	0,255007	0,231556	0,502957	0,207455	-0,01268	1

En el pozo DH-TF-015 (Tabla 7), el Au, el As y la Ag manifiestan una marcada correlación directa, similarmente, se observa una correlación directa entre Cu, Zn, Cd y S. El Zn, la Ag, el Cu y el Cd también evidencian una correlación directa, lo que resalta aún más las relaciones

interminerales complejas presentes en el pozo. Por otro lado, el Pb muestra una correlación directa específicamente con Ag, y en contraste, el Mo sigue una correlación inversa con todos los elementos, de manera similar a los demás pozos estudiados.

Tabla 7. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-015. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).

Elemento	Au	Ag	Cu	Mn	S	Zn	As	Cd	Mo	Pb
Au	1									
Ag	0,829145	1								
Cu	0,340832	0,522988	1							
Mn	0,289883	0,336823	0,310311	1						
S	0,346538	0,545757	0,957591	0,323889	1					
Zn	0,417439	0,528744	0,786034	0,270311	0,765748	1				
As	0,933461	0,760939	0,1621	0,233519	0,186048	0,222376	1			
Cd	0,468851	0,568402	0,774584	0,256432	0,75857	0,996773	0,27816	1		
Mo	-0,0695	-0,09141	-0,07255	-0,13452	-0,10442	-0,10018	-0,01798	-0,10255	1	
Pb	0,31214	0,560832	0,109413	0,0591	0,136037	0,114625	0,354566	0,14741	0,002134	1

Finalmente, para el pozo DH-TF-016 (Tabla 8), se observó que Au, Ag, Zn y Cd mantienen una correlación directa entre sí, y de forma análoga, la Ag presenta una correlación directa y significativa con Cu, Zn, Cd y Pb. Similarmente, S, Cu, Zn y Cd evidencian una correlación directa entre ellos, con Zn y Cd mostrando una marcada tendencia a esta correlación. Además, el S exhibe correlación directa con Ag, Au y Cu, mientras que el Pb se correlaciona directamente con Ag, Zn y Cd. Sin embargo, el Mo demuestra una clara correlación inversa con todos los elementos analizados.

Tabla 8. Matriz de correlación para los datos químicos del pozo DH-TF-016. Las concentraciones medidas de los elementos se encuentran en partes por millón (ppm).

Elemento	Au	Ag	Cu	Mn	S	Zn	As	Cd	Mo	Pb
Au	1									
Ag	0,743364	1								
Cu	0,522033	0,583267	1							
Mn	0,217495	0,273601	0,372751	1						
S	0,388617	0,464188	0,784459	0,435883	1					
Zn	0,652403	0,675274	0,662813	0,362344	0,639185	1				
As	0,232916	0,147648	0,13579	0,119937	0,152392	0,104429	1			
Cd	0,675046	0,634322	0,620626	0,304489	0,612239	0,985888	0,061698	1		
Mo	-0,15646	-0,14812	-0,0902	-0,40745	-0,1618	-0,17473	-0,06499	-0,14836	1	
Pb	0,420855	0,670378	0,351153	0,199681	0,341611	0,582224	0,29747	0,527808	-0,08019	1

5.3.1 Definición de umbrales para la determinación de las asociaciones químicas con el Au

Una vez realizadas las matrices de correlación para los siete pozos trabajados (Tablas 2 a 8), determinando las principales asociaciones de Au con los demás elementos, se definieron parámetros estadísticos para reducir el margen de error de la correlación química, resaltando los intervalos de mayor concentración de Au y los respectivos elementos químicamente concordantes. Los parámetros estadísticos son el *background* o mediana estadística, y el umbral que corresponde con las anomalías mayores, las cuales son calculadas a partir de la suma de la mediana y la desviación estándar calculada, como se menciona en el capítulo 4 de este documento (Materiales y métodos). Por lo tanto, el umbral 1 es la suma de la mediana y la desviación estándar y es la anomalía más baja del elemento analizado, el umbral 2 es la suma de la mediana y dos desviaciones estándar y corresponde con una anomalía mayor que la determinada en el umbral 1, y el umbral 3 es la suma de la mediana y tres desviaciones estándar, y representa la anomalía más alta.

Los elementos analizados en cada uno de los siete pozos son oro (Au), plata (Ag), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), cadmio (Cd), arsénico (As), molibdeno (Mo) y azufre (S). A continuación, se describen los parámetros estadísticos calculados, resaltando las principales anomalías a profundidades específicas.

En el pozo DH-TF-002 (Tabla 9), la Ag muestra dos correlaciones directas con el Au con concentraciones de 7,97 ppm y 8,76 ppm, halladas respectivamente en intervalos de profundidad 158 m – 159 m y 212,5 m – 213,3 m. Los demás valores sobrepasan los umbrales 1 y 2, marcados en verde y amarillo. Paralelamente, el Cu exhibe un valor anómalo superior al umbral 3 con 561,4 ppm en el intervalo de profundidad de 212,5 m – 213,3 m, mientras que las concentraciones de 68,7 ppm y 72,6 ppm, localizadas en los intervalos 144 m – 145 m y 158 m – 159 m respectivamente, no son anómalas al situarse bajo el *background*. El Pb permanece

consistentemente sobre el *background* en todas las profundidades, pero no sobrepasa el umbral 3.

Además, se observa que el Zn, el Cd y el As mantienen una relación directa con el Au en las profundidades de 210 m – 211 m y 212,5 m – 213,3 m con valores de 3660 ppm, 50,5 ppm y 654 ppm respectivamente, mientras que otros valores se sitúan bajo el umbral 2. En contraste, el Mo no presenta anomalías, permaneciendo todos sus valores bajo el *background*. El S muestra una correlación directa con el Au en la profundidad de 212,5 m – 213,3 m, presentando valores anómalos de 22700 ppm y 23000 ppm en las profundidades de 27 m – 28,8 m y 210 m – 211 m, sobrepasando el umbral 1, mientras que un solo valor de 7300 ppm en 158 m – 159 m está bajo el *background*.

Tabla 9. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-002.

Int.	Profundidad (m)	1 ppm	7,712 ppm	325,594 ppm	335,707 ppm	1470,442 ppm	18,524 ppm	302,796 ppm	10,497 ppm	34566,9 ppm
1	27-28,8	↑ Au (2,046)	↑ Ag (5,6)	↑ Cu (235,5)	↑ Pb (228,7)	↓ Zn (137)	↑ Cd (6,36)	↑ As (27)	↓ Mo (3,66)	↑ S (22700)
2	132-133	↑ Au (2,55)	↑ Ag (3,89)	↑ Cu (99,2)	↑ Pb (296,9)	↑ Zn (261)	↑ Cd (2,15)	↓ As (12)	↓ Mo (3,73)	↑ S (12900)
3	144-145	↑ Au (1,038)	↑ Ag (4,11)	↓ Cu (68,7)	↑ Pb (47,2)	↓ Zn (146)	↓ Cd (0,7)	↓ As (12)	↓ Mo (4,38)	↑ S (10300)
4	158-159	↑ Au (1,35)	↑ Ag (7,97)	↓ Cu (72,6)	↑ Pb (257,9)	↑ Zn (717)	↑ Cd (7,5)	↑ As (144)	↓ Mo (1,44)	↓ S (7300)
5	197-198	↑ Au (1,54)	↑ Ag (6,88)	↑ Cu (102)	↑ Pb (230,8)	↑ Zn (521)	↑ Cd (5,99)	↑ As (47)	↓ Mo (2,98)	↑ S (12300)
6	210-211	↑ Au (2,297)	↑ Ag (5,98)	↑ Cu (188)	↑ Pb (105,5)	↑ Zn (3660)	↑ Cd (50,5)	↑ As (58)	↓ Mo (2,9)	↑ S (23000)
7	212,5-213,3	↑ Au (0,918)	↑ Ag (8,76)	↑ Cu (561,4)	↑ Pb (230,4)	↑ Zn (991)	↑ Cd (11)	↑ As (654)	↓ Mo (1,39)	↑ S (50000)
NEGRO	<i>Background</i>	0,053	0,92	97,65	39,8	211	1,085	18	4,695	11650
VERDE	Umbral 1	0,333604253	3,184243329	173,6313345	138,4359956	630,8140126	6,898142378	112,9321239	6,629062783	19288,97154
AMARILLO	Umbral 2	0,614208506	5,448486658	249,6126689	237,0719912	1050,628025	12,71128476	207,8642479	8,563125565	26927,94308
ROJO	Umbral 3	0,894812759	7,712729987	325,5940034	335,7079868	1470,442038	18,52442713	302,7963718	10,49718835	34566,91462

Color azul: valores por debajo del *background*

En el pozo DH-TF-004 (Tabla 10), la Ag presenta valores consistentes por encima del *background*, resaltando dos anomalías fuertes de 41,50 ppm y 18,80 ppm en las profundidades 199,5 m – 200 m y 202 m – 203,3 m respectivamente, ambos superando el umbral 3.

Adicionalmente, el Cu muestra una anomalía de 416 ppm en la profundidad 199,5 m – 200 m, sobrepasando también el umbral 3, y otros valores como 276 ppm y 241 ppm en las profundidades 202 m – 203,3 m y 201 m – 202 m, exceden los umbrales 1 y 2 respectivamente. El Pb, el Zn, y el Cd siguen un patrón similar, presentando anomalías que superan el umbral 3 en la profundidad 199,5 m – 200 m, con concentraciones de 325 ppm, 5370 ppm y 58 ppm, respectivamente. Además, el As presenta dos anomalías en las profundidades 199,5 m – 200 m y 155 m – 156 m, con valores de 192 ppm y 404 ppm, ambos superando el umbral 3, mientras que un valor de 61 ppm en la profundidad 191 m – 192 m excede el umbral 1. Por otra parte, el Mo exhibe anomalías moderadas por encima del *background* en diversas profundidades. Finalmente, el S muestra una alta concentración de 40900 ppm en la profundidad 199,5 m – 200 m, superando el umbral 3, junto con otros valores que rebasan diferentes umbrales en varias profundidades. Todos estos elementos, Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As y S, demuestran una relación directa con el Au en la profundidad 199,5 m – 200 m, subrayando la relevancia de este intervalo de profundidad en la evaluación de anomalías geoquímicas.

Tabla 10. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-004.

Int.	Profundidad (m)	8,165 ppm	11,442 ppm	326,715 ppm	284,159 ppm	2150,35 ppm	25,411 ppm	150,303 ppm	8,35 ppm	36854,86 ppm
1	155-156	↑ Au (4,52)	↑ Ag (2,70)	↑ Cu (125)	↑ Pb (178)	↑ Zn (488)	↑ Cd (4,50)	↑ As (404)	↑ Mo (3)	↑ S (28000)
2	188,5-189	↑ Au (6,64)	↑ Ag (10,90)	↑ Cu (54)	↑ Pb (67)	↑ Zn (314)	↑ Cd (2,80)	↑ As (25)	↑ Mo (4)	↓ S (7000)
3	191-192	↑ Au (3,58)	↑ Ag (6,40)	↑ Cu (138)	↑ Pb (30)	↑ Zn (592)	↑ Cd (4,10)	↑ As (61)	↓ Mo (1)	↑ S (15100)
4	199-199,5	↑ Au (28,10)	↑ Ag (10,90)	↑ Cu (111)	↑ Pb (45)	↑ Zn (331)	↑ Cd (2,70)	↑ As (18)	↑ Mo (2)	↑ S (11700)
5	199,5-200	↑ Au (36,60)	↑ Ag (41,50)	↑ Cu (416)	↑ Pb (325)	↑ Zn (5370)	↑ Cd (58)	↑ As (192)	↓ Mo (1)	↑ S (40900)
6	201-202	↑ Au (4,65)	↑ Ag (3,60)	↑ Cu (241)	↓ Pb (24)	↑ Zn (603)	↑ Cd (6,30)	↓ As (8)	↓ Mo (1)	↑ S (23400)
7	202-203,3	↑ Au (4,83)	↑ Ag (18,80)	↑ Cu (276)	↑ Pb (211)	↑ Zn (585)	↑ Cd (5,50)	↑ As (43)	↓ Mo (1)	↑ S (28600)
NEGRO	<i>Background</i>	0,062	1	99	29	191	0,9	15	2	11700
VERDE	Umbral1	2.76301921	4.480811073	174.9053201	114.053022	844.1175633	9.070550679	60.10132921	4.117137029	20084.95634
AMARILLO	Umbral2	5.464038421	7.961622147	250.8106402	199.1060439	1497.235127	17.24110136	105.2026584	6.234274057	28469.91269
ROJO	Umbral3	8.165057631	11.44243322	326.7159604	284.1590659	2150.35269	25.41165204	150.3039876	8.351411086	36854.86903

Color azul: valores por debajo del *background*

En el pozo DH-TF-006 (Tabla 11), la Ag muestra una correlación directa con el Au a la profundidad 140 m – 141 m con un valor de 8,9 ppm, mientras que a la profundidad 143m – 144m exhibe una anomalía de 7,1 ppm, superando el umbral 2. A excepción de la profundidad 233 m – 234 m, donde el valor de 1,1 ppm no es anómalo, en las demás profundidades los valores están por encima del *background*. El Cu, con concentraciones de 88 ppm y 98 ppm en las profundidades 10,5 m – 12 m y 200 m – 201 m respectivamente, no presenta anomalías, manteniéndose por debajo del *background*, a diferencia de otras profundidades donde los valores superan dicho *background*. El Pb muestra un valor anómalo de 60 ppm en la profundidad 10,5 m – 12 m, superando el umbral 1, y otros tres valores en las profundidades 140 m – 141 m, 143 m – 144 m y 200 m – 201 m están por encima del *background*. Tanto el Zn como el Cd muestran dos valores anómalos por encima del *background* en las profundidades 10,5 m – 12 m y 200 m – 201 m. El As resalta con cuatro valores por encima del *background* en distintas profundidades, mientras que el Mo a 200 m – 201 m excede el umbral 2 con un valor de 5 ppm. Finalmente, el S exhibe dos anomalías significativas en las profundidades 233 m – 234 m y 257 m – 259 m, superando el *background* con valores de

20800 ppm y 27300 ppm respectivamente, además de tres anomalías por encima del umbral 1 en otras profundidades específicas.

Tabla 11. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-006.

Int.	Profundidad (m)	1,23 ppm	7,92 ppm	789,97 ppm	129,51 ppm	772,10 ppm	7,03 ppm	261,25 ppm	6,50 ppm	66544,26 ppm
1	10,5-12	↑ Au (1,245)	↑ Ag (3,1)	↓ Cu (88)	↑ Pb (60)	↑ Zn (288)	↑ Cd (0,7)	↑ As (23)	↓ Mo (1)	↓ S (300)
2	140-141	↑ Au (1,885)	↑ Ag (8,9)	↑ Cu (533)	↑ Pb (18)	↓ Zn (93)	↓ Cd (0,5)	↓ As (6)	↓ Mo (1)	↑ S (45200)
3	143-144	↑ Au (1,015)	↑ Ag (7,1)	↑ Cu (488)	↑ Pb (23)	↓ Zn (101)	↓ Cd (0,5)	↓ As (8)	↓ Mo (1)	↑ S (43300)
4	200-201	↑ Au (1,065)	↑ Ag (2,9)	↓ Cu (98)	↑ Pb (29)	↑ Zn (267)	↑ Cd (2)	↑ As (17)	↑ Mo (5)	↓ S (10500)
5	232-233	↑ Au (4,66)	↑ Ag (3,1)	↑ Cu (343)	↓ Pb (11)	↓ Zn (147)	↓ Cd (0,5)	↑ As (12)	↓ Mo (1)	↑ S (34100)
6	233-234	↑ Au (1,645)	↓ Ag (1,1)	↑ Cu (244)	↓ Pb (10)	↓ Zn (122)	↓ Cd (0,5)	↓ As (8)	↓ Mo (1)	↑ S (20800)
7	257-259	↑ Au (2,7)	↑ Ag (1,6)	↑ Cu (340)	↓ Pb (6)	↓ Zn (108)	↓ Cd (0,5)	↑ As (20)	↓ Mo (1)	↑ S (27300)
NEGRO	<i>Background</i>	0,113	1,4	163	12	166	0,6	12	2	17300
VERDE	Umbral1	0,486596984	3,574237078	371,9903263	51,17214012	368,036651	2,74427148	95,08584192	3,501555677	33714,75616
AMARILLO	Umbral2	0,860193969	5,748474157	580,9806526	90,34428025	570,073302	4,88854296	178,1716838	5,003111355	50129,51231
ROJO	Umbral3	1,233790953	7,922711235	789,9709788	129,5164204	772,109953	7,03281444	261,2575258	6,504667032	66544,26847

Color azul: valores por debajo del *background*

En el pozo DH-TF-009 (Tabla 12), la Ag muestra una correlación directa con el Au, registrando valores de 8,63 ppm, 2,8 ppm, 3,24 ppm y 11,8 ppm en las profundidades de 63,9 m – 64,5 m, 67,21 m – 67,78 m, 80,5 m – 81 m y 242 m – 242,5 m respectivamente. También se presentan valores anómalos en la profundidad de 68,45 m – 69 m con 11,5 ppm, y en la profundidad de 87 m – 87,5 m con 6,3 ppm, superando los umbrales 2 y 1 respectivamente, y un valor de 4,1 ppm por encima del *background* en la profundidad de 273 m – 274 m. De manera similar, el Cu muestra una relación directa con el Au en las profundidades de 67,21 m – 67,78 m y 68,45 m – 69 m, con valores de 1290 ppm y 2180 ppm, y presenta valores anómalos en 63,9 m – 64,5 m y 242 m – 242,5 m con 653 ppm y 594 ppm, superando el umbral 2. Adicionalmente, los elementos Pb, Zn, Cd, As, Mo, y S presentan comportamientos particulares en sus concentraciones y anomalías a distintas profundidades, demostrando relaciones directas y valores que superan los umbrales

establecidos y el *background*, como el Cd que muestra una relación directa con el Au en 80,5 m – 81 m con 20,07 ppm y un valor anómalo en 242 m – 242,5 m con 9,11 ppm.

Tabla 12. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-009.

Int.	Profundidad (m)	1,99 ppm	11,638 ppm	748,448 ppm	500,98 ppm	1312,21 ppm	17,55 ppm	658,27 ppm	7,09 ppm	58471,33 ppm
1	63,9-64,5	↑ Au (8,63)	↑ Ag (17,6)	↑ Cu (653)	↑ Pb (26)	↑ Zn (266)	↑ Cd (2)	↓ As (5)	↓ Mo (1)	↑ S (57000)
2	67,21-67,78	↑ Au (2,8)	↑ Ag (17,7)	↑ Cu (1290)	↑ Pb (62)	↓ Zn (183)	↓ Cd (1,2)	↑ As (617)	↓ Mo (1)	↑ S (100000)
3	68,45-69	↑ Au (1,73)	↑ Ag (11,5)	↑ Cu (2180)	↓ Pb (2)	↑ Zn (319)	↑ Cd (2,4)	↓ As (14)	↓ Mo (1)	↑ S (100000)
4	80,5-81	↑ Au (3,24)	↑ Ag (13,4)	↑ Cu (203)	↑ Pb (1260)	↑ Zn (1890)	↑ Cd (20,7)	↑ As (379)	↑ Mo (5)	↑ S (20600)
5	87-87,5	↑ Au (2,34)	↑ Ag (6,3)	↑ Cu (485)	↑ Pb (14)	↑ Zn (203)	↓ Cd (0,9)	↑ As (42)	↑ Mo (2)	↑ S (49400)
6	242-242,5	↑ Au (1,575)	↑ Ag (11,8)	↑ Cu (594)	↑ Pb (72)	↑ Zn (811)	↑ Cd (9,1)	↑ As (20)	↓ Mo (1)	↑ S (54100)
7	273-274	↑ Au (1,535)	↑ Ag (4,1)	↑ Cu (231)	↑ Pb (10)	↑ Zn (247)	↓ Cd (0,5)	↑ As (366)	↑ Mo (2)	↑ S (29600)
NEGRO	<i>Background</i>	0,097	1,2	132	8	203	1,3	20	2	13900
VERDE	Umbral1	0,729753035	4,679558179	337,4827992	172,3297361	572,7379021	6,717658889	232,7580446	3,698867501	28757,1133
AMARILLO	Umbral2	1,362506069	8,159116357	542,9655984	336,6594723	942,4758041	12,13531778	445,5160893	5,397735003	43614,22661
ROJO	Umbral3	1,995259104	11,63867454	748,4483976	500,9892084	1312,213706	17,55297667	658,2741339	7,096602504	58471,33991

Color azul: valores por debajo del *background*

En el pozo DH-TF-012 (Tabla 13), se observa que la Ag mantiene una relación directa con el Au, evidenciada por valores de 14,9 ppm, 23,9 ppm y 21,8 ppm en las profundidades 36,15 m – 36,6 m, 79 m – 79,5 m y 79,5 m – 80,5 m respectivamente, a pesar de la presencia de un valor anómalo de 6,8 ppm que supera el umbral 2. De manera similar, el Cu exhibe una correlación directa con el Au a una profundidad de 36,15 m – 36,6 m con 1030 ppm, aunque otros valores, 412 ppm, 178 ppm y 167 ppm en profundidades específicas, se destacan como anómalos, sobrepasando el *background* y el umbral 2 en un caso. El Pb y el Zn también demuestran relaciones directas con el Au en profundidades determinadas con valores específicos y presentan otros valores que exceden el *background*. El Cd y el As resaltan por sus valores anómalos por encima de los umbrales 3 y 2 respectivamente en diversas profundidades, mientras que el Mo, aunque presenta un valor sobre el Umbral 1, mantiene dos valores bajo el *background*, sin presentar anomalías. Por último, el S manifiesta dos valores significativos por encima del umbral 3 en las profundidades

34,5 m – 35 m y 36,15 m – 36,6 m, con 54300 ppm y 100000 ppm respectivamente, además de un valor sobre el umbral 1 y otro que excede el *background*.

Tabla 13. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-0012.

Int.	Profundidad (m)	1, 04 ppm	8,77 ppm	443,98 ppm	442,579 ppm	9337,66 ppm	112,298 ppm	413,68 ppm	7,30 ppm	44007,02 ppm
1	34,5-35	↑ Au (1,705)	↑ Ag (6,8)	↑ Cu (412)	↑ Pb (36)	↑ Zn (18700)	↑ Cd (230)	↓ As (11)	↑ Mo (4)	↑ S(54300)
2	36,15-36,6	↑ Au (1,26)	↑ Ag (14,9)	↑ Cu (1030)	↑ Pb (472)	↑ Zn (45600)	↑ Cd (578)	↑ As (94)	↓ Mo (1)	↑ S(100000)
3	79-79,5	↑ Au (4,85)	↑ Ag (23,9)	↑ Cu (178)	↑ Pb (661)	↑ Zn (976)	↓ Cd (6,9)	↑ As (376)	↓ Mo (2)	↑ S(28600)
4	79,5-80,5	↑ Au (1,79)	↑ Ag (21,8)	↑ Cu (167)	↑ Pb (1780)	↑ Zn (2520)	↑ Cd (21)	↑ As (428)	↑ Mo (3)	↑ S(23800)
NEGRO	<i>Background</i>	0,12660659	1,550507614	138,7538071	32,21319797	814,9619289	8,477411168	41,0786802	2,289340102	14033,50254
VERDE	Umbral1	0,433210669	3,957634912	240,4966491	169,0019608	3655,861425	43,08434942	165,2811391	3,960084651	24024,67648
AMARILLO	Umbral2	0,73981474	6,36476221	342,2394911	305,7907236	6496,76092	77,69128768	289,483598	5,630829201	34015,85041
ROJO	Umbral3	1,04641881	8,771889508	443,9823332	442,5794864	9337,660416	112,2982259	413,6860568	7,30157375	44007,02435

Color azul: valores por debajo del *background*

En el pozo DH-TF-015 (Tabla 14), el Au muestra una notable anomalía con un valor de 5,65 ppm en la profundidad 71,5 m – 72 m, superando el umbral 3, junto con tres valores adicionales que se encuentran por encima de los umbrales en las profundidades especificadas. La Ag exhibe dos valores significativamente altos, 23,5 ppm y 8,1 ppm en las profundidades 71,5 m – 72 m y 182,13 m – 183 m respectivamente, ambos sobrepasando el umbral 3, mientras que otros dos valores se sitúan por encima del umbral 2 en diferentes profundidades. De manera similar, el Cu presenta dos valores anómalos de 498 ppm y 841 ppm en las profundidades 72 m – 72,9 m y 182,13 m – 183 m respectivamente, sobrepasando el umbral 3, y un valor adicional por encima del umbral 2 en la profundidad 71,5 m – 72 m. El Pb y el Zn también muestran valores que exceden tanto el umbral 3 como el *background* en las profundidades especificadas. El Cd y el As, por su parte, destacan con valores considerablemente altos, superando el umbral 3 en las profundidades 71,5 m – 72 m y 182,13 m – 183 m, y el umbral 1 en la profundidad 235,5 m – 236,5 m. A pesar de estos hallazgos, el Mo no presenta anomalías, manteniendo todos sus valores por debajo del

background. En contraste, el S manifiesta valores muy altos, con 54900 ppm y 85000 ppm en las profundidades 72 m – 72,9 m y 182,13 m – 183 m respectivamente, superando considerablemente el umbral 3, y otros dos valores anómalos en las profundidades adicionales, sobrepasando tanto el umbral 2 como el *background*.

Tabla 14. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-0015.

Int.	Profundidad (m)	1,14 ppm	6,65 ppm	457,31 ppm	289,91 ppm	2646,47 ppm	28,31 ppm	442,781 ppm	6,409 ppm	47392,15 ppm
1	71,5-72	↑ Au (5,65)	↑ Ag (23,5)	↑ Cu (389)	↑ Pb (466)	↑ Zn (3090)	↑ Cd (41,3)	↑ As (2340)	↓ Mo (2)	↑ S (40100)
2	72-72,9	↑ Au (0,862)	↑ Ag (5,1)	↑ Cu (498)	↑ Pb (95)	↑ Zn (796)	↑ Cd (8,6)	↑ As (162)	↓ Mo (2)	↑ S (54900)
3	182,13-183	↑ Au (0,911)	↑ Ag (8,1)	↑ Cu (841)	↓ Pb (8)	↑ Zn (7690)	↑ Cd (82,2)	↑ As (43)	↓ Mo (1)	↑ S (85000)
4	235,5-236,5	↑ Au (0,925)	↑ Ag (4,5)	↓ Cu (105)	↓ Pb (14)	↑ Zn (1830)	↑ Cd (19,8)	↑ As (41)	↓ Mo (1)	↑ S (17100)
NEGRO	<i>Background</i>	0,101528136	1,106101695	114,9084746	18,70508475	360,1830508	3,226779661	26,66101695	2,315254237	13508,13559
VERDE	Umbral1	0,448014464	2,956298427	229,0423399	109,1077618	1122,281769	11,5884997	165,3679966	3,680121174	24802,80661
AMARILLO	Umbral2	0,794500793	4,80649516	343,1762052	199,5104389	1884,380487	19,95021974	304,0749762	5,044988111	36097,47763
ROJO	Umbral3	1,140987122	6,656691892	457,3100705	289,913116	2646,479205	28,31193978	442,7819558	6,409855047	47392,14865

Color azul: valores por debajo del *background*

Finalmente, en el pozo DH-TF-016 (Tabla 15), la Ag muestra una correlación directa con el Au en las profundidades 22,5 m – 25 m, 155 m – 156 m y 162,50 m – 163,70 m, con valores de 20,9 ppm, 20,7 ppm y 11,3 ppm respectivamente, observándose un valor por encima del umbral 2. Por otro lado, el Cu manifiesta valores de 538 ppm y 576 ppm en las profundidades 155 m – 156 m y 162 m – 162,50 m respectivamente, superando el umbral 3, y un valor de 260 ppm en la profundidad 10,5 m – 12 m que excede el umbral 1, además de otro valor por encima del *background* pero bajo el umbral 1 en la profundidad 162,50 m – 163,70 m. El Pb, con un valor de 1580 ppm en la profundidad 155 m – 156 m, también sobrepasa el umbral 3, mientras que los demás valores, aunque están por encima del *background*, no alcanzan el umbral 1. Se observa un comportamiento similar en el Zn y el Cd, presentando ambos valores por encima del umbral 3 en las profundidades 155 m – 156 m y 162 m – 162,50 m, con concentraciones de 4810 ppm, 5550

ppm, 59,6 ppm y 83,3 ppm respectivamente. Además, ambos elementos muestran valores por debajo del *background* y del umbral 1 en las profundidades 22,5 m – 25 m y 162,50 m – 163,70 m. En cuanto al As, se encuentran tres valores por encima del *background* en las profundidades 22,5 m – 25m, 155 m – 156 m y 162,50 m – 163,70 m, mientras que el Mo manifiesta dos anomalías por encima de dicho *background*. Finalmente, el S revela dos valores de 53800 ppm y 57300 ppm en las profundidades 155 m – 156 m y 162 m – 162,50 m, excediendo el umbral 3, y un valor adicional en la profundidad 162,50 m – 163,70 m por encima del *background*.

Tabla 15. Parámetros estadísticos calculados para el pozo DH-TF-0016.

Int.	Profundidad (m)	1 ppm	9,44 ppm	385,729 ppm	542,667 ppm	2105,41 ppm	26,26 ppm	967,49 ppm	7,16 ppm	47392,14 ppm
1	22,50-25	↑ Au (2,02)	↑ Ag (20,9)	↑ Cu (260)	↑ Pb (195)	↓ Zn (102)	↓ Cd (0,5)	↑ As (96)	↑ Mo (2)	↓ S(800)
2	155-156	↑ Au (1,32)	↑ Ag (20,7)	↑ Cu (538)	↑ Pb (1580)	↑ Zn (4810)	↑ Cd (59,6)	↑ As (23)	↓ Mo (1)	↑ S(53800)
3	162-162,50	↑ Au (2,34)	↑ Ag (8,5)	↑ Cu (576)	↑ Pb (131)	↑ Zn (5550)	↑ Cd (83,3)	↓ As (17)	↓ Mo (1)	↑ S(57300)
4	162,50-163,70	↑ Au (1,695)	↑ Ag (11,3)	↑ Cu (128)	↑ Pb (207)	↑ Zn (647)	↑ Cd (7,3)	↑ As (34)	↑ Mo (2)	↑ S(13800)
NEGRO	Background	0,054	0,9	103	42	184	1,2	21	2	13508,13559
VERDE	Umbral1	0,391247204	4,300310971	215,4600753	231,5140455	941,7092064	10,96290962	362,0448358	3,945545527	24802,80661
AMARILLO	Umbral2	0,648145388	6,875131746	300,5946603	387,0908361	1523,563511	18,61405454	664,768103	5,553836152	36097,47763
ROJO	Umbral3	0,905043571	9,449952521	385,7292454	542,6676268	2105,417815	26,26519945	967,4913702	7,162126777	47392,14865

Color azul: valores por debajo del *background*

5.3.2 Correlación geoquímica entre los pozos de perforación.

Con el *background* y los umbrales (1, 2 y 3) definidos para los elementos oro (Au), plata (Ag), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), cadmio (Cd), arsénico (As), molibdeno (Mo) y azufre (S) en cada uno de los pozos trabajados, se representaron estos valores en las columnas estratigráficas (Figuras 7 a 12) presentadas en el numeral 5.1 del presente capítulo de resultados (Descripción litológica a partir de fotologeo y descripción en campo de núcleos de perforación). En las columnas representadas, se observan directamente las correlaciones del Au con los demás elementos, sin embargo, no se muestra una relación directa entre la quimioestratigrafía y la litoestratigrafía de la roca encajante (Figuras 17 a 23).

En las columnas estratigráficas de cada pozo que se presentan a continuación (Figuras 17 a 23), el espectro de colores representa las concentraciones de Au, donde el color azul corresponde con los valores más bajos y el color magenta los valores más altos, siendo los colores verde, amarillo y rojo aquellos que significan valores intermedios, en orden ascendente respectivamente. Las convenciones de la litología se pueden consultar en las figuras 7 a 12 (columnas estratigráficas de los pozos DH-TF-002, DH-TF-004, DH-TF-006, DH-TF-009, DH-TF-012, DH-TF-015 y DH-TF-016).

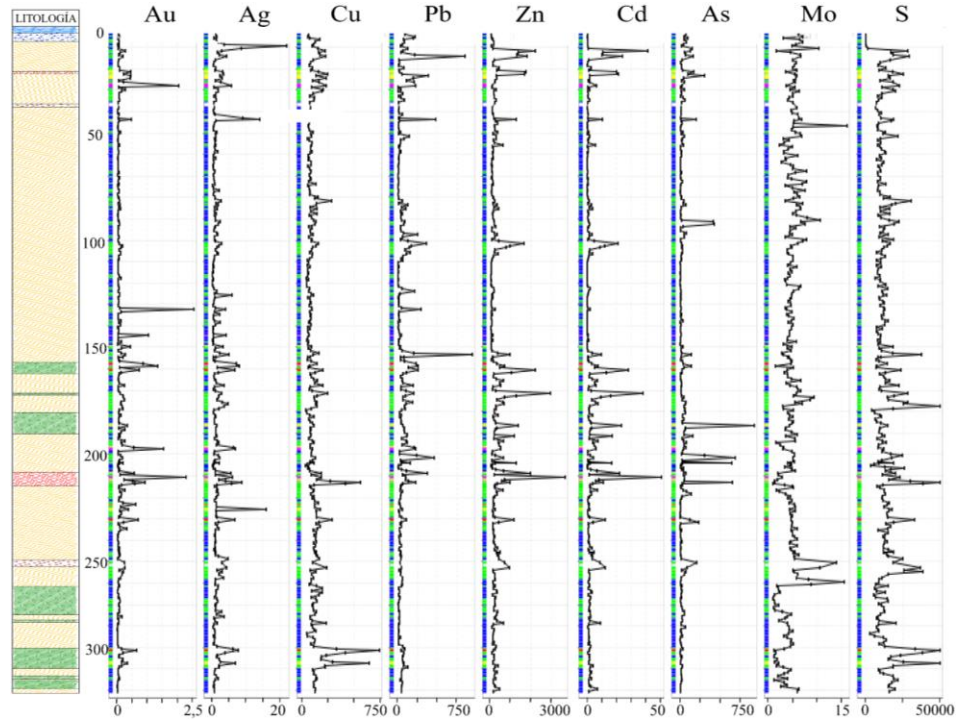


Figura 17. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-002.

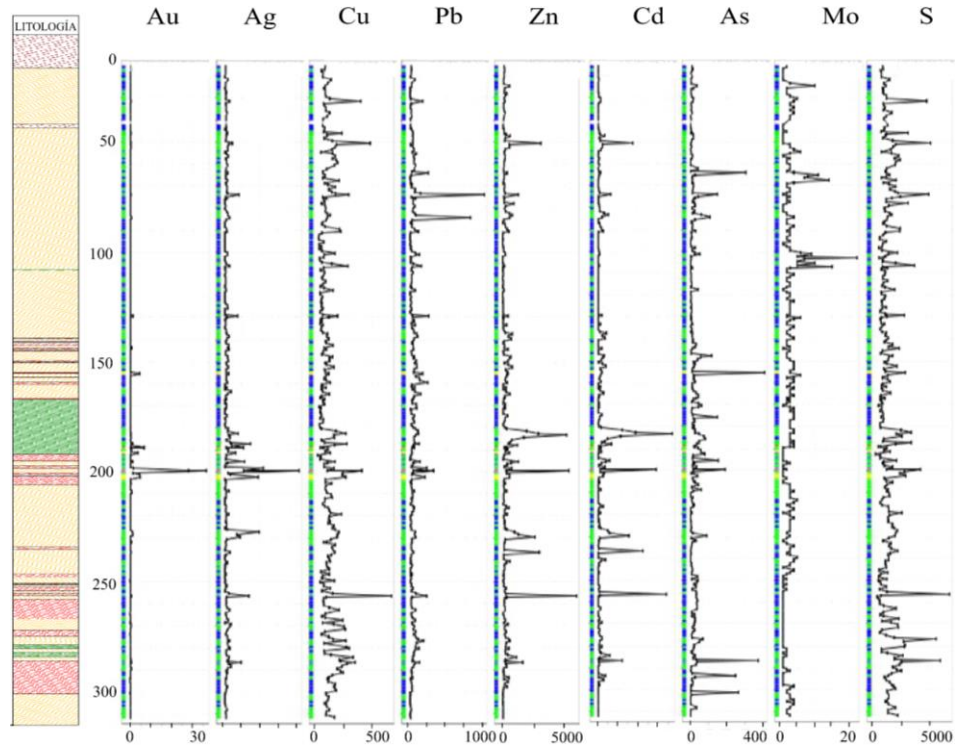


Figura 18. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-004.

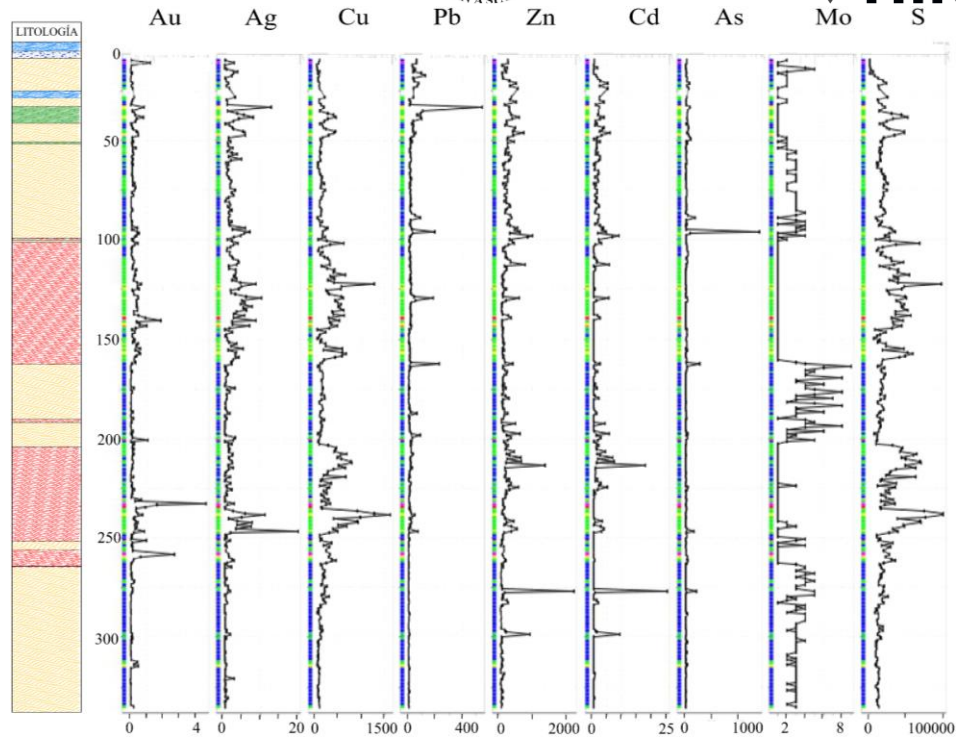


Figura 19. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-006.

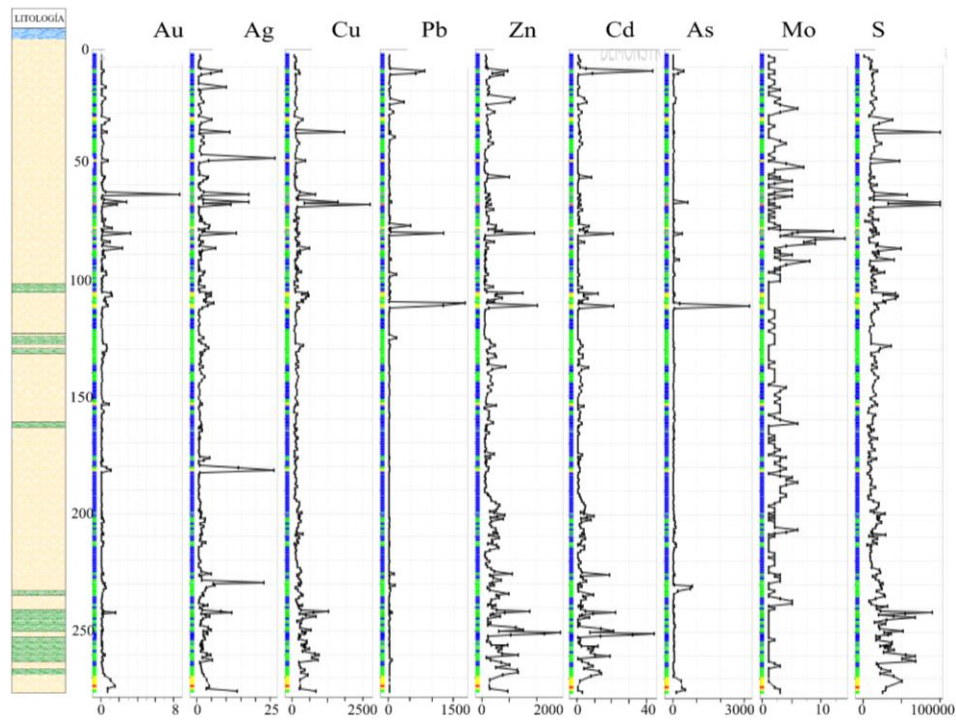


Figura 20. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-009.

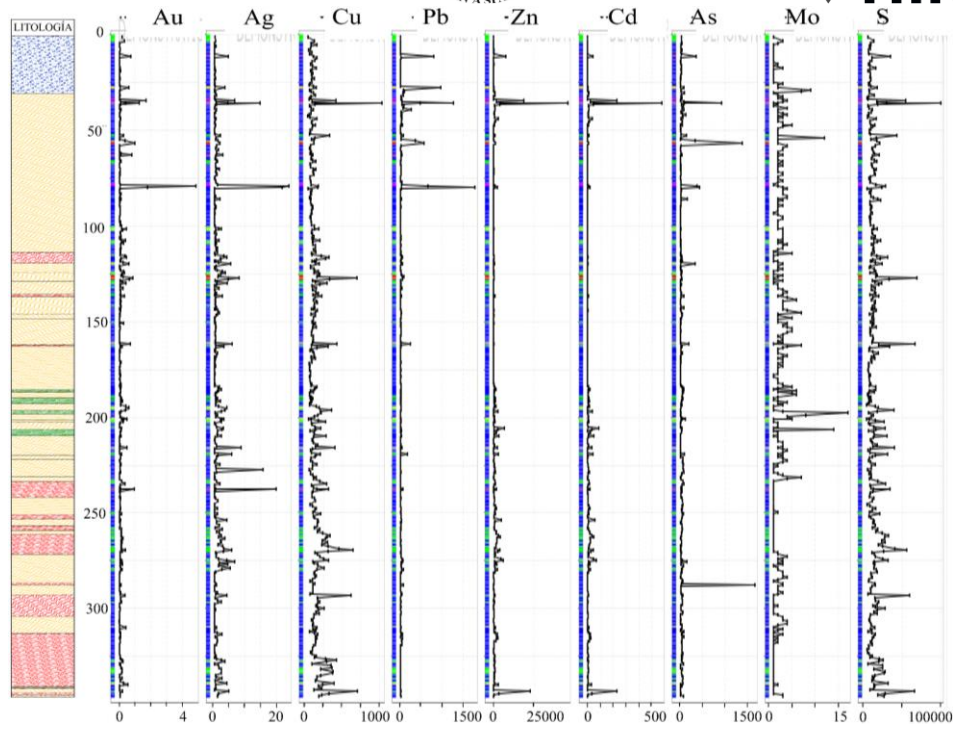


Figura 21. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-012.

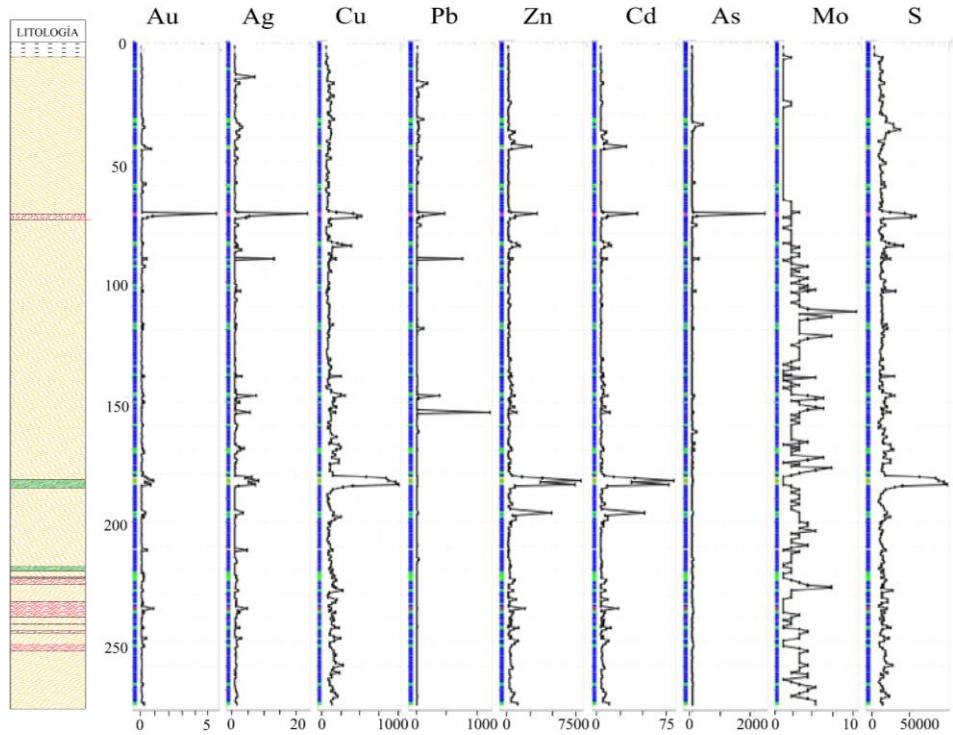


Figura 22. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-015.

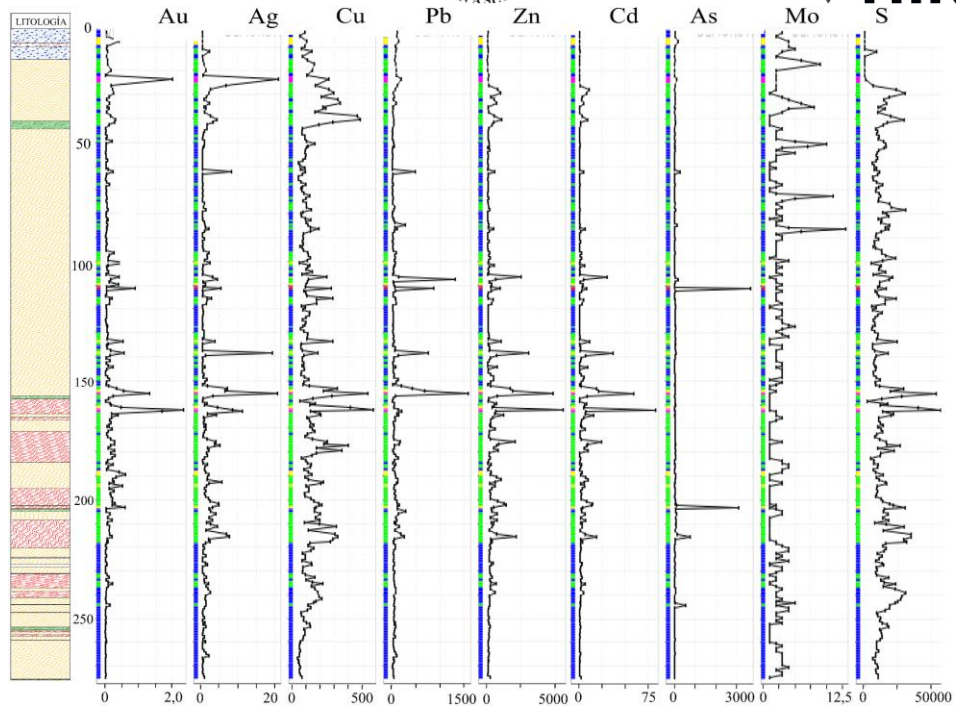


Figura 23. Correlación geoquímica entre Au y Ag, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Mo y S para el pozo DH-TF-016.

6.1 **Controles estratigráficos y estructurales en el emplazamiento de los fluidos mineralizantes**

La información litoestratigráfica y geoquímica adquirida y analizada en esta investigación, fue interpretada con base en la generación de cortes geológicos, los cuales están distribuidos en toda el área del depósito de norte a sur (secciones norte, centro y sur), abarcando la zona de estudio (para la localización de los perfiles geológicos, ver Figura 5).

En la sección norte (Figura 24) se distinguen tres grupos litológicos vinculados con rocas metamórficas pertenecientes al Complejo Cajamarca (*sensu* Maya & González, 1995), cuya correlación litoestratigráfica sugiere una evidente deformación dúctil de todas las litologías presentes. Predominan los esquistos grafitosos (MSG), con intercalaciones de esquistos cloríticos (MSC) y, de manera subordinada, esquistos cuarzo-sericíticos (MSS). Se evidencia una asociación química dominante correspondiente a Au + Ag, estrechamente relacionada con los esquistos cloríticos. Además, se observa un nivel con asociación de Au + Ag + Cu + Pb + Zn + Cd asociado posiblemente con cambios litológicos o con los contactos entre los esquistos grafitosos y los esquistos cloríticos. En el pozo DH-TF-006, el dominio principal de estilo de mineralización es VTS, caracterizado por estructuras de espesor entre 0,1 cm y 1 cm, mientras que es menor la presencia de fracturamiento y estilo VNA, este último referente a venas de 1 cm - 10 cm de espesor. Este conjunto representa los valores óptimos de oro para el mencionado pozo. Por otro lado, en el pozo DH-TF-016 prevalece el estilo VNA, con presencia en menor grado por VTS y FRC, este último correspondiente a fracturas que interrumpen la foliación con espesores menores a 1 cm, representando estos datos los estilos mineralizantes para los valores más altos de Au.

En la sección centro (Figura 25) predominan los esquistos grafitosos (MSG), con intercalaciones de esquistos cuarzo sericíticos (MSS) y en menor proporción esquistos cloríticos (MSC), con deformación principalmente dúctil. Los niveles de MSS corresponden a las rocas más profundas interceptadas por los sondajes. Se destaca una asociación química polimetálica dominante, presente en ambos pozos y asociada a las zonas de cambio entre los esquistos cuarzo-sericíticos y cloríticos. No se reconoció otra asociación química representativa en esta sección. En el pozo DH-TF-004, el dominio principal de estilo de mineralización es VTS, consistente en estructuras de 0,1 cm – 1 cm de espesor, mientras que en menor medida se identifica el estilo VNA, correspondiente a venas de 1 cm - 10 cm de espesor, representando estos estilos los valores más favorables de oro para este pozo. Para el pozo DH-TF-009, los estilos de mineralización son variados, presentándose de manera similar los VTS, VNA y VEN. Puntualmente se observa un rango con un estilo mineralizante DSM (diseminado), integrando estos los valores más altos de Au para este pozo.

En la sección sur (Figura 26) se identifican litológicamente tres unidades metamórficas, predominando los esquistos grafitosos (MSG) con intercalaciones de esquistos cuarzo-sericíticos (MSS) y esquistos cloríticos (MSC). Estos litotipos presentan diques, cortando principalmente las unidades MSC y MSG. Se presenta una asociación química conformada por Au+Ag+Pb+Zn, que corresponde una asociación química secundaria polimetálica, vinculada a las zonas de transición entre los tres tipos de esquistos. En el contexto de la mineralización, el dominio principal es VNA, correspondiente a venas de 1 cm – 10 cm de espesor. Se identifica, en menor proporción, el estilo VTS, asociado a estructuras de 0,1 cm – 1 cm de espesor, en conjunto representando los valores más altos de oro para el pozo DH-TF-002. Para el pozo DH-TF-012, domina el estilo VNA, y se presenta subordinado el estilo VGS relacionado con estructuras *vugs*. En el pozo DH-TF-015, se

presentan los estilos VTS, VNA y FTL en proporciones similares, representando los valores más altos de Au para esta localización específica.

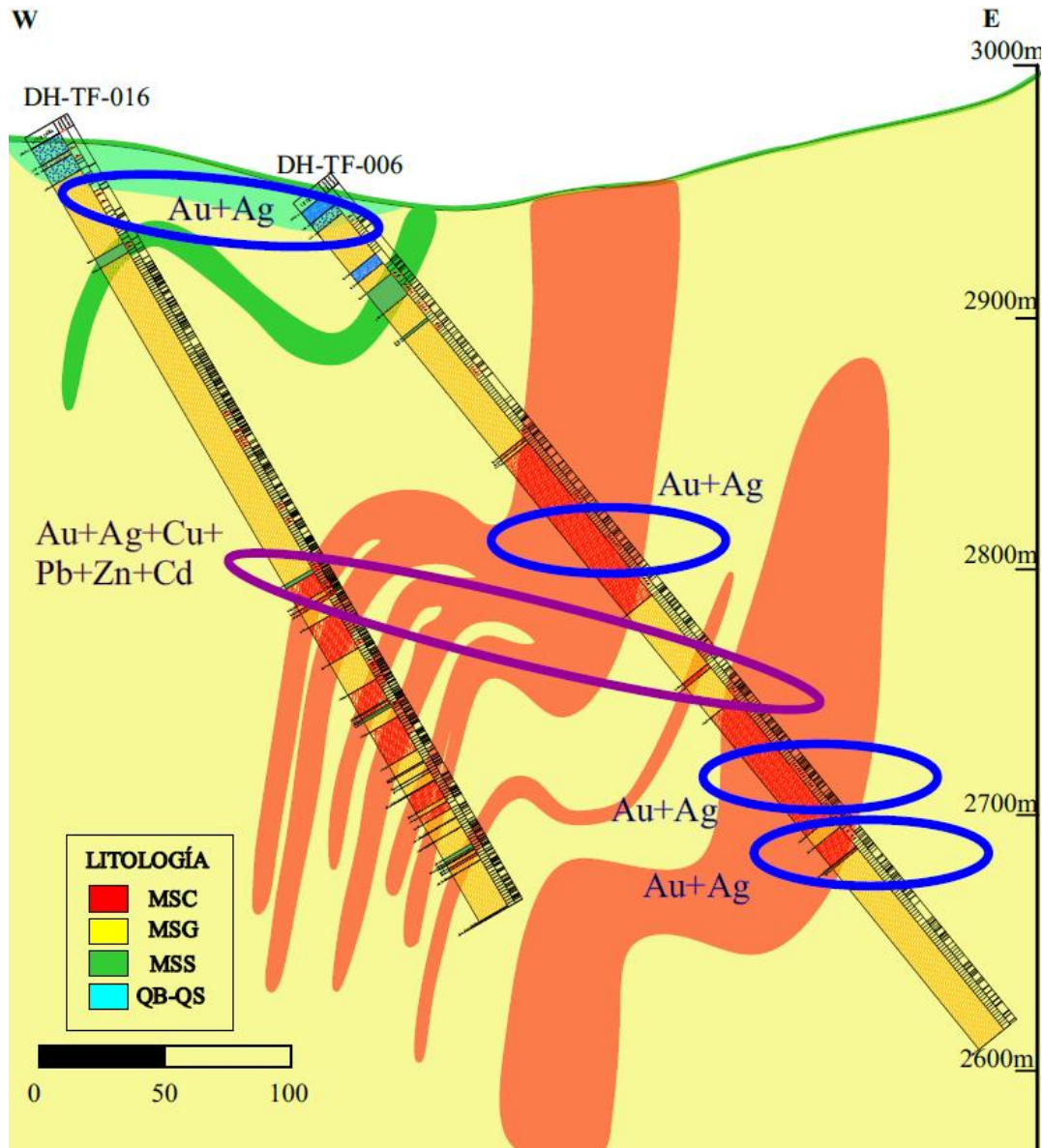


Figura 24. Correlación lito- y quimioestratigráfica de la sección norte. Pozos DH-TF-006 y DH-TF-016. MSC: esquistos cloríticos, MSG: esquistos grafitosos, MSS: esquistos cuarzo-sericíticos, QB: sobrecarga y QS: saprolito.

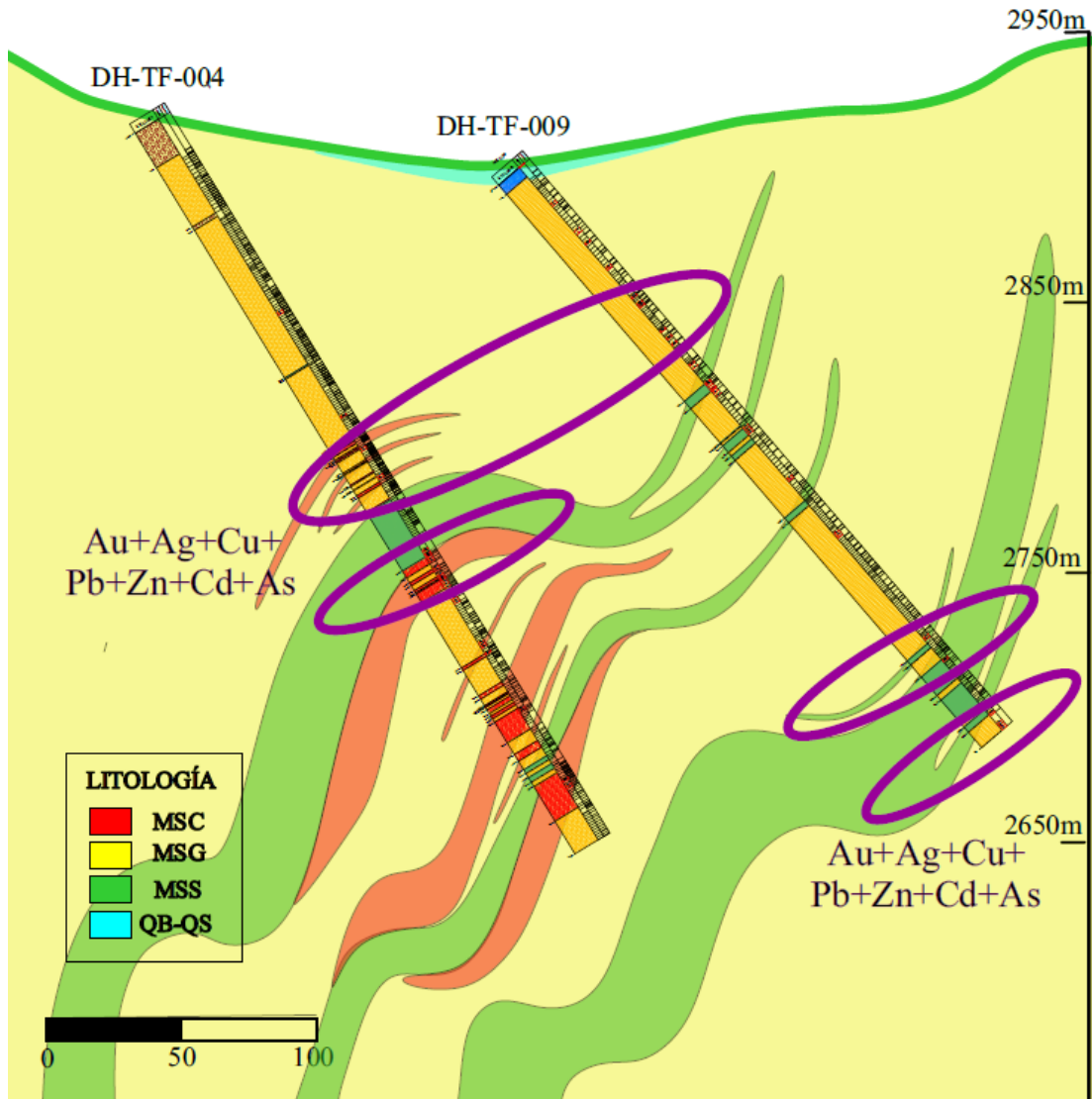


Figura 25. Correlación lito- y quimioestratigráfica de la sección centro. Pozos DH-TF-004 y DH-TF-009. MSC: esquistos cloríticos, MSG: esquistos grafitosos, MSS: esquistos cuarzo-sericíticos, QB: sobrecarga y QS: saprolito.

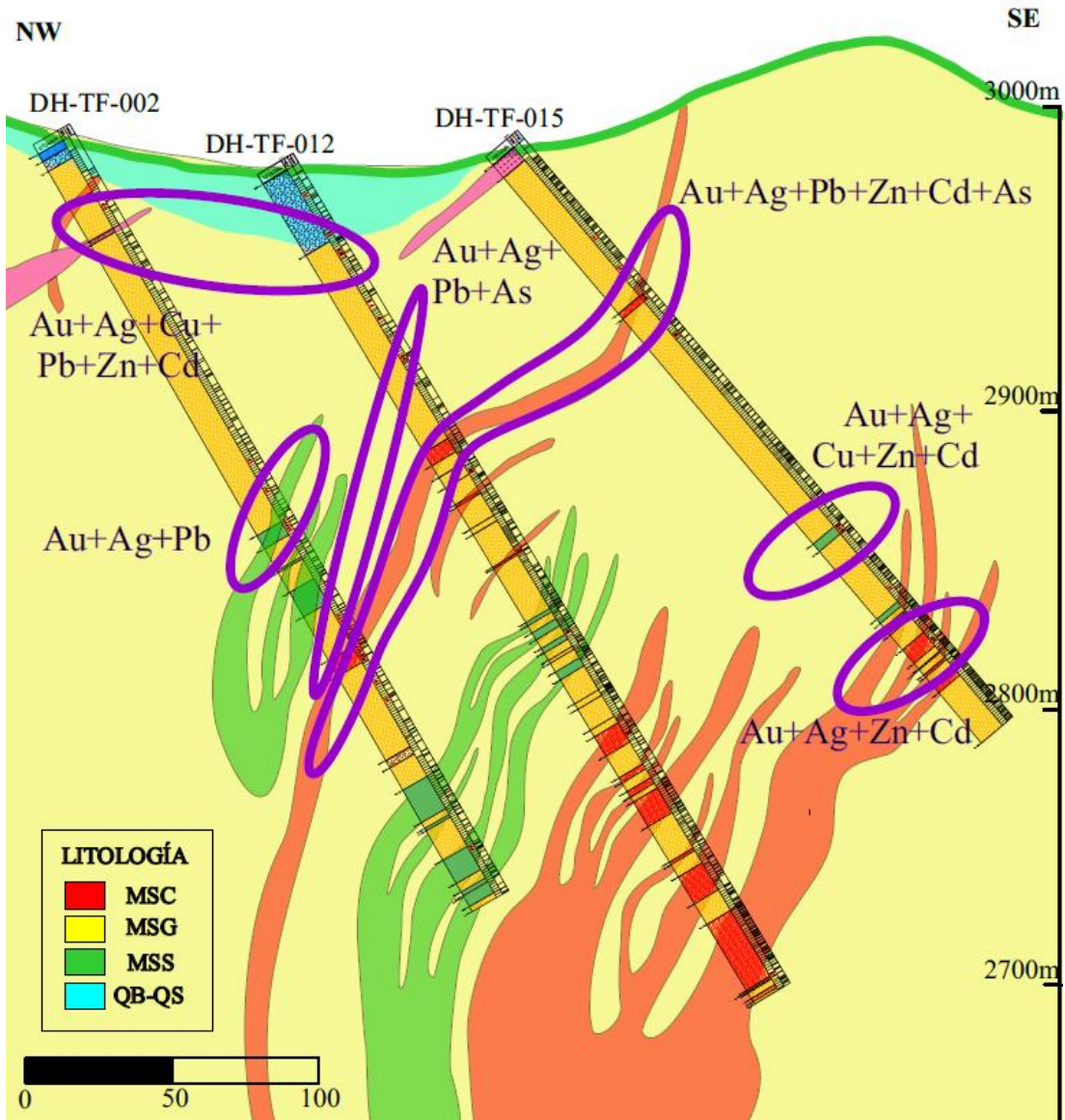


Figura 26. Correlación lito- y quimioestratigráfica de la sección centro. Pozos DH-TF-002, DT-HF-012 y DH-TF-015. MSC: esquistos cloríticos, MSG: esquistos grafitosos, MSS: esquistos cuarzo-sericíticos, QB: sobrecarga y QS: saprolito.

6.2 Controles geoquímicos en la precipitación de los metales y definición de las áreas prospectivas

A partir de la compilación e interpretación de datos obtenidos en la presente investigación, se proponen tres asociaciones químicas para el depósito de Au Toldafría, donde se evidencia una zonación química tanto superficial, como en profundidad. La primera asociación, Au+Ag, identificada en los pozos DH-TF-006 y DH-TF-016, ubicados en la zona norte del área de estudio, muestra una concentración de oro baja, pero anómala y puntual. La segunda asociación, Au+Ag+Zn+Pb+Cu+As, es la asociación química dominante del depósito, localizándose principalmente en la zona central. Esta asociación es la que evidencia mayor transporte de oro, alcanzando concentraciones de hasta 36 ppm (Goldfarb & Groves, 2015). La tercera asociación, Au+Ag+Zn+Pb, se localiza en la zona sur, exhibiendo una concentración de oro superior a la primera, pero inferior a la segunda asociación. Adicionalmente, se determina que las zonas de contacto de los esquistos cloríticos y cuarzo-sericíticos con los esquistos grafitosos, presentan valores altos de Au, y el litotipo más favorable es el conformado por esquistos cloríticos, sin embargo, en general los esquistos no presentan una respuesta favorable para la depositación de Au (Goldfarb *et al.*, 2001). Según la metalografía, se identifican dos eventos mineralizantes, uno polimetálico con oro, plata, galena, esfalerita, arsenopirita y calcopirita (Figura 27), y otro asociado a teluros, con la presencia de silvanita, altaita y nagyagita, plata y galena, contribuyendo este último evento con minerales cianicidas al sistema (Pirajno, 2009).

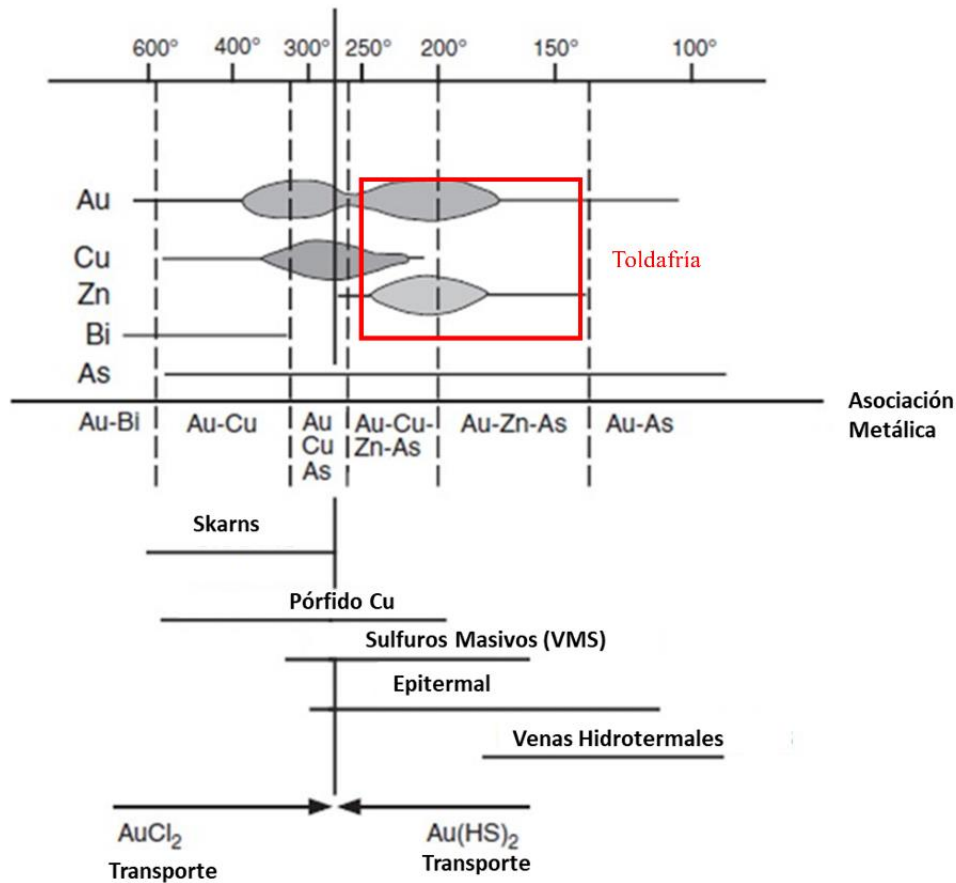


Figura 27. Interpretación de la zonación metálica y distribución de elementos químicos del depósito de Au Toldafria. Adaptado de Pirajno (2009).

El depósito de Toldafria se caracteriza por su naturaleza polimetálica, con variedad de estilos de mineralización, principalmente vetiformes (VTS, VNA, y VEN) que están vinculadas a controles estructurales con para la precipitación de Au. Los minerales tales como esfalerita, galena, pirita, arsenopirita y, en menor proporción, calcopirita, denotan la presencia de fluidos hidrotermales de temperaturas medias a bajas, asociados con un pH de 4 a 5, lo que concuerda con los modelos de alteración hidrotermal (Sillitoe, 2010). Es relevante la asociación de pirrotina en zonas con esquisto grafitoso, donde la interacción con fluidos hidrotermales favorece su precipitación, destacando la influencia de estos cuerpos grafitosos en la reducción de los fluidos

(Pirajno, 2009, Sillitoe, 2010). En concordancia con los modelos de depósitos hidrotermales, las asociaciones descritas evidencian ocurrencias polimetálicas, las cuales han sido interpretadas como epitermales (*sensu* Salazar-Narváez, 2015), sin embargo, no se descarta la posibilidad de una fuente distal magmático-hidrotermal (Sillitoe, 2010), teniendo en cuenta la actividad magmática que tuvo lugar en el Paleógeno (Stock de Manizales; Bayona *et al.*, 2012) y en el Cuaternario (domos Victoria, Gallinazo y Tesorito; Thouret *et al.*, 1990).

Finalmente, todo el análisis presentado muestra un empobrecimiento gradual de Au y metales base hacia el norte de la zona de estudio (Figura 28), por otra parte, un incremento en la mineralización en sentido N-S sugiere una posible fuente de fluidos en dirección E-SE. Por lo tanto, el análisis exhaustivo del depósito de Au Toldafría revela evento hidrotermal significativo, estrechamente correlacionado con la química y la mineralización polimetálica reconocida en la zona de estudio.

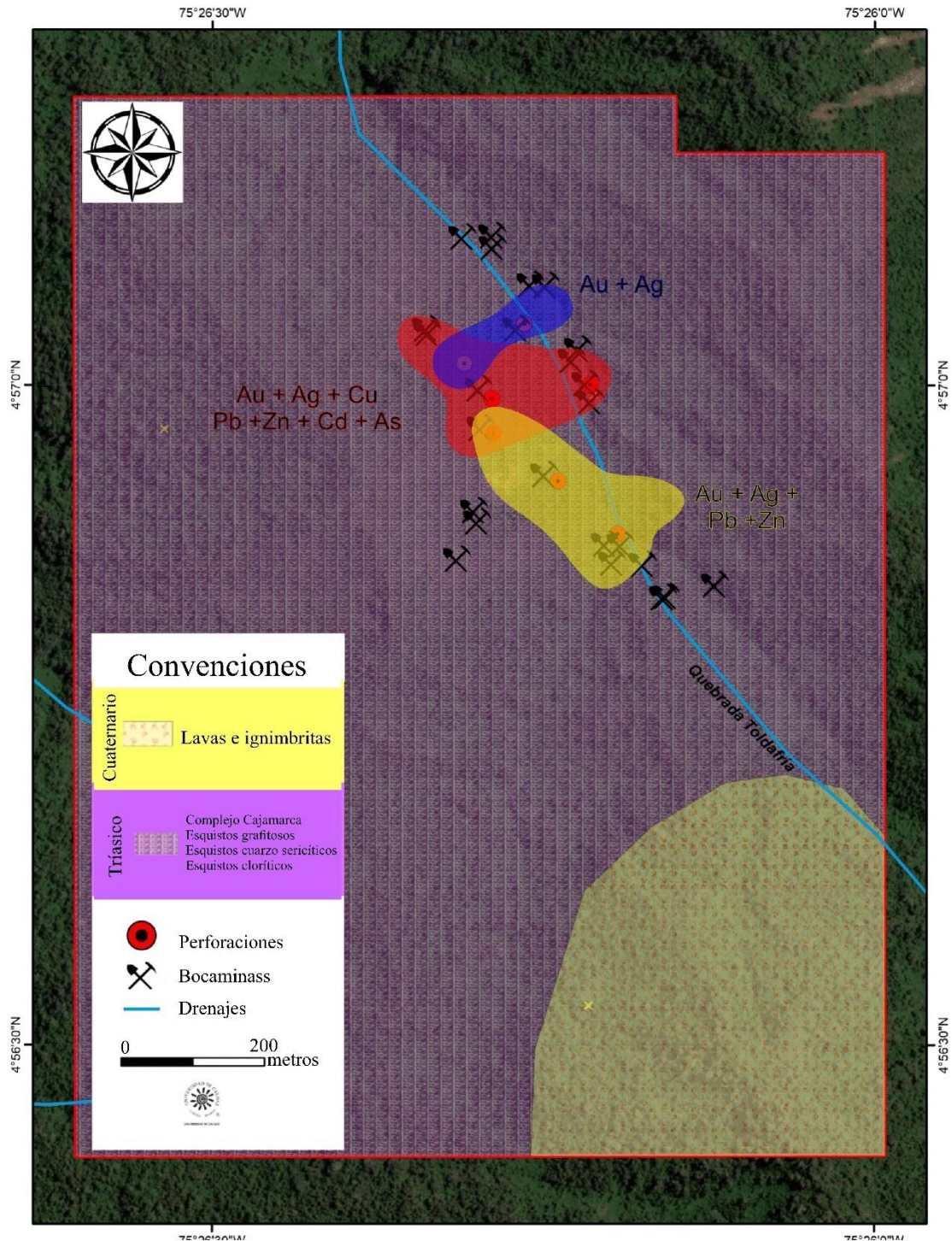


Figura 28. Mapa de distribución de las asociaciones químicas interpretadas para depósito de Au Toldafría.

7 Conclusiones

La descripción detallada de los pozos y de las zonas mineralizadas, permitió establecer una estratigrafía general del depósito de Au Toldafría, en la cual el litotipo predominante identificado está conformado por esquistos grafitosos, con intercalaciones de esquistos cloríticos y en menor proporción esquistos cuarzo-sericíticos, siendo los esquistos cloríticos el litotipo más propicio para la concentración de Au, y las zonas de contacto entre los esquistos cloríticos y cuarzo-sericíticos con los esquistos grafitosos.

Los tres litotipos presentan foliación milonítica (S_1) y crenulación (S_2), los cuales presentan estructuras vetiformes concordantes con los planos de foliación, y estructuras discordantes cortando estos planos. Las zonas donde se cruzan estos dos tipos de estructuras corresponden con las zonas con mayor concentración de Au.

El depósito de Toldafría es polimetálico, con estilos de mineralización principalmente vetiformes vinculados a controles estructurales para la precipitación de Au. Se presentan estructuras de espesor entre 0,1 cm y 1 cm (VTS), entre 1 cm y 10 cm de espesor (VNA) y vetas de más de 10 m de espesor (VEN).

Los análisis metalográficos permitieron identificar dos eventos mineralizantes: uno polimetálico con oro, plata, galena, esfalerita, arsenopirita y calcopirita y otro asociado a teluros, con la presencia de silvanita, altaita y nagyagita, plata y galena.

La presencia de esfalerita, galena, pirita, arsenopirita y calcopirita, evidencian la presencia de fluidos hidrotermales de temperaturas medias a bajas con pH que varía de 4 a 5, representando alteración hidrotermal, además, la presencia de pirrotina principalmente en los esquistos grafitosos, permite inferir la influencia de estos cuerpos grafitosos en la reducción de los fluidos.

Las asociaciones minerales presentes evidencian el carácter polimetálico del depósito, correspondiendo con zonas proximales o distales, que podrían estar relacionadas con sistemas de mineralización magmático-hidrotermales, sistema que posiblemente se encuentra a profundidades mayores que las alcanzadas por los sondajes exploratorios.

Los parámetros estadísticos calculados (*background* y umbrales 1, 2 y 3) para los diferentes intervalos con alta concentración de Au reportados en todos los pozos, y su correlación lito- y quimioestratigráfica, permitieron definir tres asociaciones químicas: i) Au+Ag, localizada principalmente en la zona norte del depósito, con baja concentración de oro pero generalmente por encima del umbral 1, ii) Au+Ag+Zn+Pb+Cu+As, la cual es la más extensa y está localizada principalmente en la zona central, en la cual la concentración de oro es la más alta, y iii) Au+Ag+Zn+Pb, localizada en la zona centro-sur del depósito, con una concentración de oro mayor que la primera asociación, pero menor que la de la asociación principal.

La integración de los análisis litoestratigráficos, estructurales, metalográficos y geoquímicos evidencia un empobrecimiento gradual de Au y metales base hacia el norte del depósito, por lo tanto, el incremento en la mineralización en sentido N-S sugiere una posible fuente de fluidos en dirección E-SE.

Referencias

- Aguirre Sanchez, R. & López Isaza, J. A. (2003). Cartografía geológica y petrografía del Stock de Manizales y su relación con sus rocas encajantes. Trabajo de grado, Universidad de Caldas, Departamento de Ciencias Geológicas.
- Alvarán, M. (2006). Consideraciones metalogenéticas del depósito aurífero “La Coqueta”. Distrito Minero Manizales – Villamaría. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. 182 p
- Alvarán, M., Toro, L. M. & Ruiz, E.C. (2012). Informe de estudio petrográfico – metalográfico de diez muestras de veta y roca de la mina Toldafría, Villamaria Caldas.
- Álvarez, A. J. (1983). Geología de la cordillera Central y el occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides mesocenoicos. *Boletín Geológico*, 26(2), 1–175. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol26.2.1983.53>
- Álvarez A., J. (1987). Mineralogía y química de los depósitos de cromita podiforme de las dunitas de Medellín, departamento de Antioquia, Colombia. *Boletín Geológico*, 33(1–3), 33–46. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol33.1-3.1993.230>
- Atkins, P. W. & De Paula, Julio. (2006). *Physical chemistry for the life sciences*. Oxford University Press.
- Bayona, G., Cardona, A., Jaramillo, C., Mora, A., Montes, C., Valencia, V., Ayala, C., Montenegro, O. & Ibañez-Mejía, M. (2012). Early Paleogene magmatism in the northern Andes: Insights on the effects of Oceanic Plateau-continent convergence. *Earth and Planetary Science Letters*, 331–332, 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.03.015>
- Binder, B., & Keppler, H. (2011). The oxidation state of sulfur in magmatic fluids. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1–2), 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.10.042>

- Bodnar, R. J. (1993). Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. In *Geochimica et Cosmochimica*.683–684. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90378-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90378-A)
- Bustamante, C., Cardona, A., Archanjo, C. J., Bayona, G., Lara, M., & Valencia, V. (2017). Geochemistry and isotopic signatures of Paleogene plutonic and detrital rocks of the Northern Andes of Colombia: A record of post-collisional arc magmatism. *Lithos*, 277, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.11.025>
- Castaño-Dávila, D. L., Hernández-González, J. S., Molano-Mendoza, J. C. & Rodríguez-Vargas, A. I. (2019). Mineralogy and fluid-inclusion microthermometry of the vein with Au-Ag ore of La Aurora mine in the northern part of the Zaragoza-Segovia-Remedios mining district (ZSRMD), Colombia. *Boletín de Geología*, 41(3), 107–125. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2019005>
- Cathles, L. M., Erendi, A H J. & Barrie, T. (1997). How Long Can a Hydrothermal System Be Sustained by a Single Intrusive Event. In *Economic Geology* (Vol. 92).
- Cediel, F., Shaw, R. P., & Cáceres, C. (2003). Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. In Bartolini C, Buffler R, & Blickwede J0 (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics* 815–848. American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/M79877C37>
- Clavijo Betancurth, D. (2023). Caracterización Mineralógica y Asociaciones Minerales de Alteración en el Área de Tolda Fría Mediante el Relogeo de los Pozos de Perforación DHTF-02, DHTF- 04, DHTF-06, DHTF-08 y DHTF-10. Trabajo de grado, Universidad de Caldas, Departamento de Ciencias Geológicas.

- Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Ulianov, A., Mora, A., Villagómez, D., Putlitz, B., & Chiaradia, M. (2014a). Permo-Triassic anatexis, continental rifting and the disassembly of western Pangaea. *Lithos*, 190–191, 383–402. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.12.020>
- Feininger, T., Barrero, L. D., & Castro, Q. N. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas. 1–191.
- Garofalo & Ridley. (2014). Fluid evolution in the El-Sid gold deposit, Eastern Desert, Egypt. In *Geological Society Special Publication*. 402,1. Geological Society of London. <https://doi.org/10.1144/SP402.3>
- Goldfarb, R. J. & Groves, D. I. (2015). Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>
- Goldstein, R. H. (2003). Petrographic analysis of fluid inclusions Hugoton Embayment View project. <https://www.researchgate.net/publication/270218809>
- 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. In *Ore Geology Reviews*. 13.
- Gutscher, M.A., Malavieille, J., Lallemand, S. & Collot, J.Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(3–4), 255–270. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00060-6)
- Heinrich, C. A. (2007). Fluid-fluid interactions in magmatic-hydrothermal ore formation. In *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 65, 363–387. <https://doi.org/10.2138/rmg.2007.65.11>
- Lang, J. R., & Baker, T. (2001). Intrusion-related gold systems: The present level of understanding. *Mineralium Deposita*, 36(6), 477–489. <https://doi.org/10.1007/s001260100184>

- Leal-Mejía, H., Shaw, R. P. & Melgarejo i Draper, J. C. (2019). Spatial-temporal migration of granitoid magmatism and the Phanerozoic tectono-magmatic evolution of the Colombian Andes. In *Frontiers in Earth Sciences*, 253–410. Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_5
- Maya, M. & González, H. (1995). Unidades litodémicas en la cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico*, 35(2–3), 44–57. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol35.2-3.1995.316>
- Millward, D., Marriner, G. F. & Saunders, A. D. (1984). Cretaceous tholeiitic volcanic rocks from the Western Cordillera of Colombia. *Journal of the Geological Society*, 141(5), 847–860. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.141.5.0847>
- Montes, C., Cardona, A., McFadden, R., Moron, S. E., Silva, C. A., Restrepo-Moreno, S., Ramirez, D. A., Hoyos, N., Wilson, J., Farris, D., Bayona, G. A., Jaramillo, C. A., Valencia, V., Bryan, J. & Flores, J. A. (2012). Evidence for middle Eocene and younger land emergence in central Panama: Implications for Isthmus closure. *Geological Society of America Bulletin*, 124(5–6), 780–799. <https://doi.org/10.1130/B30528.1>
- Montes, C., Rodríguez-Corcho, A. F., Bayona, G., Hoyos, N., Zapata, S. & Cardona, A. (2019). Continental margin response to multiple arc-continent collisions: The northern Andes-Caribbean margin. *Earth-Science Reviews*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102903>
- Moreno-Sánchez, M., Gómez-Cruz, A. de J., & Toro, L. M. (2008). Proveniencia del material clástico del complejo quebradagrande y su relación con los complejos quebradagrande y su relación con los complejos estructurales adyacentes. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 22, 27–38.
- Moreno-Sánchez, M., & Pardo-Trujillo, A. (2003). Stratigraphical and Sedimentological Constraints on Western Colombia; Implications on the Evolution of the Caribbean Plateau; In C. Bartolini, R. T. Buffler, & J. Blickwede (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean Hydrocarbon*

Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics, 79. American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/M79877C40>

Morrison, G. W., Rose, W. J. & Jaireth, S. (1991). Geological and geochemical controls on the silver content (fineness) of gold in gold-silver deposits. *Ore Geology Reviews*, 6.

Nivia, A. (1996). The Bolivar mafic-ultramafic complex, SW Colombia: the base of an obducted oceanic plateau. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(1–2), 59–68. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(96\)00027-2](https://doi.org/10.1016/0895-9811(96)00027-2)

Nivia, A., Marriner, G. F., Kerr, A. C. & Tarney, J. (2006). The Quebradagrande Complex: A Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central Cordillera of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 423–436. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.002>

Osorio, P., Botero-Gómez, L. A., Murcia, H., Borrero, C. & Grajales, J. A. (2018). Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termalés, Cordillera Central, Andes colombianos (Parte II): Características composicionales. *Boletín de Geología*, 40(3), 103–123. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n3-2018006>

Pirajno. (2009). *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Geological Survey of Western Australia (Springer, Ed.).

Restrepo, J. J. & Toussaint, J.F. (2020). Tectonostratigraphic Terranes in Colombia: An Update First Part: Continental Terranes 1, 37–63. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>

Richards, J. P. (2009). Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere. *Geology*, 37(3), 247–250. <https://doi.org/10.1130/G25451A.1>

Ridley, J. (2013). *Ore Deposit Geology*. Cambridge University Press.

- Roedder, E. (1984). Fluid inclusions: an introduction to studies of all types of fluid inclusions, gas, liquid, or melt, trapped in materials from earth and space, and their application to the understanding of geologic processes. *Reviews in mineralogy*, 12.
- Salazar Narváez, C. D. (2015). Trabajo de grado: Caracterización geológico estructural y análisis del deposito Tolda fría (distrito minero Manizales-Villamaría). Universidad de Caldas.
- Salazar-Muñoz, N., Ríos de la Ossa, C. A., Murcia, H., Schonwalder-Ángel, D., Botero-Gómez, L. A., Hincapié, G., da Silva, J. C. & Sánchez-Torres, L. (2021). Andesitic (SiO₂: ~60 wt%) monogenetic volcanism in the northern Colombian Andes: Crystallisation history of three Quaternary volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 412, 107-194. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107194>
- Sander, R. (2015). Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(8), 4399–4981. <https://doi.org/10.5194/acp-15-4399-2015>
- Sepúlveda Ospina, J., Celada Arango, C. M., Leal-Mejía, H., Murillo Bohórquez, H., Rodríguez Vargas, A., Gómez Casallas, M., Prieto Gómez, D., Jiménez Torres, C. A., Rache Rodríguez, A., & Hart, C. J. R. (2020). Mapa metalogénico de colombia versión 2020 memoria explicativa Servicio Geológico Colombiano, 2–259.
- Seward, T. M. (1978). Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochimios et Cosomchmica acta*, 87, 379-399.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Sillitoe, R. H. & Hedenquist, J. W. (2003). Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. 1–29.

- Simmons, S. F. & Brown, K. L. (2006). Gold in magmatic hydrothermal solutions and the rapid formation of a giant ore deposit. *Science*, 314(5797), 288–291. <https://doi.org/10.1126/science.1132866>
- Simpson, M. P. & Mauk, J. L. (2011). Hydrothermal Alteration and Veins at the Epithermal Au-Ag Deposits and Prospects of the Waitekauri Area, Hauraki Goldfield, New Zealand. Society of Economic Geologists, Inc. *Economic Geology*, 106, 945–973. <https://doi.org/DOI:10.2113/econgeo.106.6.945>
- Spikings, R. & Paul, A. (2019). The Permian – Triassic history of magmatic rocks of the northern Andes (Colombia and Ecuador): Supercontinent assembly and disassembly (Servicio Geológico Colombiano, Ed.). <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.01>
- Stefánsson, A. & Seward, T. M. (2004). Gold(I) complexing in aqueous sulphide solutions to 500°C at 500 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20), 4121–4143. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.04.006>
- Stumm, W. & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic chemistry* (3rd ed.). John Wiley & Sons, inc.
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J. & Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5), 787–813. <https://doi.org/10.1029/2000TC900004>
- Thouret, J., Cantagrel, J., Salinas, R. & Murcia, A. (1990). Quaternary eruptive history of Nevado del Ruiz (Colombia).
- Toro, L. M., Hincapié, G. & Ossa, C. A. (2010). Petrografía y geoquímica de los metagabros del río Olivares sector NNW de Manizales (Caldas). *Boletín de Geología*, 32(2), 73–84.

Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., & Beltrán, A. (2011).

Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3–4), 875–896. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.003>

Vinasco. (2019). The romeral shear zone. In *Frontiers in Earth Sciences*, 833–876. Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_12

Vinasco, 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(4), 355–371. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.007>

White, N. C. & Hedenquist, J. W. (1995). Epithermal Gold Deposits: Styles, Characteristics and exploration. *SEG Discovery*, 23, 1–13. <https://doi.org/10.5382/segnews.1995-23.fea>

Zapata, S., Cardona, A., Jaramillo, J. S., Patiño, A., Valencia, V., León, S., Mejía, D., Pardo-Trujillo, A. & Castañeda, J. P. (2019). Cretaceous extensional and compressional tectonics in the Northwestern Andes, prior to the collision with the Caribbean oceanic plateau. *Gondwana Research*, 66, 207–226. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.10.008>

Zapata-Villada, J. P., Restrepo, J. J. & Cardona-Molina, A. (2017). Geoquímica y geocronología de las rocas volcánicas básicas y el gabro de altamira, cordillera occidental (Colombia): registro de ambientes de plateau y arco oceánico superpuestos durante el cretácico. *Boletín de Geología*, 39(2), 13–30. <https://doi.org/10.18273/revbol.v39n1-2017001>

Zhu, Y., An, F. & Tan, J. (2011). Geochemistry of hydrothermal gold deposits: A review. In *Geoscience Frontiers*, 2, 3, 367–374. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.05.006>