



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DEL PROYECTO AURÍFERO EL VAPOR Y SU IMPLICACIÓN EN EL EFECTO PREG-ROBBING ASOCIADO A LA MENA”

PROYECTO DE GRADO

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN GEOLOGÍA

Presentado por:

JOHNNY GABRIEL CORDERO MACIAS

CÉSAR DAVID MOSCOSO MOLINA

GUAYAQUIL – ECUADOR

2018

AGRADECIMIENTO

A Dios primeramente, a nuestros padres y hermanos por brindarnos siempre su apoyo total en esta importante etapa de nuestras vidas.

A Eco – Desarrollos Mineros S.A.S., al M.Sc. David Altamirano, por su tutoría, respaldo y preocupación, al igual que el Ing. Eduardo Díaz, que estuvo brindándonos soporte durante este proyecto. A la Ing. Nancy Zumba y de manera especial al Ing. Galo Montenegro, por su paciencia y estar siempre apoyándonos y compartiendo sus conocimientos.

Johnny Gabriel Cordero Macias

César David Moscoso Molina

DEDICATORIA

A mis padres Johnny y Carolina, por su total e incondicional apoyo durante toda esta etapa. A mi hermano Jonathan, por su apoyo emocional.

A los profesores que hicieron esto posible, en especial al Ing. Galo Montenegro y al M.Sc. David Altamirano por su constante respaldo y soporte en el desarrollo de este proyecto.

Johnny Gabriel Cordero Macias

DEDICATORIA

A mi papá César y mi mamá Ruth por su esfuerzo y apoyo infinito e incondicional que me han brindado a lo largo de la carrera. A mi hermano y compañero de vida Ronald, y a mi pequeña hermanita Angelly por ser mi más grande motivo de inspiración.

César David Moscoso Molina

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

M.Sc. David Altamirano Morán
TUTOR DEL PROYECTO

M.Sc. Eduardo Díaz Arias
VOCAL 1

M.Sc. Kenny Escobar Segovia
VOCAL 2

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

Johnny Gabriel Cordero Macias

César David Moscoso Molina

RESUMEN

El proyecto minero de El Vapor está siendo afectado por el fenómeno de *preg-robbing*. Este fenómeno está asociado sobre todo a la materia carbonosa y a ciertos minerales arcillosos, por lo que fue necesario realizar una caracterización mineralógica del depósito. Se recogieron un total de 15 muestras en las labores subterráneas de las minas El Dólar y Raudal, de las cuales se elaboraron 6 secciones delgadas y 7 secciones pulidas para analizar la composición mineralógica de la mena y ganga del depósito. Adicional a esto se desarrollaron ensayos de DRX a 2 muestras correspondientes a ambas minas para obtener un análisis cualitativo de la composición de estas rocas.

Los resultados arrojaron que la mena del depósito está conformada por sulfuros, en su mayoría pirita, que se presenta en dos fases: grano fino y grano grueso. También se encontró evidencia de calcopirita, esfalerita, galena y oro como inclusiones sólidas y relleno de espacios. La ganga se compone principalmente de 3 fases de cuarzo, dos principales y una posterior acompañada de calcita, rellenando espacios y cavidades. La primera fase de cuarzo consiste en un cuarzo inicial microcristalino, asociado a la pirita de grano fino y a minerales de alteración como la fílica, presentes en las rocas encajantes. Una segunda fase corresponde a un cuarzo lechoso de carácter

masivo, asociado a la pirita de grano grueso, relacionado directamente con la mineralización de oro.

Estos resultados permitieron concluir que el efecto *preg-robbing* que se da en el área de El Vapor, está asociado principalmente a la materia orgánica presente en las rocas de caja y estructuras mineralizadas. Es posible afirmar que los aluminosilicatos identificados como la sericita e illita, juegan también un papel importante sobre el efecto *preg-robbing*, ya que se encuentran asociados a este material carbonoso y a las rocas de caja, y que es muy probable que la gran presencia de sulfuros tenga cierta incidencia sobre este problema.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA	III
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN	V
DECLARACIÓN EXPRESA	VI
RESUMEN	VII
ÍNDICE GENERAL.....	IX
ABREVIATURAS	XIII
SIMBOLOGÍA	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
CAPÍTULO 1.....	19
INTRODUCCIÓN	19
1.1. Antecedentes	20
1.2. Planteamiento del problema	21
1.3. Justificación	22
1.4. Área de estudio	22
1.4.1. Ubicación geográfica	22
1.4.2. Clima, vegetación y población	24
1.5. Objetivos	25

1.5.1. Objetivo General	25
1.5.2. Objetivos Específicos.....	26
CAPÍTULO 2.....	27
MARCO GEOLÓGICO	27
2.1. Geología Regional	28
2.1.1. Marco Tectónico Regional	28
2.1.2. Fallas Regionales	31
2.1.3. Plegamientos Regionales y Menores	35
2.1.4. Geomorfología	35
2.1.5. Hidrografía	39
2.1.6. Litoestratigrafía	40
2.1.7. Minería.....	46
2.2. Geología Local.....	48
CAPÍTULO 3.....	51
METODOLOGÍA.....	51
3.1. Datos disponibles y revisión bibliográfica.....	52
3.1.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	52
3.2. Trabajo de campo	54
3.2.1. Levantamiento de datos en superficie	54
3.2.2. Levantamiento de datos dentro de mina.....	54
3.3. Trabajo de Laboratorio.....	56

3.3.1. Descripción Macroscópica de muestras de mano	56
3.3.2. Elaboración y análisis petrográfico de láminas delgadas	56
3.3.3. Elaboración y análisis de secciones pulidas	62
3.3.4. Difracción de rayos X y análisis de difractogramas	65
3.4. Trabajo de Gabinete	66
CAPÍTULO 4.....	68
RESULTADOS	68
4.1. Geología de campo.....	69
4.1.1. Geología de superficie	69
4.1.2. Geología dentro de mina	71
4.2. Caracterización petrográfica y mineralógica	74
4.2.1. Rocas encajantes	74
4.2.2. Mineralogía de mena	80
4.2.3. Mineralogía de ganga	83
4.3. Análisis de difracción de rayos X (DRX)	86
CAPÍTULO 5.....	88
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	88
5.1. Evaluación geológica de trabajo de campo.....	89
5.2. Sedimentitas de Segovia	91
5.3. Batolito de Segovia	91
5.4. Paragénesis	92

5.5. Mineralogía de alteración.....	94
5.6. Refractariedad del depósito	96
5.6.1. Potenciales preg-robbers.....	98
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
Conclusiones	101
Recomendaciones	104
ANEXOS	
BIBLIOGRAFÍA	

ABREVIATURAS

DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DM	Distrito Minero
DRX	Difractometría de Rayos X
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
Ma	Millones de años
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
NNE	Nor-Noreste
NS	Norte-Sur
NW	Noroeste
SE	Sureste
SEM	Scanning Electron Microscopy
SGC	Servicio Geológico Colombiano
SSW	Sur-Suroeste

SIMBOLOGÍA

°C	Grados centígrados
Ag	Plata
Al	Aluminio
Au	Oro
C	Carbono
Cal	Calcita
Ccp	Calcopirita
Clc	Clinocloro
Fe	Hierro
Fsp	Feldespato
Gn	Galena
Ill	Illita
K	Potasio
km	Kilómetros
m	Metros
Mc	Microclina
Mca	Mica
Mg	Magnesio
mm	Milímetros
Ms	Moscovita
Na	Sodio
O	Oxígeno
Op	Mineral opaco
Pl	Plagioclasa
Py	Pirita
Qtz	Cuarzo
S	Azufre
Ser	Sericita
Si	Silicio
Sp	Esfalerita
µm	Micrones

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación del Proyecto El Vapor, Colombia.....	23
Figura 2.1. Mapa neotectónico de Colombia con los principales sistemas de fallas. CB: Bloque Panamá-Choco; WC: Cordillera Occidental; CC: Cordillera Central; EC: Cordillera Oriental; RFS: Sistema de Fallas Romeral; son los principales rasgos observables.....	30
Figura 2.2. Configuración regional de la Falla de Palestina.	34
Figura 2.3. Sección cruzada de los Andes colombianos. Recuadro rojo muestra la región de estudio.....	38
Figura 2.4. Geología regional del oriente de Antioquia.	46
Figura 2.5. Ubicación de los DM Segovia-Remedios y Puerto Nare.	48
Figura 3.1. Pasos sucesivos para la elaboración de una lámina delgada a partir de una muestra de mano.	57
Figura 3.2. Equipo Geoform usado en el corte y desbaste de las secciones delgadas.	58
Figura 3.3. Microscopio de luz polarizada empleado para el análisis de secciones delgadas.	60
Figura 3.4. Proceso de cuantificación para porcentajes de minerales componentes de la roca.....	62
Figura 3.5. Equipo Forcimat empleado en el pulido final de las secciones pulidas.	63

Figura 3.6. Microscopio de luz transmitida/reflejada empleado para el análisis de secciones pulidas.....	65
Figura 3.7. Equipo PANalytical XPert Pro usado para la Difractometría de Rayos X.	66
Figura 4.1. Afloramiento de lutitas color marrón claro cerca de la mina La Menez.	69
Figura 4.2. Lutitas de color marrón claro de textura arcillosa.....	71
Figura 4.3. Levantamiento dentro de mina. A) Veta de Cuarzo y pirita encajada en los shales carbonosos. B) Veta de pirita en su totalidad. C) Unidades de lutita color marrón con presencia de vetilleo y stockworks.	73
Figura 4.4. A) Muestra de mano perteneciente al Batolito de Segovia (GD-DO-01). B) Cristales de plagioclasas, cuarzo y feldespatos en sección delgada de la muestra GD-DO-01.	76
Figura 4.5. Diagrama de Streckeisen de la muestra GD-DO-01.	77
Figura 4.6. Sección delgada de la muestra GD-DO-04 vista en el microscopio de luz polarizada. A) Cristal de plagioclasa alterada en su totalidad a sericitilla. B) Presencia de opacos y sericita evidenciando un alto grado de alteración.	78
Figura 4.7. Lutita carbonosa correspondiente a la muestra GD-RA-05. A) Imagen macroscópica de la muestra. B) Grano sub idiomorfo de pirita visto en sección pulida de la muestra. C) Textura foliada que evidencia	

micropliegues vistos en sección delgada. D) Presencia de cristales de sericita (moscovita) e illita con un cristal de clinocloro.	79
Figura 4.8. A) Pirita de grano grueso asociada al cuarzo masivo. B) Pirita de grano fino asociada al cuarzo microcristalino.	81
Figura 4.9. A) Cristal de oro como inclusión sólida sobre cristal de pirita gruesa. B) Calcopirita rellenando fractura entre cristales de pirita.....	83
Figura 4.10. A) Imagen macroscópica de la muestra de veta GD-DO-06. B) Imagen microscópica de la muestra en sección delgada bajo luz polarizada.	84
Figura 4.11. Cristales de calcita idiomorfa presente en vetillas.....	85
Figura 4.12. Difractograma de la muestra GD-RA-05.	86
Figura 5.1. Minerales de mena asociados a la segunda generación de pirita. A) Inclusiones sólidas de calcopirita y galena sobre cristal de pirita gruesa. B) Inclusiones sólidas de esfalerita sobre cristal de pirita gruesa. C) Inclusión de calcopirita sobre cristal de pirita.....	93
Figura 5.2. Gráfico de paragénesis mineral propuesta para la mena y ganga del depósito aurífero El Vapor.....	94
Figura 5.3. Ensamblajes de alteración.....	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Distribución de población en los Municipios del Distrito Minero Puerto Nare.	25
Tabla II. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual 1.	53
Tabla III. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual 2.	53
Tabla IV. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual 3.	53
Tabla V. Especificaciones técnicas del equipo empleado en el corte y desbaste de las muestras.	59
Tabla VI. Especificaciones técnicas del microscopio usado en el análisis de secciones delgadas.	60
Tabla VII. Especificaciones técnicas del equipo empleado en el pulido final de las muestras.	64
Tabla VIII. Cuantificación mineralógica de la muestra GD-DO-01.	76
Tabla IX. Lista de minerales principales identificados en el difractograma de la muestra GD-RA-05.	87
Tabla X. Principales minerales preg-robbbers que afectan al depósito aurífero de El Vapor.	99

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los minerales metálicos presentes en depósitos filonianos de oro comúnmente presentan un grado de refractariedad, el cual genera complicaciones en la recuperación del metal durante el proceso de beneficio. Estas se traducen como pérdidas, de modo que afectan la rentabilidad de un proyecto minero (Gallego y otros., 2005). El proyecto minero “El Vapor” pertenece al distrito minero Puerto Nare, ubicado en la zona sureste del departamento de Antioquia (Colombia).

El depósito del proyecto presenta sulfuros con oro refractario asociados a rocas con presencia de materia carbonosa, lo cual genera dificultad para la recuperación de Au durante el proceso de cianuración causando el efecto *Preg-robbing* (Valdivieso, 2017). Este efecto se da cuando algún mineral presente adsorbe el complejo aurocianato de la solución cianurada durante el proceso de beneficio (Afenya, 1991). Existen diversos materiales causantes de *preg-robbing*, siendo el más común y estudiado el causado por la presencia de materia carbonácea en la mena. Este material aparece como hidrocarburos pesados, ácidos orgánicos y carbón natural, siendo este último el de mayor potencial de material *preg-robbber* (Afenya, 1991).

Ciertos sulfuros tienen potencial de ser *preg-robbers*, como por ejemplo pirita, pirrotina y calcopirita (Goodall y otros, 2005). Estos sulfuros presentan una fuerte adsorción de oro en las soluciones deficientes de cianuro (Rees & van Deventer, 2000). Ciertos minerales silicatos, especialmente las arcillas, han sido definidas como potenciales *preg-robbers* (Goodall y otros, 2005). Hausen & Bucknam (1984) definieron el efecto *preg-robbing* causado por ciertas arcillas, mostrando que la illita, caolinita, montmorillonita y pirofilita adsorbían oro de la solución cianurada, pero en menor proporción que la materia carbonácea.

1.2. Planteamiento del problema

Valdivieso (2017) estudió las menas refractarias con alto porcentaje de *preg-robbing* con la finalidad de optimizar la recuperación de Au en el proceso de beneficio del proyecto minero El Vapor. Realizó varios ensayos con el fin de caracterizar los minerales causantes de la refractariedad del depósito. Aunque la roca presenta material carbonoso en gran cantidad, los resultados apuntaron a la presencia de minerales aluminosilicatos en grandes porcentajes y un máximo de 7,84% de material carbonácea. Esto plantea la hipótesis de que el efecto *preg-robbing*, que afecta la recuperación del metal, no está relacionado solo a la presencia del material carbonoso, sino que también a los minerales aluminosilicatos.

1.3. Justificación

Mediante la realización de este trabajo se busca realizar un estudio de caracterización mineral, para de manera precisa, identificar los minerales causantes de la refractariedad en el depósito. Además de esto, es necesario enfocar el estudio a los minerales presentes en las estructuras mineralizadas y rocas encajantes que contribuyen a ser los principales causantes del efecto *preg-robbing* que afecta al proyecto.

La mineralogía aplicada es la herramienta que permitirá una correcta identificación y caracterización mineral del depósito, para que en un futuro esto ayude en la realización de estudios metalúrgicos y se implementen procesos más eficientes que optimicen la recuperación de Au.

1.4. Área de estudio

1.4.1. Ubicación geográfica

El Proyecto Minero El Vapor se encuentra localizado al norte de Colombia, en el Municipio Puerto Berrío, Departamento de Antioquía (Figura 1.1). El proyecto forma parte del Distrito Minero Puerto Nare, el cual se caracteriza por las abundantes reservas de caliza, y se encuentra conformado por los Municipios de Puerto

1.4.2. Clima, vegetación y población

El clima en el Distrito Minero de Puerto Nare varía desde un clima subandino a tropical, en donde las temperaturas promedio van desde los 14 °C en el Municipio de Sonsón hasta los 28 °C en los Municipios de Puerto Berrío, Puerto Nare y Puerto Triunfo. Las precipitaciones oscilan entre los 2000 y 3000 mm en la mayoría de los municipios que conforman el distrito, excepto en el Municipio de San Luis donde las precipitaciones exceden los 5000 mm (IGAC, 2014).

La vegetación en la zona de estudio es abundante y corresponde a un área subandina de bosques tropicales húmedos con especies como palmas de cera, helechos y orquídeas (Rangel y otros, 1997).

Según datos del último censo realizado por el DANE (2005), la población de los municipios que comprenden el Distrito Minero de Puerto Nare se distribuye de la siguiente manera (Tabla I.).

Tabla I. Distribución de población en los Municipios del Distrito Minero Puerto Nare.

Municipio	Hombres	Mujeres	Urbana	Rural
Puerto Berrío	18896	20048	34230	4714
Puerto Nare	8434	8277	6567	10144
Puerto Triunfo	8190	8159	4726	11623
San Luis	5676	5104	4661	6119
Sonsón	18478	18587	15470	21595
Total	59674	60175	65654	54195

Fuente: DANE., 2005.

En el distrito, la mayoría de la población se autorreconoce como raizal, palenquero, negro, mulato, afrocolombiano o afrodescendiente. Las actividades económicas tradicionales son la agricultura, la ganadería, el comercio y principalmente la minería. En la actividad minera predominan las explotaciones de caliza, mármol y arcillas ferruginosas (Millán, 2004).

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Determinar las características mineralógicas del depósito aurífero perteneciente al proyecto minero El Vapor mediante estudios de mineralogía aplicada, identificando los minerales causantes del efecto *preg-robbing* durante el proceso de beneficio.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Identificar y caracterizar los minerales presentes, tanto en la mena como en la ganga de las minas El Dólar y Raudal mediante análisis petrográficos de secciones delgadas y secciones pulidas.

- Realizar ensayos de difracción de rayos X (DRX) con el fin de caracterizar cualitativamente los minerales presentes en el material de cabeza.

- Reconocer y clasificar los minerales potenciales que causan el efecto *preg-robbing* en la recuperación de oro durante el proceso de beneficio.

CAPÍTULO 2

MARCO GEOLÓGICO

2.1. Geología Regional

2.1.1. Marco Tectónico Regional

La región colombiana constituye un territorio realmente interesante en términos geodinámicos. La constante interacción entre las placas de Nazca, Caribe y Sudamericana ha producido rasgos morfodinámicos llamativos, provocados por una tectónica que ha estado dominada por grandes estructuras rumbo deslizantes activas en lo que se denomina el Bloque Andino (Pulido, 2003).

La dinámica relativa en la subducción colombiana dio origen al sistema orogénico de los Andes del Norte durante la era Cenozoica (Coblentz & Richardson, 1996; Megard, 1987; Meijer & Wortel, 1992; Stefanick & Jurdy, 1992). Las rocas que conforman la Cordillera Central corresponden a rocas autóctonas pre-Cretácicas (Restrepo & Toussaint, 1988) contra las cuales se acrecionaron terrenos alóctonos y para-autóctonos desde el Cretáceo (Cediel y otros, 2003; Villagómez y otros, 2011).

Las rocas más antiguas reconocidas en el flanco oriental de la Cordillera Central comprenden cuerpos fragmentados de granulitas y neises migmatíticos metamorfoseados durante la orogenia Greenvilliana – Orinoquense y con edades entre 1300 y

900 Ma (Ordóñez-Carmona y otros, 2006; Restrepo-Pace y otros, 1997). El metamorfismo sufrido en estas rocas sucedió, según estos autores probablemente al comienzo del episodio de colisión entre la margen noroccidental de la que hoy es la placa Sudamericana (Amazonia) y la margen suroriental de Laurentia.

Villagómez y otros, (2011) afirman que el núcleo de la Cordillera Central está constituido por rocas del Complejo Cajamarca, correspondientes a rocas metasedimentarias y metamórficas de bajo grado, con edades entre 240 y 220 Ma y depositadas durante el período de *rifting* que generó la ruptura de Pangea. También concuerdan que los arcos magmáticos establecidos durante el Jurásico, Cretácico Tardío y Paleoceno permitieron la formación de cuerpos intrusivos como el Batolito de Segovia, el Batolito Antioqueño y el Batolito de Sonsón respectivamente.

La Cordillera Central es una cadena que ha sufrido intensos plegamientos, fallamientos e intrusiones batolíticas, de gran magnitud, que han opacado las relaciones estratigráficas y estructurales entre las distintas litologías que la constituyen (González, 2001). Por último, Cediell y otros (2003) sostienen que la acreción de los terrenos Cañasgordas y Baudó durante el Mioceno – Plioceno, produjo un magmatismo calcoalcalino que dio

lugar a los cuerpos intrusivos de Quinchía, Marmato y Buriticá; así como también el levantamiento tectónico final de las cordilleras Oriental y Occidental.

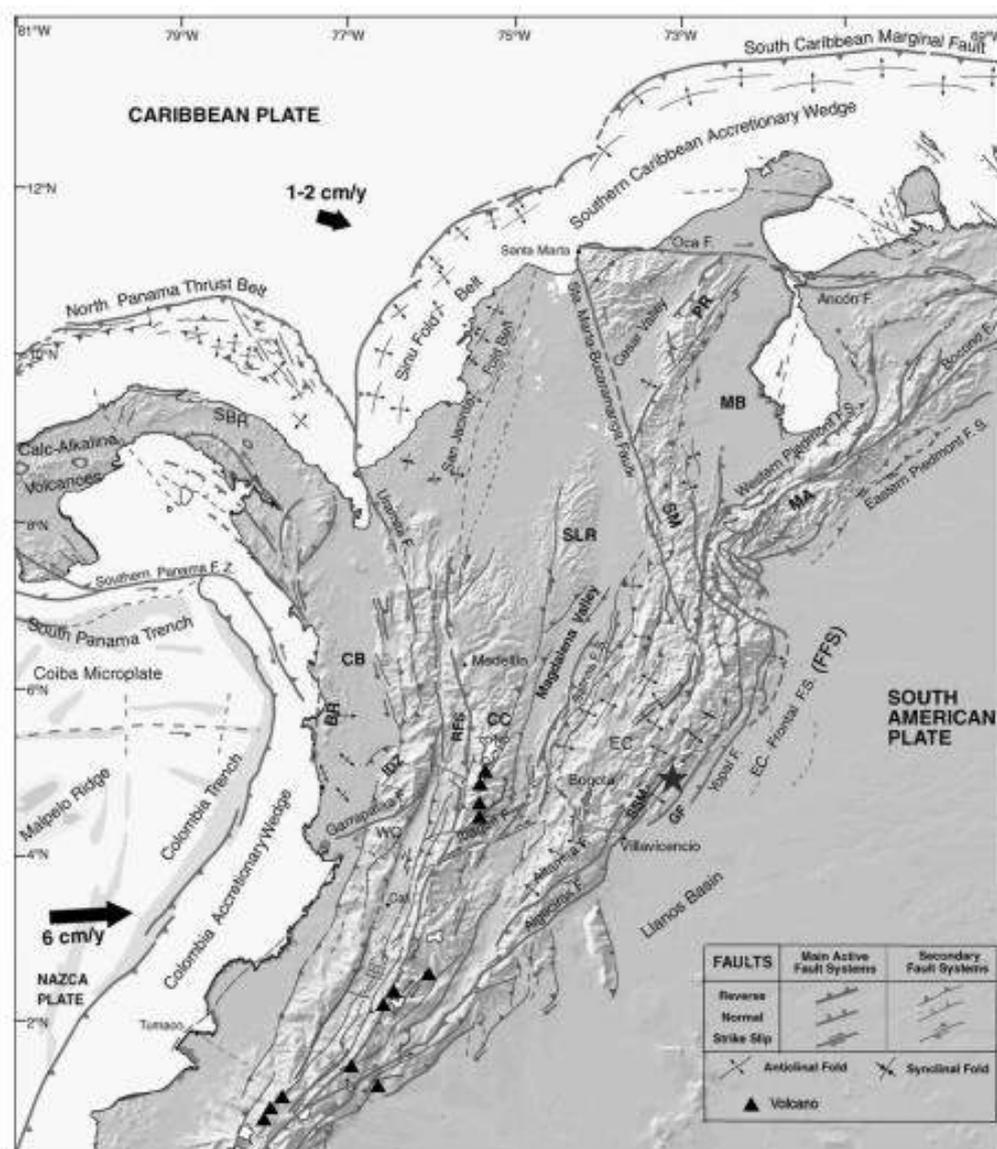


Figura 2.1. Mapa neotectónico de Colombia con los principales sistemas de fallas. CB: Bloque Panamá-Choco; WC: Cordillera Occidental; CC: Cordillera Central; EC: Cordillera Oriental; RFS: Sistema de Fallas Romeral; son los principales rasgos observables.

Fuente: Pulido, N., 2003.

2.1.2. Fallas Regionales

González (2001) afirma que la región oriental de Antioquia se ve afectada por dos grandes sistemas de fallas, que son aproximadamente perpendiculares entre sí. El primer sistema de fallas corresponde a las fallas de Palestina y Mulato, con dirección entre NNE – SSW. El segundo sistema de fallas lo comprenden las fallas Monteloro, Otú, Nare, Nus, Bagre, Balseadero y El Bizcocho y poseen una dirección aproximada NW – SE a E – W. González (2001) divide a estas fallas en dos sistemas únicamente por la dirección casi perpendicular que éstas poseen, pero en general se las suelen considerar dentro del mismo sistema de Palestina.

El sistema de fallas de Palestina (Figura 2.2) presenta un rumbo general de N 10° a 20° E. Las fallas correspondientes a este sistema son: Palestina, Nus, Norcasia, San Diego, Mulato, Jetudo, Cocorná, Cimitarra, Bagre y Otú. Este sistema abarca aproximadamente 500 km de longitud y corta la esquistosidad regional y las litologías entre la parte media de la Cordillera Central hasta la estribación oriental, dentro del Valle de Magdalena en la parte occidental de Puerto Berrío (González, 2001).

La Falla Palestina es una falla de rumbo con movimiento dextral que se encuentra inactiva. Comprende más de 350 km de longitud en los terrenos ígenos y metamórficos de la parte norteña de la Cordillera Central. En estos grandes sistemas de fracturamiento existen otros menores, que suelen ser paralelos a los sistemas principales en forma oblicua, formando sistemas denominados “Cola de Caballo”, muy comunes en la Falla Palestina (Feininger, 1970).

En la parte oeste del sistema de Palestina se encuentra la Falla Otú, la cual según Feininger (1970), es una falla regional importante que se une con la Falla Palestina 6,3 km al sureste del poblado La Susana. Esta falla corresponde a un límite geológico notable, ya que separa bloques de geología y litología casi totalmente distintos. Esta relación sugiere que la Falla Otú es una falla de rumbo con gran desplazamiento. La única litología común en ambos lados de la falla es la diorita, la cual sugiere un desplazamiento sinistral que puede exceder los 70 km. La Falla de Otú define el límite oriental del Terreno Tahamí (Toussaint, 1993) y se interpreta como la línea aproximada de una zona de acreción. Paris y otros (2000) aseguran que la Falla Otú presenta

un rumbo aproximado de $N 13,4^{\circ} W \pm 8^{\circ}$ con un buzamiento probablemente alto hacia el este.

La Falla de Cimitarra es una falla larga con dirección hacia el noreste, la cual muere en el bloque este de la falla de Palestina. Las expresiones topográficas sugieren que también es una falla transcurrente. Su desplazamiento puede ser pequeño, ya que la diorita ocupa ambos lados de la falla (Feininger, 1970). En la parte nororiental la falla está cubierta por depósitos aluviales jóvenes de la parte media del valle del Magdalena (Correa & Alfaro, 2011). La longitud de la falla es de 136,7 km, con un rumbo promedio de $N 37^{\circ} E \pm 3^{\circ}$ y un sentido de movimiento inverso sinistral (Paris y otros, 2000).

La expresión topográfica hacia el sur, seguida por el Río Nus, sugieren que la Falla Nus puede corresponder a una falla transcurrente (Feininger, 1970), con un movimiento inverso sinistral y una longitud de 80 km (Correa & Alfaro, 2011). La Falla Nus es más antigua que la falla Otú, ya que la trunca bruscamente en el Río Samaná (Correa & Alfaro, 2011).

Page (1986) afirma que la Falla Bagre se trata de un ramal occidental de la Falla Palestina. Según Correa & Alfaro (2011),

2.1.3. Plegamientos Regionales y Menores

Feininger y otros (1972) reconocieron al oeste de la Falla Otú algunos plegamientos regionales, gracias a la distribución de las facies de metamorfismo regional en afloramientos de mármoles y cuarcitas. También afirmaron que existen pliegues menores que varían en su amplitud, desde algunos metros hasta una fracción de milímetro. Pocos plegamientos regionales se encuentran en la parte sur oriental de la región antioqueña, esto debido a los desplazamientos originados por grandes fallas de rumbo y a los neises intrusivos en el área.

2.1.4. Geomorfología

González (2001) asegura que en la región de Antioquia resaltan 5 accidentes geomorfológicos: el Valle del Río Antrato y Región de Urabá, la Cordillera Occidental, el Cañón del Río Cauca, la Cordillera Central y el Valle del Río Magdalena. Estos últimos dos son los que se encuentran más próximos a la región de estudio y se resaltan en la Figura 2.3.

La Cordillera Central (Figura 2.3) se encuentra comprendida entre los valles del Río Cauca al occidente y del Río Magdalena al oriente. Su basamento según Villagómez y otros (2011), está

constituido por granitoides del Paleozoico Inferior, regionalmente metamorfoseados. De acuerdo a Taboada y otros (1998), el carácter volcánico de la cordillera está directamente asociado al proceso de subducción de sedimentos marinos, a lo largo del margen convergente de Nazca y Sudamérica, al occidente de Colombia.

Al Norte limita con el Bajo Cauca donde pierde altura y desaparece, hacia el oriente se prolonga en un ramal angosto y de baja altura. Está dividida en dos ramales principales por el Río Porce, desde su nacimiento en la Cuchilla de San Miguel (2.400 m.s.n.m.) hasta su desembocadura en el Río Cauca al norte de la región antioqueña. Hacia el norte, a lo largo de unos 100 km, el ramal tiene una cresta angosta y sus vertientes son de pendientes que van de fuertemente quebradas (50%) a escarpadas (75%), con alturas que oscilan entre los 2.500 y 3.000 m.s.n.m. Desde aquí en adelante, la divisoria disminuye su altitud y la vertiente varía su pendiente a fuertemente ondulada (25%). Existe un predominio de colinas bajas, alargadas, disectadas y erosionadas hacia el Valle del Río Magdalena (González, 2001).

Por su parte, el Valle del Río Magdalena (Figura 2.3) se encuentra ubicado en la parte oriental de la región de Antioquia. Posee unos

200 km de longitud y unos 100 km de ancho. La estructura correspondiente a la vertiente oriental de la Cordillera Central es compleja y está limitada en el piedemonte por una serie de fallas. Una faja angosta, de unos 10 km de ancho, bordea la parte occidental del Río Magdalena, donde existen zonas planas y colinas bajas. Hacia el noreste, el valle se amplía formando zonas de ciénagas (González, 2001).

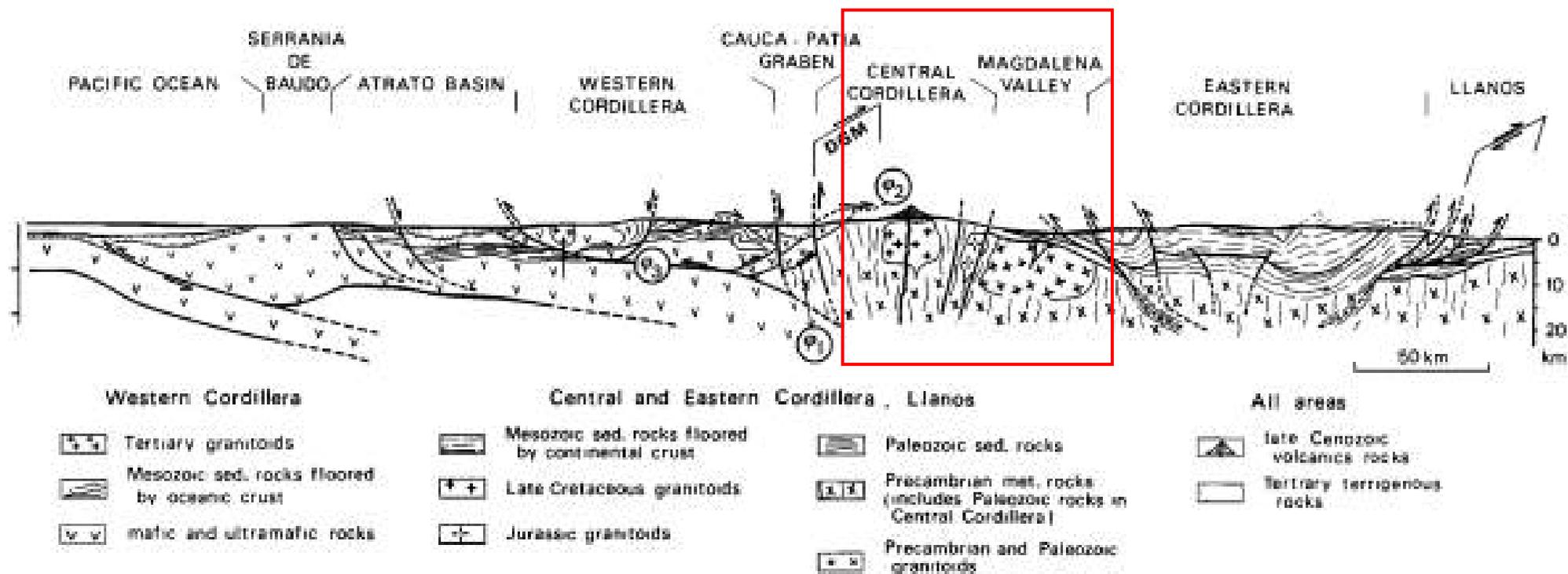


Figura 2.3. Sección cruzada de los Andes colombianos. Recuadro rojo muestra la región de estudio.

Fuente: Megard, F., 1987.

2.1.5. Hidrografía

La región antioqueña de acuerdo con González (2001) posee 3 cuencas hidrográficas bien diferenciadas. Las cuencas del Mar Caribe, del Río Cauca y del Río Magdalena son las que conforman la hidrografía de esta región, siendo la última, la que se involucra en la zona de estudio.

González (2001) afirma que la Cuenca del Río Magdalena recibe todas las aguas que se desplazan por la vertiente oriental de la Cordillera Central. Los ríos de esta cuenca en sus nacimientos forman valles profundos, estrechos y en V, debido a su acomodo y a la intensa erosión del Río Magdalena; mientras que en su desembocadura corresponden a tramos relativamente planos, con valles amplios formados en zonas de inundación. Sus principales afluentes son los ríos Nechí, Samaná, San Bartolomé, Ité, Cocorná y La Miel, y a su vez, los mayores tributarios de éstos son los ríos Nare, Porce, Bagre, Claro, Guatapé, Manso, Nus y Volcán (Feininger y otros, 1972).

2.1.6. Litoestratigrafía

2.1.6.1. Neises cuarzo-feldespáticos de San Lucas (Proterozoico)

Constituye una franja de 50 km en sentido norte – sur con un ancho promedio de 10 km que se prolonga desde la serranía de San Lucas al norte hasta el suroeste de Puerto Berrío (Bogotá & Aluja, 1981). Estas rocas están predominadas por neises cuarzo-feldespáticos en los cuales se encuentran lentes de anfibolita y mármol (Feininger y otros, 1972), limitadas al occidente por la Falla Otú y al oriente, norte y sur cubierta por sedimentos del Neógeno del Valle del Magdalena; siendo el protolito de estas rocas muy variables según la zona como rocas plutónicas félsicas y rocas sedimentarias (González, 2001).

2.1.6.2. Formación La Cristalina (Ordovícico)

Las rocas de la Formación La Cristalina cubren un área de 45 km² y corresponden a lutitas negras a grises, limolitas síliceas negras y metareniscas feldespáticas con bancos intercalados de caliza. Hacia el oeste la rocas presentan un leve metamorfismo pero hacia el este presentan una

mayor recristalización con presencia de biotita metamórfica y rocas pelíticas clasificadas en filitas y esquistos finogranulares (González, 2001).

2.1.6.3. Neíses cuarzo-feldespáticos (Paleozoico)

Rocas metamórficas constituidas por néíses feldespáticos y alumínicos, cuya estructura varía entre esquistosa y néísica. Estas rocas constituyen la unidad metamórfica más abundante del flanco oriental de la Cordillera Central (Feininger y otros, 1972). El cuerpo principal de esta unidad con una dirección norte-sur va desde Liberia al norte y el límite con el Departamento de Caldas al sur, al noreste de Amalfi se encuentran afloramientos de esquistos cuarzo-sericíticos y cuarcitas, mientras que al este, el cuerpo está limitado por cuarcitas y el Batolito Antioqueño. Néíses feldespáticos afloran cerca de Toledo, y al este y noreste néíses lenticulares. Los néíses pertenecientes a esta unidad presenten una muy variable composición mineralógica debido a las condiciones de metamorfismo y a la variedad de las rocas sedimentarias originales (González, 2001).

2.1.6.4. Cuarcitas (Paleozoico)

Cuerpos de cuarcitas son muy distinguidos y abundantes en el flanco este de la cordillera central y al sur del departamento, identificadas en distintas unidades estratigráficas del Complejo Cajamarca (Feininger y otros, 1972). Estas cuarcitas varían desde maciza granoblástica de grano fino hasta esquistos heteroblástica, lo cual indica una amplia variación de los sedimentos originales y las condiciones de depositación. Los sedimentos originales variaron de arena a limos, con un contenido variable de arcillas; esto se evidencia en la composición mineralógica de las cuarcitas. La presencia de grafito les da una tonalidad oscura a estas rocas (González, 2001).

2.1.6.5. Mármol (Paleozoico)

Cuerpos de mármoles localizados principalmente en el flanco oriental de la Cordillera central y al sur de Santa Bárbara cubren un área aproximada de 130 km². La mayor parte de estas rocas se encuentran seccionados en 3 bloques tectónicos: uno al oeste de la Falla Otú, desde la Susana hasta el sur de la Falla Palestina; y los otros dos al oriente de esta falla, desde su intersección con la Falla

Otú hacia el suroeste en el Valle del Magdalena cubiertos por sedimentos de la Formación Mesa (González, 2001). Los cuerpos de mármol están constituidos por rocas granoblásticas, sacaroidales de grano medio a grueso y color gris oscuro, casi negro debido al contenido de grafito diseminado y en polvo como escamas gruesas, a blanco (Feininger y otros, 1972).

2.1.6.6. Volcánico de La Malena (Jurásico)

Cuerpos de rocas volcánicas félsicas de edad Jurásico Medio a Superior y de textura porfídica afloran al oriente del Departamento de Antioquia, al este de la falla Otú (Feininger y otros, 1972). Estas rocas la conforman dos cuerpos: el occidental de 17 km de longitud, en sentido norte-sur y entre 2 y 7 km de ancho separados del segundo cuerpo por el batolito de Segovia hacia el este, con una longitud de 12 km en sentido NE y un ancho promedio de 2 km, constituidos por flujos volcánicos, riolíticos a riodacíticos, brechas volcánicas y tobas hacia la parte superior del conjunto donde también se evidencia abundantes diques basálticos, lamprófidos, pórfidos andesíticos y traquíticos (González, 2001).

2.1.6.7. Batolito de Segovia: diorita (Jurásico)

El Batolito de Segovia se encuentra ubicado en el flanco este de la Cordillera Central. Se extiende al norte del Departamento de Antioquia hasta la Serranía de San Lucas en el Departamento de Bolívar (Ballesteros, 1983; Kassem & Arango, 1977). Constituye un cuerpo alargado de 760 km² con una longitud de 270 km y un ancho de hasta 50 km, intruyendo los neises cuarzo feldespáticos del proterozoico, conformado principalmente por dioritas. Sin embargo se observan amplias variaciones en su composición y textura evidenciándose en dioritas cuarzosas a rocas más básicas como gabros hornbléndicos (González, 2001).

2.1.6.8. Sedimentitas (Cretácico)

Secuencia estratigráfica localizada al este de la Falla Otú y de la población de Segovia, constituida principalmente por lutitas carbonosas color negro intensamente plegadas, fracturadas y cizalladas, con estratificación vertical a subvertical, en intercalación con limolitas, areniscas, conglomerados con fragmentos de lutita negra. (González, 2001). La mayoría de las lutitas están finamente

laminadas, presentando un brillo filítico en ciertas zonas donde es difícil distinguirlas de los esquistos cuarzo-sericíticos o cuarcitas laminadas, que subyacen a las sedimentitas (Feininger y otros, 1972).

2.1.6.9. Formación Mesa (Mioceno - Plioceno)

Sedimentos consolidados ubicados al oriente del Departamento de Antioquia, en el Valle del Magdalena. Se encuentra conformada principalmente por sedimentitas poco consolidadas o sólo débilmente cementadas, predominantemente conglomerados, areniscas y limolitas (González, 2001).

depósitos fluviales cuaternarios, y los depósitos calcáreos a los mármoles del Complejo de Cajamarca.

En el DM de Puerto Nare (Figura 2.5) la minería más notable la comprenden las reservas en miles de millones de toneladas de mármoles y calizas de las zonas de Puerto Nare, Río Claro y Alicante. En Puerto Berrío destaca en menor grado los filones epitermales de Au y Ag, encajados en las dioritas del Batolito de Segovia y constituidos por cuarzo lechoso, pobre en sulfuros y con oro libre, en un ambiente de neises feldespáticos precámbricos (González, 2001).

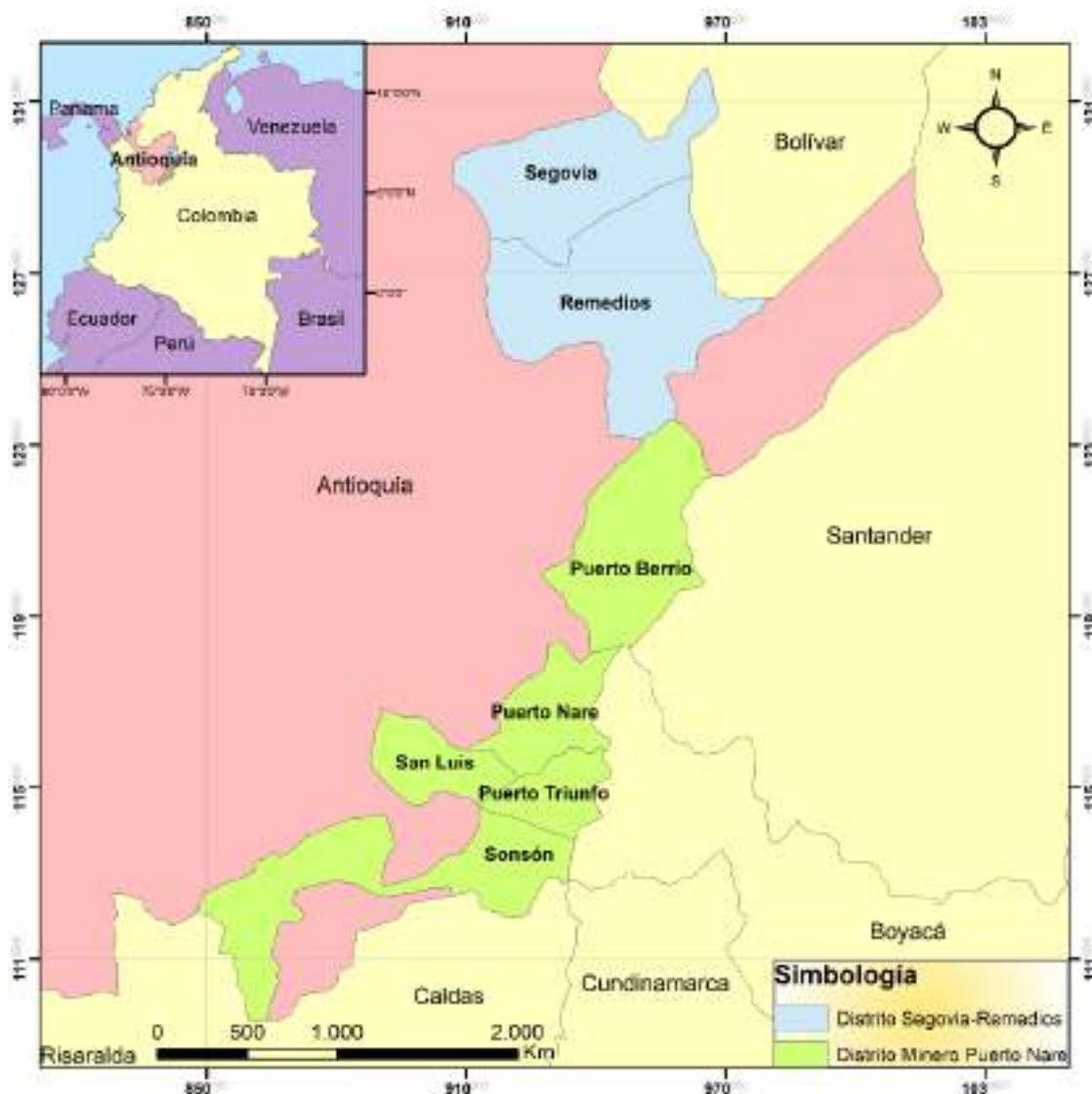


Figura 2.5. Ubicación de los DM Segovia-Remedios y Puerto Nare.

2.2. Geología Local

El sector minero El Vapor se ubica en el terreno Chibcha (Restrepo & Toussaint, 1988), al este del sistema de fallas de Palestina y de la falla Otú. El relieve decrece progresivamente de oeste a este hacia el río Magdalena, y en una franja de 10 a 30 km de ancho al sur de Puerto

Berrío es de 100 m o menos (Feininger y otros, 1972). Dentro del sistema de fallas de Palestina, las estructuras más representativas para el área El Vapor corresponden a las fallas transcurrentes El Bagre y Nus, colocando esta última el contacto entre las Sedimentitas de Segovia con el Batolito de Segovia (Dorado Montalvo, 2012).

Las rocas aflorantes en el área El Vapor corresponden a rocas metamórficas proterozoicas denominadas neises cuarzo – feldespáticos, el Batolito de Segovia y las rocas sedimentarias denominadas Sedimentitas de Segovia (Dorado Montalvo, 2012), litológicamente predominadas por un *shale* carbonoso de color negro estratificado con limolitas, areniscas, conglomerados intraformacionales (González, 2001). Estudios petrográficos realizados por Dorado Montalvo (2012) muestran que estos *shales* carbonosos están compuestos principalmente por una matriz de color oscura bituminosa, en ocasiones transformada a grafito.

Las Sedimentitas de Segovia presentan una tendencia principal en rumbo entre N10W y N20E, con inclinación subvertical, con presencia de pliegues anticlinales asimétricos apretados, que dan cuenta de un régimen principalmente compresivo (Dorado Montalvo, 2012). Según Proingecom (2003), es en los *shales* carbonosos donde se encuentran emplazados los cuerpos mineralizados, sin embargo trabajos realizados

por Dorado Montalvo (2012) indican que las mineralizaciones se presentan tanto en las rocas sedimentarias, como en las rocas correspondientes al Batolito de Segovia, y estableció que existe un control de mineralización mixto relacionado principalmente a las zonas de debilidad de los planos de estratificación de las sedimentitas y estructural relacionados a zonas de fracturas y cizallamiento.

El Vapor corresponde a un depósito de Oro de origen Orogénico (Bohlke, 1982; Goldfarb y otros, 2005; Groves y otros, 1998), esto se evidencia en la ausencia de magmatismo, el tipo de roca de caja, la morfología de las estructuras mineralizadas que se presentan como venas discontinuas, anastomosadas y sigmoidales; además de su cercanía a la Falla Nus, la cual controla la mineralización de la zona donde afloran rocas metamórficas proterozoicas denominadas neises cuarzo – feldespáticos (Bogotá & Aluja, 1981).

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1. Datos disponibles y revisión bibliográfica

Consistió en el análisis y recopilación de estudios previos referentes a la zona de estudio e información geológica del sector. Se han analizado publicaciones referentes a mineralogía aplicada, identificación de tipo de refractariedad en depósitos auríferos, análisis del efecto *preg-robbing* en menas auríferas, metalurgia, publicaciones referentes al marco geológico colombiano, entre otros. Mapas y documentos sobre la geología de la zona fueron obtenidos del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Información cartográfica disponible fue descargada en el portal web del IGAC.

Información técnica y geológica de la mina El Dólar fue proporcionada por parte de la sociedad minera ECO-DESARROLLOS MINEROS S.A.S.

3.1.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Datos de microscopía electrónica de barrido realizados por Valdivieso (2017) para su estudio de diseño de tratamientos metalúrgicos para menas refractarias fueron proporcionados para este trabajo. Él ha realizado 3 análisis puntuales tanto de material de cabeza como concentrados. Para este estudio, el enfoque principal se centró en los resultados del material de cabeza de la mina El Vapor, mostrados en las Tablas II, III y IV.

Tabla II. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual 1.

Elemento	Porcentaje Peso	Porcentaje atómico
<i>C</i>	3.70	6.43
<i>O</i>	39.14	51.14
<i>AL</i>	2.88	2.23
<i>SI</i>	53.30	39.67
<i>K</i>	0.99	0.53

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Tabla III. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual 2.

Elemento	Porcentaje peso	Porcentaje atómico
<i>C</i>	9.47	15.28
<i>O</i>	44.91	54.37
<i>Na</i>	0.34	0.28
<i>Mg</i>	0.39	0.31
<i>Al</i>	14.77	10.61
<i>Si</i>	22.43	15.47
<i>S</i>	0.98	0.59
<i>K</i>	5.11	2.53
<i>Fe</i>	1.60	0.56

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

Tabla IV. Porcentaje de elementos presentes en análisis puntual 3.

Elemento	Porcentaje peso	Porcentaje atómico
<i>C</i>	7.84	13.95
<i>O</i>	33.23	44.4
<i>Na</i>	0.29	0.27
<i>Mg</i>	0.55	0.48
<i>Al</i>	16.46	13.04
<i>Si</i>	25.76	19.61
<i>S</i>	2.93	1.95
<i>K</i>	8.29	4.53
<i>Fe</i>	8.29	1.78

Fuente: Valdivieso, P., 2017.

3.2. Trabajo de campo

3.2.1. Levantamiento de datos en superficie

Consistió en el levantamiento de datos geológicos del sector minero El Vapor, con el fin de evaluar y comparar la información recolectada en campo con información bibliográfica y datos disponibles. Se realizaron 16 estaciones geológicas enfocadas principalmente en el reconocimiento litológico del sector e identificación de estructuras, las cuales fueron distribuidas a lo largo de los títulos mineros T1936005 Y T1928005 pertenecientes a la sociedad minera ECO-DESARROLLOS MINEROS S.A.S., llegando hasta el sector de la mina La Menez, ubicada fuera de los títulos mineros mencionados, aproximadamente 2 km al sur de la mina Raudal.

3.2.2. Levantamiento de datos dentro de mina

La información recolectada en esta fase se la obtuvo mediante el levantamiento de datos litológicos y estructurales en las galerías de las minas pertenecientes al proyecto minero de ECO-DESARROLLOS MINEROS S.A.S., denominadas El Dólar y Raudal. Se realizaron 60 estaciones geológicas entre ambas minas (39 en la mina Raudal y 21 en El Dólar), donde se

recogieron un total de 15 muestras de mano, con el fin de realizar los ensayos para obtener un amplio conocimiento mineralógico del depósito.

La mina El Dólar consta de 3 subniveles que intersecan diversas estructuras mineralizadas con una dirección preferencial NW-SE, en los cuales se hicieron avances tanto en las rocas sedimentarias del sector y diques. Las estaciones se realizaron en los subniveles 1 y 2, donde se tomaron 8 muestras pertenecientes a las vetas y roca caja, que principalmente consistía en rocas pertenecientes a las Sedimentitas de Segovia y diques. Se recorrieron las diversas labores de los niveles mencionados.

Por su parte, las estaciones realizadas en la mina Raudal corresponden a los subniveles 1, 2 y 3, donde se recolectaron 7 muestras, tanto de roca caja, como de las estructuras identificadas.

3.3. Trabajo de Laboratorio

3.3.1. Descripción Macroscópica de muestras de mano

La descripción macroscópica de muestras de mano se la realizó sobre la cara lisa que quedó en la roca luego del corte. Se describieron características tales como el color, textura, tamaño de los cristales, estructuras minerales y disposición de los mismos en las rocas. Para la identificación de minerales, se hizo uso de la lupa geológica y del lápiz de dureza. De esta manera se logró describir de manera breve las características de las rocas, e identificar los minerales principales que estas poseen, lo cual luego sería verificado con las láminas delgadas y probetas pulidas.

3.3.2. Elaboración y análisis petrográfico de láminas delgadas

Para la elaboración de láminas delgadas se utilizó la metodología sugerida por Castro Dorado (2015), que se indica en la Figura 3.1.

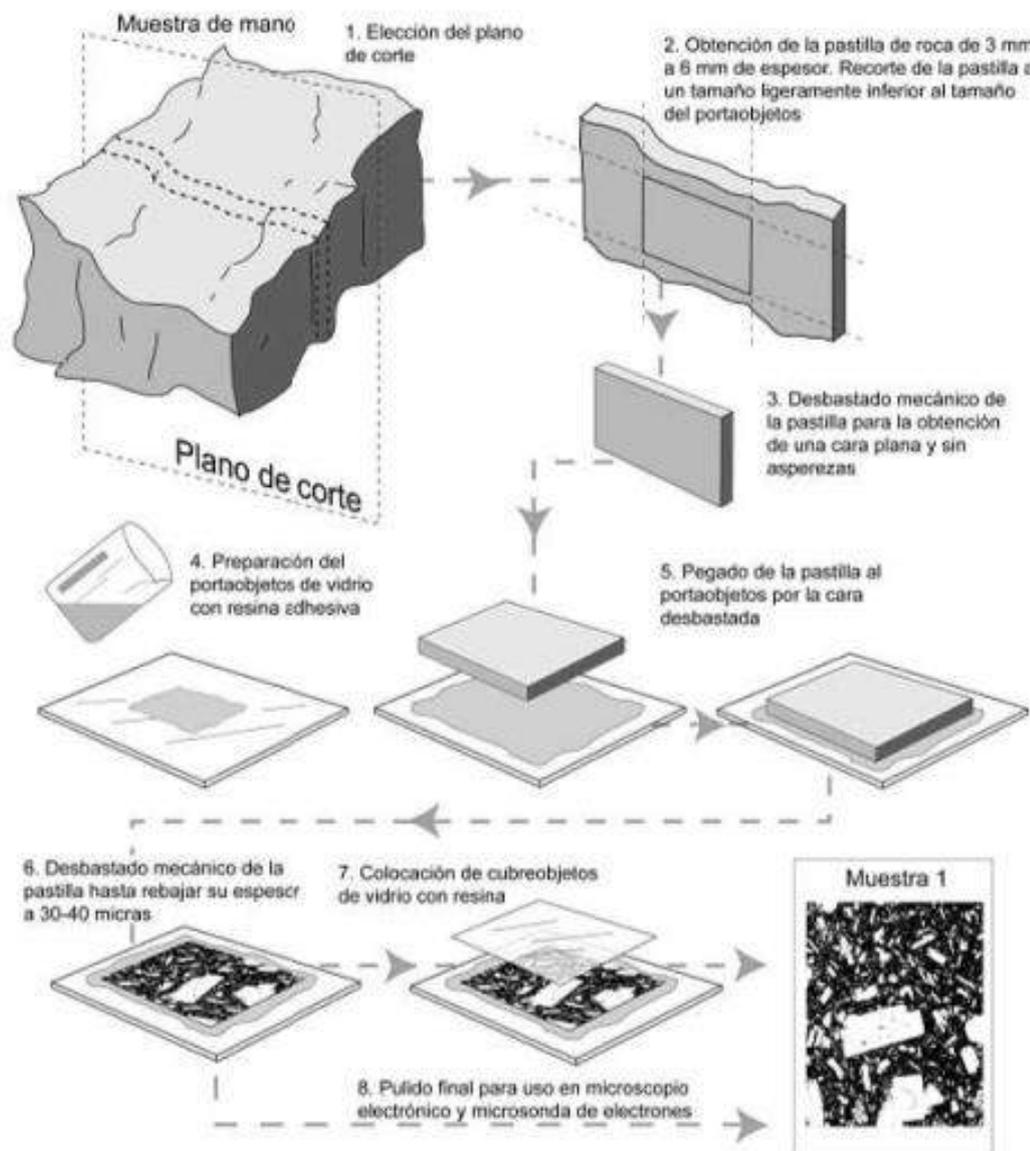


Figura 3.1. Pasos sucesivos para la elaboración de una lámina delgada a partir de una muestra de mano.

Fuente: Castro, A., 2015.

Se seleccionaron muestras de veta en su mayoría y algunas muestras de caja. Las muestras de veta escogidas presentaban una mineralización clara, marcada principalmente por pirita y cuarzo, además del material carbonoso presente en la roca caja.

Se procedió con el corte de las rocas con la ayuda del equipo Geoform (Figura 3.2), hasta llegar a un espesor adecuado de pastilla. Luego se pegó la pastilla en la sección delgada para darle el desbaste final con el mismo equipo Geoform, hasta obtener el espesor de 30 μm . De esta manera se obtuvo la lámina a analizar en el microscopio petrográfico. Las especificaciones del equipo usado en la elaboración de secciones delgadas se muestran en la Tabla V.



Figura 3.2. Equipo Geoform usado en el corte y desbaste de las secciones delgadas.

Tabla V. Especificaciones técnicas del equipo empleado en el corte y desbaste de las muestras.

Especificaciones	Metkon
Equipo	Geoform
Velocidad del disco de corte (rpm)	1400
Velocidad del disco abrasivo (rpm)	1400
Diámetro del disco de corte (mm)	200 – 250
Diámetro de la copa de abrasión (mm)	175
Reciculación de refrigeración (lt)	42
Potencia de la bomba de vacío (mm Hg)	650
Capacidad del mandril de vacío para la sección de corte (mm Hg)	1
Capacidad del mandril de vacío para la sección de desbaste (mm Hg)	2
Micrómetro digital	Sí
Potencia del motor (Hp)	550 W
Modelo	Mesa
Iluminación	Sí
Dimensiones WxDxH (cm)	53x75x42
Peso (kg)	83

Fuente: Senay., 2014.

Para el análisis de láminas delgadas, se determinan características como el color, pleocroísmo, relieve, birrefringencia, ángulo de extinción, etc., mediante el uso de técnicas en el microscopio de luz polarizada (Figura 3.3) indicadas por Castro Dorado (2015). De esta manera se identificaron los minerales principales correspondientes a la ganga del depósito, relacionados al carbón, así como también los minerales de alteración que se presentan en la zona. Las especificaciones del microscopio utilizado se observan en la Tabla VI.



Figura 3.3. Microscopio de luz polarizada empleado para el análisis de secciones delgadas.

Tabla VI. Especificaciones técnicas del microscopio usado en el análisis de secciones delgadas.

Leica DM2500 P	
Porta objetos	5 x (M25), centralizable
Objetivos	HI Plan POL PL Fluotar POL
	Inmersión de objetivos
Campo de visión útil	25 mm
Cambio	Manual
Luz transmitida	Contraste de polarización Ortoscopía Conoscopía Campo claro Fase de contraste DIC Campo oscuro
Luz incidente	Contraste de polarización Campo claro Campo oscuro DIC Fluorescencia
Conoscopía	Cubo de lente Bertrand

Leica DM2500 P	
Iluminación	12 V 100 W Lámpara halógena
Operación	Manual
Ejes de luz incidente	Manual
Condensadores	Cambio manual
Control de enfoque	Ajuste de altura manual
	Parada de focos, 2 o 3 caja de cambio

Fuente: Leica Microsystems., 2006.

3.3.2.1. Cuantificación mineralógica en rocas ígneas

Para la cuantificación de minerales primarios y secundarios presentes en las láminas delgadas se usó el software de libre acceso ImageJ. El método consiste en distinguir los minerales presentes para la creación de una imagen binaria correspondiente a cada tipo de mineral, la cual el programa se encarga de convertirla a una imagen a escala de grises y realizar la cuantificación, mostrando el porcentaje de área que ocupa cierto mineral respecto al área total de la imagen (Figura 3.4).

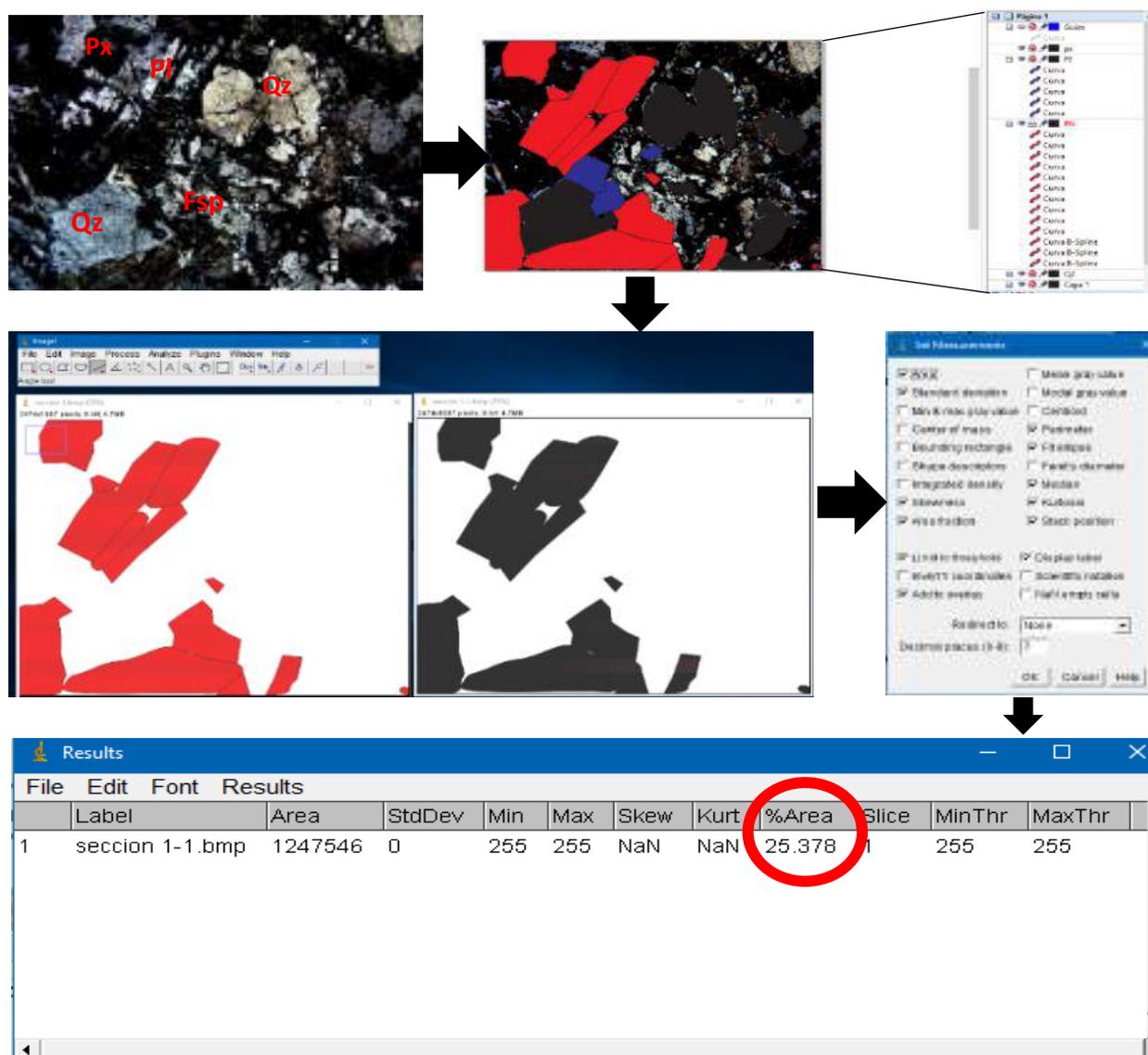


Figura 3.4. Proceso de cuantificación para porcentajes de minerales componentes de la roca.

3.3.3. Elaboración y análisis de secciones pulidas

La elaboración de probetas pulidas se la hizo a partir de las mismas muestras de veta seleccionadas para la elaboración de láminas delgadas. El procedimiento es similar al de láminas delgadas. Siguiendo la metodología descrita por Kehl (1954), se

realizó primeramente el cortado de la roca con el equipo Geoform de la Figura 3.2, hasta llegar a un espesor adecuado. Luego de esto, se efectuó el pulido de la sección de vidrio para pegar la galleta obtenida en el corte. Por último, se le dio el desbaste y pulido final con la ayuda del equipo Forcimat, expuesto en la Figura 3.5, para de esta manera obtener la probeta pulida a analizar en el microscopio. Las especificaciones del equipo empleado se muestran en la Tabla VII.



Figura 3.5. Equipo Forcimat empleado en el pulido final de las secciones pulidas.

Tabla VII. Especificaciones técnicas del equipo empleado en el pulido final de las muestras.

Equipo	Forcimat	Forcimat TS
Aplicación de la fuerza	Individual	Individual
Fuerza (N)	5 – 60	5 – 60
Velocidad (rpm)	50 – 150	35
Dirección de rotación	CW/CCW	CW
Monitor	DP	DP
Lubricador de goteo automático	Estándar	Estándar
Dimensiones WxDxH (cm)	23x43x25	23x43x25
Peso (kg)	16	16
Potencia del motor (Hp)	100 W	100 W
Suministro de aire	6 Bar	6 Bar

Fuente: Senay., 2014.

El análisis de probetas pulidas comprende el uso de técnicas y determinación de propiedades en el microscopio de luz transmitida/reflejada (Figura 3.6), descritas por Marshall y otros (2004), para identificar y caracterizar los minerales opacos especialmente, que aparecen sobre todo en la mena de la zona y los relacionados al carbón.



Figura 3.6. Microscopio de luz transmitida/reflejada empleado para el análisis de secciones pulidas.

Para la etiqueta de los minerales identificados, tanto de mena en las secciones pulidas, como de ganga en las secciones delgadas, se utilizaron las abreviaturas propuestas por Siivola & Schmid (2007).

3.3.4. Difracción de rayos X y análisis de difractogramas

Se realizó un ensayo a la muestra GD-RA-05. Se llevó la muestra a un tamaño de grano adecuado ($< 20 \mu\text{m}$) usando el micronizador Vibratory McCrone durante 7 minutos. Los datos de difracción fueron recogidos en un rango de $5\text{-}80^\circ 2\theta$ en el difractómetro PANalytical XPert Pro, operado a 35 kV Y 40 mA.



Figura 3.7. Equipo PANalytical X'Pert Pro usado para la Difractometría de Rayos X.

El análisis del difractograma se lo realizó con los softwares X'pert highscore plus y Match! 3 y mediante revisión bibliográfica de los picos característicos de los minerales encontrados en la muestra, reconocidos anteriormente por petrografía. A través del análisis de las fases cristalinas presentes en la muestra, se logró determinar de manera cualitativa la mineralogía de la roca.

3.4. Trabajo de Gabinete

En esta última fase de la metodología se realizó el procesamiento y análisis de toda la información obtenida en las fases anteriores, con un enfoque principal en el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio

de este trabajo. Esta fase también consistió en la discusión de los resultados obtenidos, relacionando los mismos con otros trabajos realizados en la zona. Finalmente se dieron las respectivas conclusiones del trabajo, determinando con exactitud las características mineralógicas del proyecto El Vapor, así como sus minerales de mena y ganga, y sobre todo los causantes del fenómeno de *preg-robbing* que afecta al proyecto.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1. Geología de campo

4.1.1. Geología de superficie

Durante el trabajo elaborado en superficie (Figura 4.1) se realizaron 16 estaciones geológicas presentadas en el mapa adjunto en el Anexo B (ver sección de Anexos), en donde se levantaron datos litológicos, mediciones de rumbo y buzamiento de estratos y estructuras, con el fin de validar la información geológica recopilada de estudios y trabajos anteriores realizados en el sector.



Figura 4.1. Afloramiento de lutitas color marrón claro cerca de la mina La Menez.

A lo largo de la vía principal de la vereda El Vapor se reconocieron rocas ígneas de textura fanerítica, grano medio a grueso, color claro y con cierto grado de alteración, incluso presentando en ciertas zonas la destrucción de su textura original. Estas rocas corresponden al Batolito de Segovia, de edad Jurásica según el mapa geológico de la mina El Dólar, proporcionado por la sociedad ECO-DESARROLLOS MINEROS S.A.S. y elaborado por Urrea (2017).

Se identificaron dos unidades sedimentarias dentro de los límites de los títulos mineros pertenecientes a ECO-DESARROLLOS MINEROS S.A.S. y fuera de ellos, aproximadamente 2 km al sur de la mina el Raudal, en el sector de la mina La Menez.

Se reconocieron lutitas de color marrón muy claro a blanco, estratificadas centimétricamente con una dirección preferencial N40/50NW (Figura 4.2). En ciertas zonas se han encontrado lutitas con cierto grado de deformación, presentando superficies sedosas puesto que son áreas afectadas por alteraciones debido a la presencia de estructuras mineralizadas que cruzan el sector.



Figura 4.2. Lutitas de color marrón claro de textura arcillosa.

4.1.2. Geología dentro de mina

En base a las 60 estaciones geológicas realizadas entre las minas El Dólar y Raudal (Anexo C, D, E y F) se obtuvo un claro panorama de la naturaleza de estos depósitos, que según Dorado Montalvo (2012), corresponde a un depósito de origen Orogénico asociados al sistema de fallas Palestina y a la orogenia de la Cordillera Central.

Se identificaron múltiples estructuras mineralizadas que van en dirección NS aproximadamente, donde se evidenció que estas estructuras encajan en rocas sedimentarias y metasedimentarias correspondientes a las Sedimentitas de Segovia (Figura 4.3.A).

El trabajo dentro de mina permitió identificar que las estructuras mineralizadas están emplazadas en shales de color negro, en secuencia con lutitas de color café, que presentan un rumbo preferentemente NS. Las vetas se emplazan siguiendo el sentido de las estratificaciones, atravesando y rellenando sus planos. Las vetas están constituidas principalmente por cuarzo como mineral de ganga y pirita como mineral de mena, presentándose una de manera masiva granular con cristales milimétricos hasta centimétricos (Figura 4.3.B).

Se identifican amplias zonas con presencia de vetillas de cuarzo y stockworks, y tramos en donde las lutitas y los *shales* carbonosos se encuentran silicificadas debido a la gran mineralización que existe en el sector, tal como se muestra en la Figura 4.3.C.

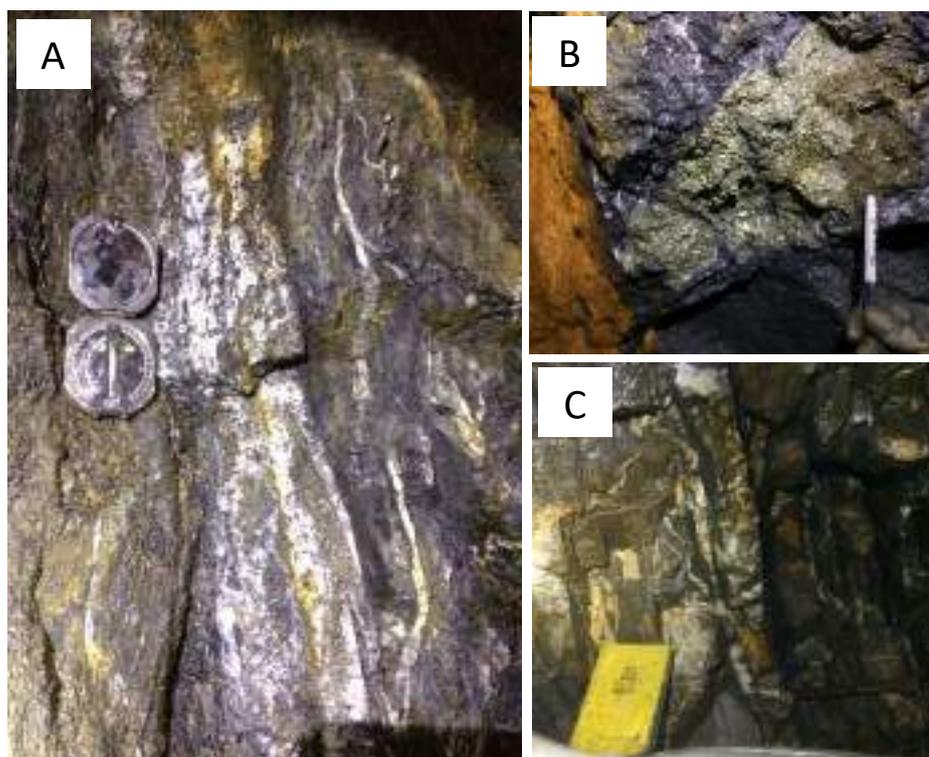


Figura 4.3. Levantamiento dentro de mina. A) Veta de Cuarzo y pirita encajada en los shales carbonosos. B) Veta de pirita en su totalidad. C) Unidades de lutita color marrón con presencia de vetillo y stockworks.

Rocas pertenecientes al Batolito de Segovia en contacto con los shales carbonosos fueron identificadas en las labores de la mina El Dólar, las cuales según González (2001) corresponden a dioritas y cuarzodioritas. Estas rocas están constituidas principalmente por cristales de plagioclasas y cuarzo, con cristales accesorios como piroxenos, anfíboles y biotitas. Estas rocas se encuentran afectadas por la mineralización de la zona, por lo que se evidencian vetillas de cuarzo, cristales de pirita diseminada,

minerales de alteración secundarios como clorita, epidota y minerales arcillosos.

Rocas diques de texturas afaníticas y porfídicas son interceptadas por las labores de las minas El Dólar y Raudal, presentando generalmente un cierto grado de mineralización, ya que se evidencia cristales de pirita diseminada dispersas en la matriz de estas rocas. En ciertas zonas se observa la matriz afectada por alteraciones, causadas por el emplazamiento de las vetas y los fluidos hidrotermales. Se pueden distinguir también minerales de alteración como la clorita, epidota, y en ciertas zonas parece notarse minerales de alteración fílica y argílica.

4.2. Caracterización petrográfica y mineralógica

4.2.1. Rocas encajantes

Como se ha mencionado en la sección 4.1, las rocas encajantes de las estructuras mineralizadas en el sector minero El Vapor corresponden a: rocas intrusivas del Batolito de Segovia, diques de textura porfídica y rocas pertenecientes a las Sedimentitas de Segovia.

Las rocas del Batolito de Segovia corresponden a rocas compactas de color gris, masivas, de textura holocristalina, fanerítica de grano medio (Figura 4.4.A).

A nivel microscópico se las caracteriza como rocas de textura hipidiomorfa, inequigranular, compuesta principalmente por cristales subhedrales de plagioclasa (200 – 600 μm), cuarzo (100 – 300 μm) con extinción ondulante y feldespatos (100 – 200 μm), como se puede evidenciar en la Figura 4.4.B. Existe también la presencia de minerales secundarios como augita (100 – 200 μm), anfíboles (100 – 200 μm), calcita (100 – 300 μm), pirita diseminada en un 2 % y cristales de zircón como mineral traza. Los cristales de plagioclasas presentan una textura secundaria debido a que se encuentran levemente alteradas a sericita, presentándose en ciertas zonas alteradas a illita. Cristales de piroxenos y anfíboles presentan una cloritización parcial a casi completa.

Mediante el método de cuantificación mineralógica que se ha realizado a 4 secciones de la lámina delgada correspondiente a la muestra GD-DO-01, de los minerales componentes de la roca (Cuarzo, Feldespatos y Plagioclasas), la cual se presentan en la Tabla VIII; se realizó el análisis en el diagrama de Streckeisen, el cual define la roca como una Tonalita (Figura 4.5).

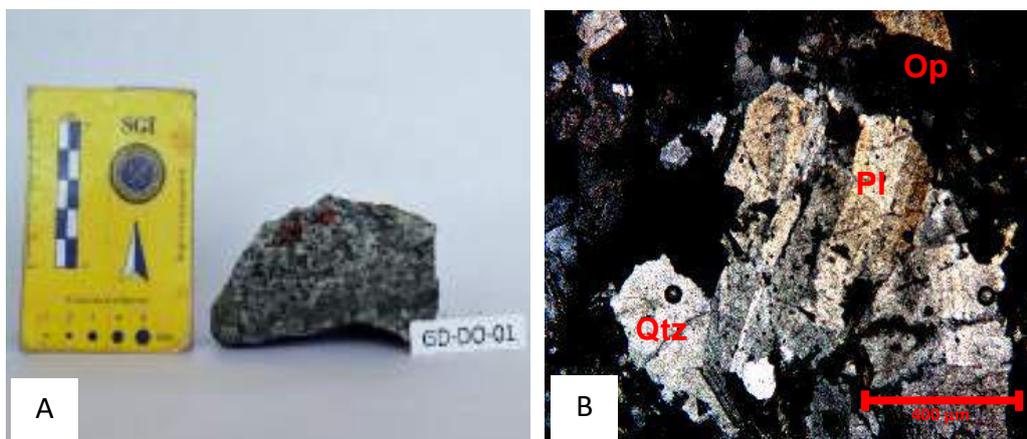


Figura 4.4. A) Muestra de mano perteneciente al Batolito de Segovia (GD-DO-01). B) Cristales de plagioclasas, cuarzo y feldespatos en sección delgada de la muestra GD-DO-01.

Tabla VIII. Cuantificación mineralógica de la muestra GD-DO-01.

	% Qtz	% Fsp	% Pl
Sección 1	17,230	2,803	25,378
Sección 2	6,16	6,126	33,176
Sección 3	21,9	2,24	27,738
Sección 4	10,709	1,971	44,772
Promedio Ponderado	27,971	6,563	65,466

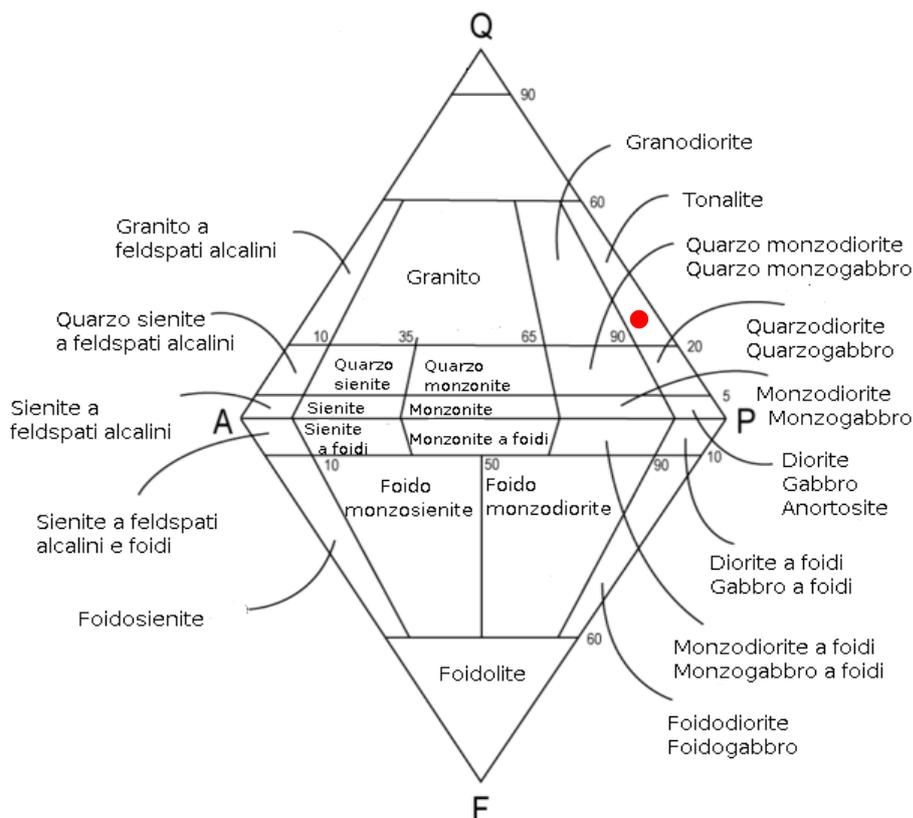


Figura 4.5. Diagrama de Streckeisen de la muestra GD-DO-01.

Rocas diques presentes en las labores de las minas El Dólar y Raudal, corresponden a rocas compactas de color gris claro, de textura tanto afaníticas como porfídicas, con alta presencia de alteración en fenocristales subhedrales de plagioclasas. El análisis de la sección delgada elaborada a la muestra GD-DO-04 (Figura 4.6), la caracteriza como roca ígnea holocristalina, porfídica, de matriz felsítica (compuesta por microcristales de feldespato y cuarzo), conformado por fenocristales anhedrales de plagioclasas de hasta 1 mm aproximadamente, destruidos en su totalidad,

presentando remantes de sus moldes y maclas originales. Estos cristales se muestran alterados a minerales como sericita e illita, presentando estos últimos colores de baja birrefringencia, tal como se puede evidenciar en la Figura 4.6.A,B. También se evidencian cristales de minerales secundarios como biotitas anhedrales alteradas y piroxenos subhedrales como mineral de traza, presentando cierto grado de cloritización. Presencia de opacos diseminados con una ocurrencia de >1% (Figura 4.6.B).

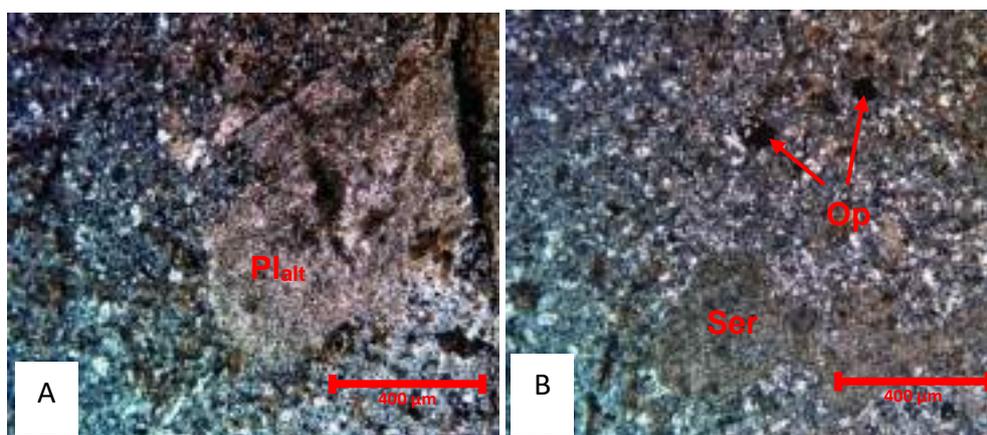


Figura 4.6. Sección delgada de la muestra GD-DO-04 vista en el microscopio de luz polarizada. A) Cristal de plagioclasa alterada en su totalidad a sericita-illita. B) Presencia de opacos y sericita evidenciando un alto grado de alteración.

Las rocas pertenecientes a las Sedimentitas de Segovia corresponden a unidades de lutitas color marrón y shales carbonosos según González (2001), como se muestra en la imagen de la Figura 4.7.A. El análisis de esta última permite clasificarla como roca metasedimentaria de grano fino, con

presencia de laminaciones paralelas, presentándose en ciertos sectores ondulaciones, como se evidencia en la Figura 4.7.C.

El análisis de la sección delgada correspondiente a la muestra GD-RA-05 permite observar una clara foliación con presencia de micropliegues (Figura 4.7.C). Se observa material micro detrítico, compuesto por cuarzo metamórfico y feldespatos generalmente alterados, con alta presencia de micas como moscovita en intercalación con material orgánico detrítico. Se observa cristales sub idiomorfos de clinocloro y presencia de clorita como relleno en las laminaciones (Figura 4.7.D).

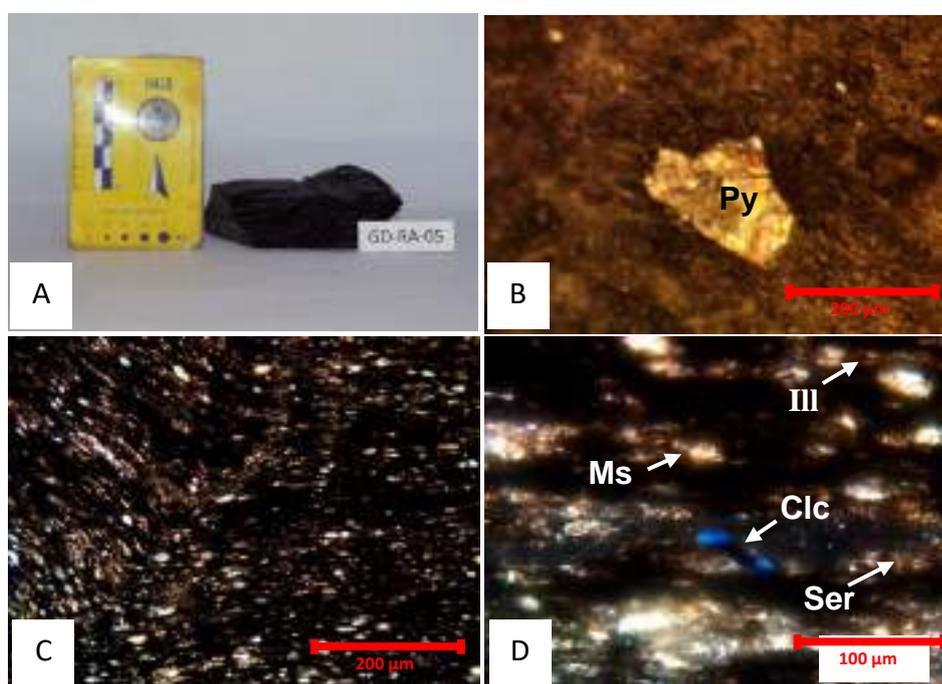


Figura 4.7. Lutita carbonosa correspondiente a la muestra GD-RA-05. A) Imagen macroscópica de la muestra. B) Grano sub idiomorfo de pirita visto en sección pulida de la muestra. C) Textura foliada que evidencia micropliegues vistos en sección delgada. D) Presencia de cristales de sericita (moscovita) e illita con un cristal de clinocloro.

4.2.2. Mineralogía de mena

El mineral principal de mena identificado en las estructuras mineralizadas de las minas El Dólar y Raudal corresponde a pirita, en donde se reconocieron dos tipos debido a sus variaciones texturales, tamaño de cristales y relación con otros minerales. En base a las características antes mencionadas se puede afirmar que se trata de dos generaciones de pirita.

Un tipo de pirita reconocida corresponde a cristales idiomorfos a subidiomorfos de entre 10 – 70 μm llegando a alcanzar ocasionalmente los 200 μm (Figura 4.8.B). Esta generación de pirita se encuentra asociado a la generación de cuarzo microcristalino y translúcido ubicados generalmente al tope y base de las estructuras mineralizadas de El Vapor. Es posible reconocer esta generación de pirita en las rocas encajantes que corresponden a las lutitas carbonosas pertenecientes a la Sedimentitas de Segovia (Figura 4.7.B), rocas del Batolito de Segovia y diques presentándose en asociación con sericita y cuarzo (alteración fílica).

Otro evento de pirita es identificado en las vetas presentes en la zona. Corresponde a cristales de pirita granular, de grano grueso, alotriomorfos a idiomorfos, presentándose éstas últimas bien cristalizadas con bordes bien formados. El tamaño de los cristales varía generalmente entre 200 μm hasta el milímetro, siendo muy común encontrar cristales que llegan hasta el centímetro (Figura 4.8.A). Esta generación de pirita está asociada con la generación de cuarzo lechoso masivo, encontrándose en ciertas zonas vetas compuestas casi en su totalidad por esta pirita. Cristales de otros minerales como calcopirita, esfalerita, galena y oro, mostrados en la Figura 4.8.A, son identificados como inclusiones sólidas dentro de los cristales de pirita de grano grueso, evidenciándose una formación singenética de estos minerales.

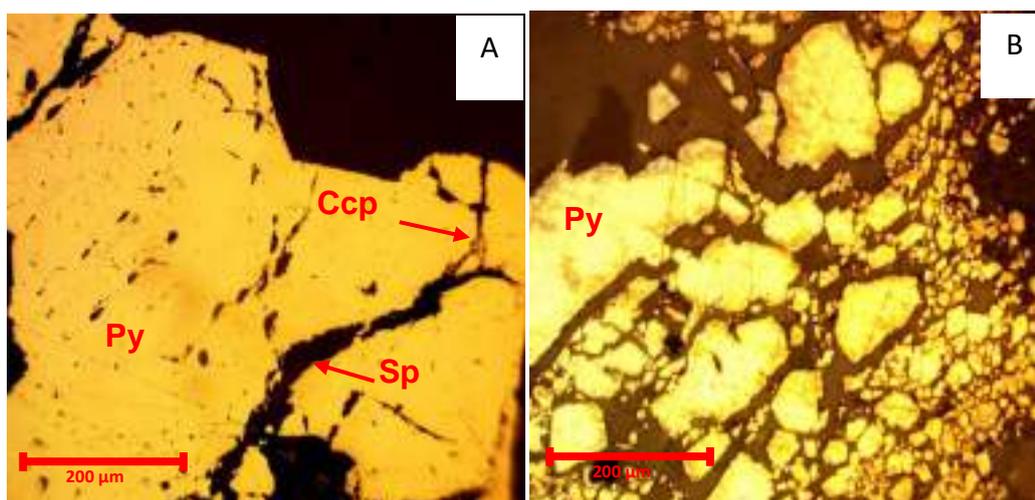


Figura 4.8. A) Pirita de grano grueso asociada al cuarzo masivo. B) Pirita de grano fino asociada al cuarzo microcristalino.

Cristales de calcopirita alotriomorfos con leve anisotropía están presentes como inclusiones sólidas en los cristales de pirita de grano grueso de van desde 10 – 30 μm y una segunda calcopirita se la identifica como relleno de fracturas con cristales de hasta 300 μm (Figura 4.9.B). De igual manera se identifican cristales de esfalerita en dos patrones estructurales, la primera como inclusiones sólidas de cristales alotriomorfos de hasta 50 μm y una segunda como relleno de fracturas entre los cristales de pirita gruesa y el cuarzo masivo, con cristales de hasta 400 μm (Figura 4.9.A). Presencia de cristales de galena, también se pudieron identificar como inclusiones sólidas en la pirita de grano gruesa de entre 20 – 40 μm .

Se identificaron muy pocos cristales de oro en esta zona, ya que las muestras recogidas correspondían a zonas donde se había extraído el material de mayor interés. El oro en las vetas presentes se lo encuentra como inclusiones sólidas con cristales anisotrópicos de alta reflectividad, de tamaños variables llegando hasta las 100 μm (Figura 4.9.A).

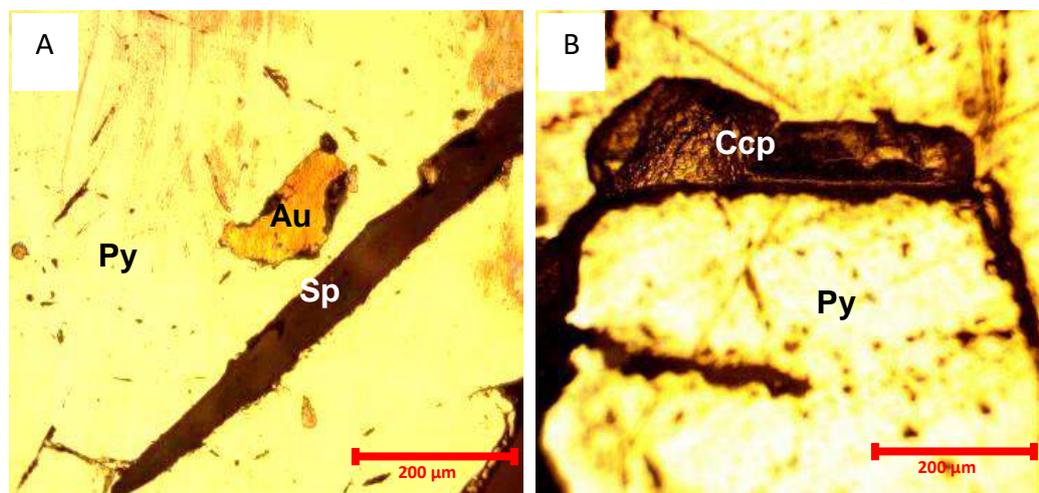


Figura 4.9. A) Cristal de oro como inclusión sólida sobre cristal de pirita gruesa. B) Calcopirita relleno de fractura entre cristales de pirita.

4.2.3. Mineralogía de ganga

La mineralogía de ganga presente en las minas El Dólar y Raudal corresponde en su mayoría a cuarzo, identificándose 2 eventos principales, uno principal de cuarzo lechoso masivo y un segundo de cristales de cuarzo microcristalino. Un tercer tipo de cuarzo se presenta como vetillas en conjunto con cristales de calcita.

Cristales de cuarzo microcristalino (Figura 4.10.B) se encuentran en menor proporción desarrollados en las estructuras mineralizadas presentes en el sector. Se presentan como cristales anhedrales de entre 5 – 40 µm, alcanzando en ocasiones los 100 µm. Este evento de cuarzo se encuentra localizado principalmente en contacto con el cuarzo masivo a la base y tope de las vetas y

como relleno de cavidades. Este evento de cuarzo se encuentra asociado principalmente a pirita de grano fino disseminada, con alta presencia de material carbonoso proveniente de las rocas cajas presentes.

El cuarzo masivo de grano grueso (Figura 4.10.B) es el mineral de ganga principal constituyente de las vetas en el sector minero el Vapor; aparece como cristales subhedrales y anhedrales de 100 a 200 μm , llegando a alcanzar en ocasiones el milímetro. Los cristales de cuarzo masivo presentan extinción recta y ondulante, lo cual evidencia un post evento de deformación. Este evento de cuarzo se encuentra asociado a cristales de pirita de grano grueso.



Figura 4.10. A) Imagen macroscópica de la muestra de veta GD-DO-06. B) Imagen microscópica de la muestra en sección delgada bajo luz polarizada.

Cristales de cuarzo se evidencian comúnmente en vetillas que se encuentran cortando las vetas principales (Figura 4.10.A) y como relleno de fracturas formando comúnmente drusas milimétricas, lo cual indica que corresponde a un evento posterior a los dos tipos de cuarzo mencionados anteriormente. Este tipo de cuarzo incluye cristales subhedrales de hasta 200 μm , con extinción recta, originando un crecimiento en la parte central de las vetillas.

La presencia de calcita señalada en la Figura 4.11, corresponde a un evento tardío, debido a que se presentan con vetillas que cruzan las estructuras mineralizadas de las minas y como relleno de fracturas. Los cristales se observan euhedrales a subhedrales, que alcanzan los 500 μm , con una exfoliación bien marcada.

Es común observar cristales de calcita en las rocas pertenecientes al batolito de Segovia y diques, en asociación con cristales de clorita y epidota.

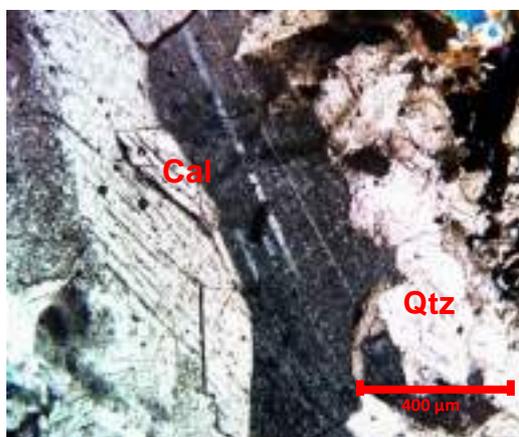


Figura 4.11. Cristales de calcita idiomorfa presente en vetillas.

4.3. Análisis de difracción de rayos X (DRX)

Mediante el análisis de difracción de rayos X a la muestra GD-RA-05, se identificaron las fases minerales constituyentes de esta roca. En el difractograma de la Figura 4.12, se reconocen los picos principales del cuarzo e illita, como minerales en abundancia existentes. La muestra presenta minerales micas como la moscovita y clinocloro, y contenido de microclina como el feldespato principal. Se identifica un pico de carbón en la muestra, lo que demuestra que existen fases de grafito con su estructura cristalina definida.

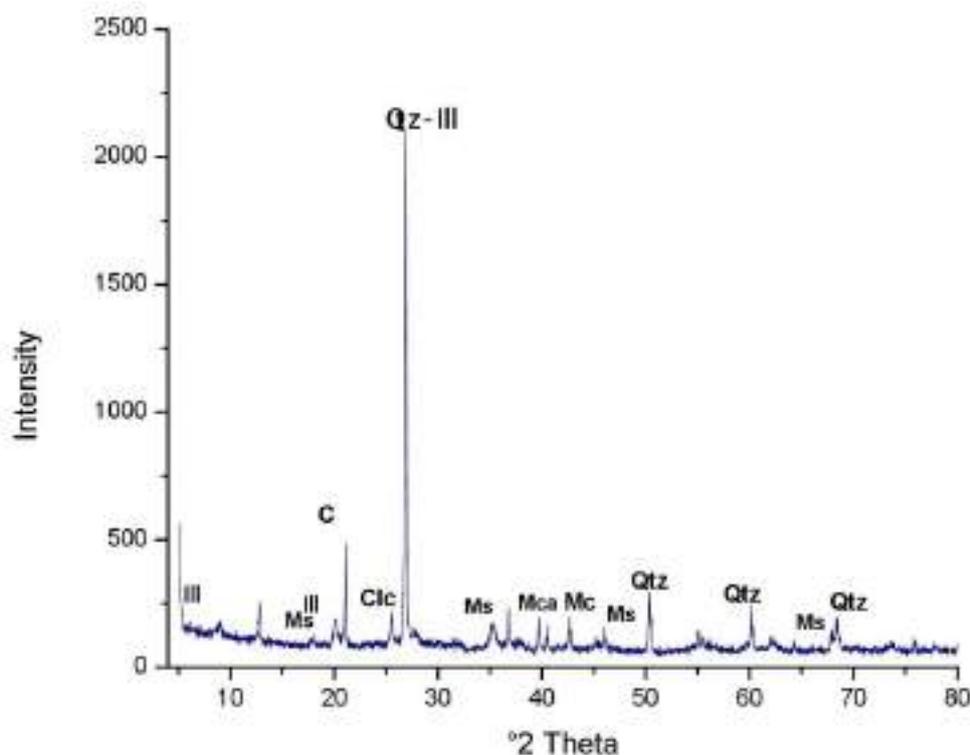


Figura 4.12. Difractograma de la muestra GD-RA-05.

La Tabla IX muestra los minerales principales reconocidos en el difractograma en un orden descendente cualitativo, es decir de más presente a menos presente.

Tabla IX. Lista de minerales principales identificados en el difractograma de la muestra GD-RA-05.

Mineral	Fórmula química
Cuarzo	SiO_2
Illita	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$
Grafito	C
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
Clinocloro	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Al}((\text{OH})_8/\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$
Microclina	KAlSi_3O_8

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Evaluación geológica de trabajo de campo

Las rocas que afloran en el sector minero El Vapor, desde la mina El Dólar hasta la mina La Menez, corresponden principalmente a las Sedimentitas de Segovia y a rocas pertenecientes al Batolito de Segovia. Se han reconocido dos unidades litológicas pertenecientes a estas sedimentitas de Segovia, una de lutitas color marrón con presencia de brillo sedoso y estratificación casi vertical, en donde en ocasiones se ha identificado material carbonoso, probablemente provenientes de los shales carbonosos que se encuentran a profundidad.

Una segunda lutita color marrón claro a blanco en ciertas zonas, producto de la presencia de minerales arcillosos en su composición también es reconocida en la zona. Estos minerales arcillosos están presentes posiblemente por la muy alta presencia de estructuras mineralizadas y vetas en la zona, por lo que puede ser interpretado como una guía de mineralización, posiblemente tratándose de un halo de alteración argílica.

La ocurrencia de estructuras mineralizadas o vetas encontradas en superficie es alta, por lo que se han identificado zonas en donde las rocas presentan una mayor dureza y competencia, ya que son zonas donde la roca se encuentra muy silicificada, sirviendo como guía a los mineros del sector para abrir nuevas labores.

Durante el trabajo dentro de mina, se identificó que las rocas encajantes de las estructuras mineralizadas de la zona corresponden a rocas del Batolito de Segovia, diques y unidades correspondientes a las Sedimentitas de Segovia. El estilo de mineralización de las minas El Dólar y Raudal corresponden a diversos tipos de estructuras, que van desde vetilleos de cuarzo, stockworks de cuarzo y cuarzo con sulfuros, hasta vetas compuestas por cuarzo y sulfuros como minerales principales, presentándose ocasionalmente compuestas en aproximadamente un 90% por sulfuros (principalmente pirita). Estas estructuras generalmente se encuentran emplazadas en zonas de fallas de cizalla, contactos entre litologías como el del batolito y los diques con los shales carbonosos, y siguiendo el rumbo de los estratos o capas de las rocas sedimentarias encontradas en el sector, todas las anteriores con una dirección principal NS.

La manera en la que se emplazan estas vetas, indica claramente dos controles principales de mineralización en el sector: un control estructural el cual se observa en las fracturas y zonas de cizalla mineralizadas y un control estratigráfico evidenciándose en las estructuras identificadas en los planos de estratificación de las Sedimentitas de Segovia.

5.2. Sedimentitas de Segovia

Las rocas estratificadas denominadas shales carbonosos por González (2001), pertenecientes a las Sedimentitas de Segovia, han sido analizadas mediante petrografía a la muestra GD-RA-05 en sección delgada y pulida. Dichos análisis permiten clasificar a esta roca como una roca meta sedimentaria.

La presencia de una muy notable foliación con micropliegues, y la mineralogía observada, constituida principalmente por cuarzo, micas e illita con agregados de clorita y clinocloro, junto con los resultados del análisis de difracción de rayos X, donde se evidencia presencia de cuarzo, micas (principalmente moscovita), feldespatos (microclina), illita, clinocloro, sustentan que esta roca ha sido afectada por procesos metamórficos en muy bajo grado. Sin embargo, cabe recalcar que la presencia de minerales micáceos como la moscovita e illita pueden estar estrechamente relacionados a asociaciones minerales de halos de alteración, debido a la presencia de estructuras mineralizadas en la zona.

5.3. Batolito de Segovia

Las rocas correspondientes al Batolito de Segovia cartografiadas por Feininger y otros (1972), corresponden según González (2001) a dioritas con amplias variaciones texturales y composicionales, hasta cuarzo

dioritas. La sección delgada analizada de la muestra GD-DO-01 perteneciente al Batolito de Segovia, corresponde a una roca de textura fanerítica, hipidiomorfa, inequigranular, compuesta principalmente por cristales subhedrales de plagioclasa, cuarzo y feldespatos, con minerales accesorios de piroxenos, anfíboles.

La cuantificación mineral realizada a 4 zonas de la misma lámina y su interpretación en diagrama de Streckeisen dio como resultado que la roca corresponde a una fase tonalítica, por lo que las rocas del Batolito de Segovia varían desde dioritas hasta tonalitas en el sector El Vapor.

5.4. Paragénesis

Mediante el análisis de la naturaleza y texturas de vetillas, stockworks y vetas dentro de las minas El Dólar y Raudal, y estudios de petrografía tanto a secciones delgadas como pulidas, ha sido posible proponer la secuencia paragenética del depósito.

La presencia de la pirita fina asociada al cuarzo microcristalino presentes generalmente en los extremos de las vetas, marca un primer evento de mineralización. Esta pirita de grano fino ocurre también en las rocas cajas del batolito de Segovia y diques, mostrándose de manera diseminada, asociada a minerales de alteración fílica.

Un segundo evento es reconocido por la presencia de pirita granular de grano grueso, asociada a cuarzo masivo lechoso, presentándose en ocasiones vetas de hasta casi un 100% de pirita, generalmente localizadas en la parte central de las vetas. Durante este evento de mineralización, se han cristalizado minerales como la calcopirita, esfalerita, galena y oro de manera singenética ya que se encuentran como inclusiones sólidas sobre la pirita de grano grueso (Figura 5.1). Un post evento es reconocido por la presencia de cristales de calcopirita, esfalerita y oro como relleno de fracturas y espacios entre los cristales de pirita gruesa y el cuarzo masivo.

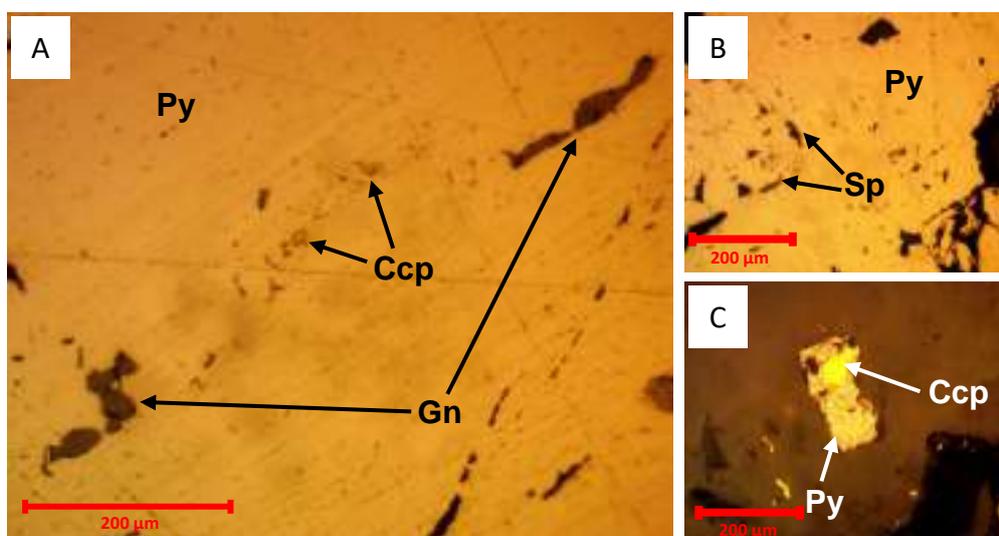


Figura 5.1. Minerales de mena asociados a la segunda generación de pirita. A) Inclusiones sólidas de calcopirita y galena sobre cristal de pirita gruesa. B) Inclusiones sólidas de esfalerita sobre cristal de pirita gruesa. C) Inclusión de calcopirita sobre cristal de pirita.

Eventos posteriores son reconocidos debido a la presencia de vetillas que cruzan las vetas principales, generalmente constituidas de cuarzo hialino, y calcita. Cavidades presentes en el cuarzo masivo han sido rellenadas en estos eventos por este cuarzo, formando drusas. No es posible identificar a cuantos estados de mineralización corresponden estos eventos.

Una tabla resumen observada en la Figura 5.2 muestra la paragénesis propuesta para los minerales de mena y ganga identificados en las estructuras mineralizadas de las minas El Dólar y Raudal.

	Pre mineralización	Evento principal de mineralización		Post mineralización
		Evento temprano	Evento Tardío	
Pirita fina	=====			
Cuarzo microcristalino	=====			
Pirita gruesa		=====		
Calcopirita		-----		
Esfalerita			=====	
Galena			=====	
Oro		-----		
Cuarzo masivo lechoso		-----		
Cuarzo hialino				=====
Calcita				=====

Figura 5.2. Gráfico de paragénesis mineral propuesta para la mena y ganga del depósito aurífero El Vapor.

5.5. Mineralogía de alteración

Las rocas encajantes encontradas en las minas El Dólar y Raudal muestran fases muy claras de minerales de alteración, debido a la

presencia de las estructuras mineralizadas. La mayor ocurrencia de estos halos de alteración se reconoce en las rocas correspondientes al Batolito de Segovia y los diques que se encuentran en contacto con los shales carbonosos.

La presencia de alteración fílica es muy fuerte en estas rocas, debido a la gran ocurrencia de minerales de cuarzo de alteración y sericita, representado principalmente en asociaciones de moscovita e illita. Los diques interceptados en las labores de ambas minas presentan una destrucción casi total de su textura original, en donde los fenocristales de plagioclasas se encuentran alterados en su totalidad, mostrando remanentes de sus propiedades ópticas originales. La alteración fílica se observa cuando fluidos hidrotermales con pH neutro afectan los minerales como feldspatos y plagioclasas, generando estas nuevas fases minerales (Corbett & Leach, 1996).

Indicios de alteración propilítica son evidentes en las rocas del Batolito de Segovia, observándose en asociaciones de clorita, epidota y carbonatos. El análisis petrográfico de estas rocas muestra minerales como anfíboles y piroxenos desarrollando una leve cloritización, así como cristales de epidota, reconocidas en la fase de campo y calcita en menor intensidad, lo que nos dice que durante esta fase, fluidos con un pH

neutro a alcalino afectaron la mineralogía de estas rocas (Corbett & Leach, 1996).

Unidades litológicas	Minerales de alteración	Propilitica	Filica	Argilica	Silificación
Batolito de Segovia	Clorita	=====			=====
	Epidota	=====			
	Carbonatos	=====			
Diques	Cuarzo		=====		=====
	Sericita - Illita		=====		
	Esmectita?			=====	
Shales carbonosos	Sericita - Illita		=====		=====
	Arcillas (Caolinita? - Esmectita?)			-----	
	Cuarzo				
Temperatura °C		400°C → 300°C → 200°C → 400°C → 150°C			
		← Alcalino → Ácido			
		pH			

Figura 5.3. Ensamblajes de alteración.

5.6. Refractariedad del depósito

La caracterización mineralógica del depósito permite obtener un conocimiento a detalle de la composición de las vetas, con el objetivo de implementar procesos alternativos durante la etapa de beneficio, optimizando la recuperación de oro (Gallego y otros., 2005).

Como se ha descrito anteriormente, las vetas presentes en las minas El Dólar y Raudal están compuestas principalmente por dos generaciones de pirita: pirita de grano fino y de grano grueso, estando estas últimas directamente relacionadas con fases de esfalerita, calcopirita, galena y

oro como inclusiones sólidas y relleno de fracturas. Como minerales de ganga se encuentran 3 generaciones de cuarzo y calcita en vetillas.

La pirita siendo el mineral principal de mena y encontrándose en gran abundancia, no representa un problema para la recuperación de oro debido a que es un mineral con alto potencial de reducción estándar, por lo que no reacciona bajo las condiciones de oxidación durante el proceso de lixiviación con cianuro (MMS, 1992).

El oro se lo halla como inclusiones sólidas sobre cristales de pirita de grano grueso, presentándose en tamaños de hasta 100 μm ; sin embargo Dorado Montalvo (2012) identifica pirita en inclusiones sólidas con tamaños variados de entre 7 – 100 μm . Estos cristales de oro como inclusiones (<10 μm) pueden ser consideradas refractarias (Gasparrini, 1993; Vaughan, 2004), debido a la dificultad para liberarlo de su matriz sulfurosa (Gallego y otros., 2005). Para tales condiciones se requiere implementar condiciones más agresivas, como tratamiento oxidante de tostación, oxidación biológica o por presión. Por otro lado, se recomienda un alto grado de molienda para exponer físicamente estos granos de oro (Gallego y otros., 2005).

5.6.1. Potenciales *preg-robbers*

La presencia alta de material carbonoso en el material de cabeza de las labores de las minas El Dólar y Raudal, afectan gravemente la recuperación del metal precioso causando el efecto *preg-robbing*, el cual se da cuando algún mineral presente adsorbe el complejo aurocianato de la solución cianurada durante el proceso de beneficio (Afenya, 1991).

Los shales carbonosos aportan en gran cantidad materia orgánica a las vetas de la zona; sin embargo, los estudios realizados a estas rocas muestran que está constituida en gran cantidad por minerales aluminosilicatos. Como se ha mencionado anteriormente, la roca está constituida por laminaciones de cuarzo y feldespatos detríticos, intercalado con material orgánico, presentando fases de micas, correspondientes principalmente a moscovita e illita. Estos silicatos arcillosos encontrados en los shales carbonosos, favorecen el fenómeno de *preg-robbing* que aumenta la refractariedad del depósito, por lo que son definidos como potenciales *preg-robbers* por Goodall y otros (2005). Por su parte, es importante también mencionar que la illita es una de las arcillas que Hausen & Bucknam (1984) reconocieron como mineral adsorbente de oro de la solución cianurada.

Estas asociaciones minerales no están solo presentes en los shales carbonosos. Los diques presentes en el sector presentan alteración filica en gran intensidad debido a la presencia de cuarzo y sericita (moscovita e illita).

Los minerales identificados como los principales *preg-robbbers* se evidencian en la Tabla X, en la cual se los coloca en un orden de mayor incidencia a menor incidencia sobre el efecto *preg-robbing*.

Tabla X. Principales minerales *preg-robbbers* que afectan al depósito aurífero de El Vapor.

Mineral	Fórmula química
Materia orgánica	-
Illita	$(K,H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}$
Moscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
Grafito	C
Sulfuros	-

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El depósito aurífero perteneciente al proyecto minero El Vapor cuenta con una mineralogía rica en sulfuros. La mineralogía concerniente a la mena del depósito corresponde principalmente a fases de pirita con agregados de calcopirita, galena, esfalerita y oro. Dos eventos mineralógicos fueron propuestos como los responsables de la aparición de estos minerales: un primer evento que originó la primera fase de pirita grano fino, y un segundo evento encargado de generar la pirita grano grueso, la cual aparece en forma singenética con la calcopirita, galena, esfalerita y oro que se presentan como inclusiones sólidas y relleno de fracturas en esta pirita grano grueso.

La mineralogía correspondiente a la ganga comprende cuarzo y calcita principalmente. Dos tipos principales de cuarzo fueron identificados: un cuarzo de textura masiva y color masivo lechoso, asociado principalmente a la pirita de grano grueso, y un cuarzo más hialino de textura microcristalina relacionado con la pirita de grano fino. Dorado Montalvo (2012) reconoce dos eventos relacionados a este último cuarzo. Un evento anterior al cuarzo masivo y uno posterior al mismo. El primer evento que distingue es el que quizás se asemeja más a las características identificadas en el cuarzo microcristalino mencionado en este trabajo, ya que lo describe como un evento premineral asociado a la pirita de grano fino y a cristales de sericita/moscovita, los cuales se han identificado en las secciones delgadas como halos de alteración en las rocas

encajantes. Un tercer evento de cuarzo, posterior a los dos principales fue identificado rellenando cavidades y fracturas, formando drusas y vetillas que cortan las vetas principales. Este evento tardío se encuentra relacionado a la calcita identificada, que también se la encontró en forma de vetillas y rellenando fracturas.

El estilo de mineralización de las minas El Dólar y Raudal indican un control estructural y estratigráfico, evidenciado en las estructuras que se reconocen en las fracturas y zonas de cizalla, así como en los planos de estratificación de las rocas y contactos entre distintas litologías. Las estructuras se presentan en forma de vetas, stockworks de cuarzo y cuarzo con sulfuros, y vetilleos de cuarzo y sulfuros en menor grado arrastrando materia carbonosa, con una dirección preferencial NS.

El efecto *preg-robbing* que se da en El Vapor, se debe principalmente al material orgánico y aluminosilicatos asociados a las rocas encajantes. La presencia de illita, moscovita y minerales arcillosos en los shales carbonosos, diques y rocas del batolito, constituyen los potenciales *preg-robbbers* que afectan el depósito.

Ciertos sulfuros como la piritita y la calcopiritita están documentados por Rees & van Deventer (2000), como minerales que también causan el efecto *preg-robbing*, dependiendo de la concentración de cianuro, siendo mayor su efecto

en las soluciones deficientes de cianuro. Por su parte, Hausen & Bucknam (1984) determinaron que la pirita también adsorbe oro, pero que esto no correspondería a un efecto de *preg-robbing*, siempre y cuando la pirita no represente más del 40% de la mineralización en el depósito. Es muy probable que la pirita no supere el 40% de la mineralización en El Vapor, pero sí representa un porcentaje considerable, por lo que puede contribuir de cierta manera, junto con la calcopirita en el *preg-robbing* sucedido en el área de El Vapor.

Dicho esto, se puede afirmar que las mayores responsables del efecto *preg-robbing* son las fases carbonosas presentes en las rocas y vetas del sector minero El Vapor. Los minerales asociados a estas fases corresponden a los aluminosilicatos, tales como la sericita e illita, así como también las fases de grafito, que se pudieron identificar mediante los trabajos de microscopía y DRX en los shales carbonosos. Adicional a esto, la gran presencia de sulfuros tiene cierta participación sobre este problema que afecta el proyecto de El Vapor.

Recomendaciones

Es necesario caracterizar el contenido de material orgánico que invade las estructuras mineralizadas, provenientes de los shales carbonosos de las Sedimentitas de Segovia, así como también el que se encuentra presente en las vetas y zonas aledañas a las mismas. Se deben realizar análisis de COT, para determinar el porcentaje de materia orgánica que existe en las rocas afectadas por el material carbonoso y relacionarlo a la intensidad del efecto *preg-robbing* que este genera.

Es evidente que, para un mejor estudio, se deben tomar un mayor número de muestras, sobre todo en zonas donde la mena aurífera presenta leyes interesantes e importantes, ya que son esas zonas en donde se requerirá extraer material. Sería conveniente realizar ensayos y estudios metalúrgicos en el material que se encuentra en dichas zonas, para de esa manera, poder diseñar un método apropiado para el tratamiento de dicho material, previo al proceso de beneficio.

ANEXOS

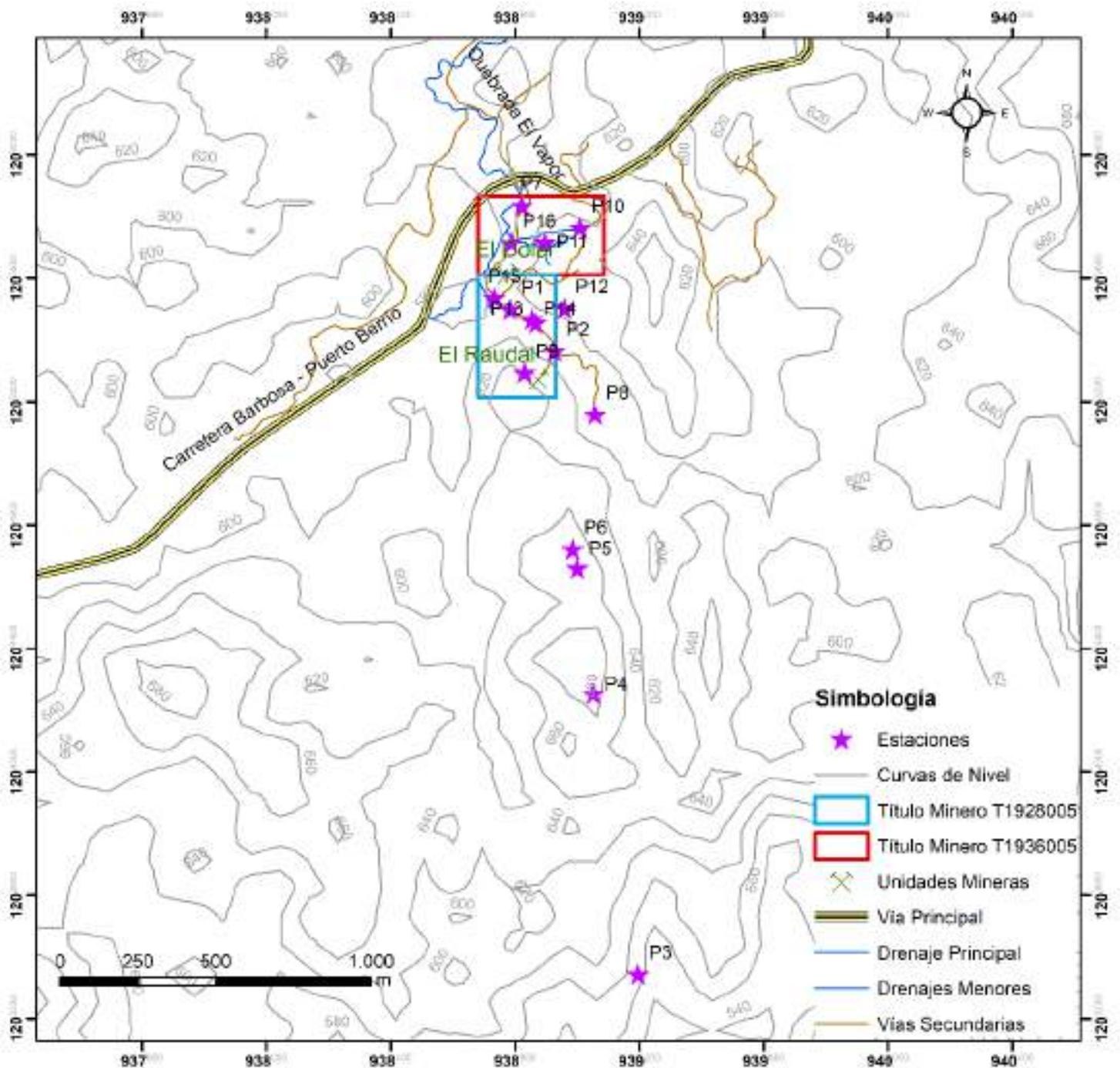
ANEXO A. TABLA DE ESTACIONES GEOLÓGICAS EN SUPERFICIE

GEOLOGÍA EN SUPERFICIE			
Estación	Coordenadas SIRGAS - Datum: Bogotá		Descripción
	X	Y	
E1	938784	1205498	Afloramiento de roca ígnea, textura afanítica, color gris claro, con alta presencia de silicificación. Afloramiento alterado en su totalidad con cristales de cuarzo y micas en abundancia. Roca afectada por vetillas de cuarzo en todas las direcciones.
E2	938927	1205362	Afloramiento de roca ígnea perteneciente a un dique. Se observa que este dique está en contacto con roca metasedimentaria gráfita, con estratificación milimétrica muy fina. El afloramiento se encuentra "bañado" por material gráfítico, es decir, el afloramiento se observa de color negro. Roca color gris oscura de grano fino.
E3	939195	1203342	Afloramiento expuesto debido a corte de vía, de unos 4 metros de potencia. Se encuentra fuera de los títulos mineros de la Empresa Eco - Desarrollo Mineros, antes de la mina La Menez. Se trata de una lutita color marrón, muy claro a blanco, estratificada centimétricamente, con dirección preferencial N40/50NW, ya que los estratos se encuentran deformados debido a que presenta un bajo grado de metamorfismo (se observa superficies sedosas y laminaciones). La roca presenta una textura arcillosa en la superficie debido a la presencia de arcillas (alteración hidrotermal?).
E4	939051	1204253	Afloramiento constituido por una lutita color marrón, muy claro a blanco, estratificada centimétricamente. Se observa una estructura mineralizada en la superficie, por lo que hay zonas donde la lutita se encuentra masiva y dura, debido a la presencia de zonas silicificadas, con presencia de pirita diseminada.
E5	939000	1204658	Afloramiento de roca sedimentaria, lutita estratificada centimétricamente con N125E/51SW, color totalmente blanco. Zona muy alterada debido a la alta presencia de arcilla en la roca. La roca corresponde a una lutita color marrón, muy claro a blanco, estratificada centimétricamente.
E6	938985	1204720	Afloramiento de roca sedimentaria, lutita estratificada centimétricamente con N125E/51SW, totalmente blanca. Zona muy alterada, debido a la alta presencia de arcilla en la roca, la cual contiene cristales de micas milimétricas diseminadas. La roca en este afloramiento se observa más dura y competente que en los puntos anteriores.
E7	938822	1205834	Afloramiento de roca ígnea fanerítica, de grano medio. La roca se encuentra constituida por una matriz de color blanco, de textura arcillosa debido a la los feldespatos y plagioclasas (alteración hidrotermal?). Cristales milimétricos de vidrio volcánico y minerales oscuros (Hb, Piroxenos).

GEOLOGÍA EN SUPERFICIE

Estación	Coordenadas SIRGAS - Datum: Bogotá		Descripción
	X	Y	
E8	939057	1205157	Afloramiento de roca sedimentaria, estratificada de manera casi vertical. Roca de color marrón, parece presentar cierto grado de metamorfismo debido a su textura sedosa.
E9	938830	1205292	Afloramiento de lutita blanca silicificada, donde se identifica una estructura mineralizada de cuarzo con dirección aproximada N30. Alta presencia de óxidos.
E10	939009	1205762	Afloramiento de roca sedimentaria, lutita de color blanco estratificada. La roca presenta una textura arcillosa y consiste en una lutita color marrón, muy claro a blanco, estratificada centimétricamente, con dirección y buzamiento de N5/NW. Se observa una estructura mineralizada atravesando el afloramiento con dirección N15°. La lutita en esta sección se la encuentra silicificada y endurecida.
E11	938895	1205714	Afloramiento poco visible, con alto grado de meteorización de roca sedimentaria, deleznable y de coloración rojiza.
E12	938959	1205501	Veta de 60 cm de ancho, compuesta de cuarzo, sulfuros y algunos óxidos, con dirección y buzamiento N30/65SW. Se observa parches de grafito y evidencia de roca caja sedimentaria, silicificada, correspondiente a una lutita carbonosa. Estas rocas son afectadas por una falla con dirección y buzamiento N75/75SE.
E13	938865	1205454	Afloramiento de lutita estratificada, de grano fino y coloración gris. La roca presenta una textura sedosa y cierto grado de metamorfismo, gradando a una filita grafitosa. La dirección y buzamiento que presenta es N170/13SW.
E14	938854	1205467	Afloramiento de lutita estratificada casi vertical, color marrón oscuro, con tonalidades grises. La dirección y buzamiento de la roca es N20/75NW.
E15	938733	1205534	Afloramiento de roca ígnea, fanerítica, de grano grueso, correspondiente a los intrusivos de la zona.
E16	938788	1205713	Afloramiento de roca ígnea, fanerítica, de grano grueso, correspondiente a los intrusivos de la zona.

**ANEXO B. MAPA DE UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES REALIZADAS EN EL
LEVANTAMIENTO EN SUPERFICIE**

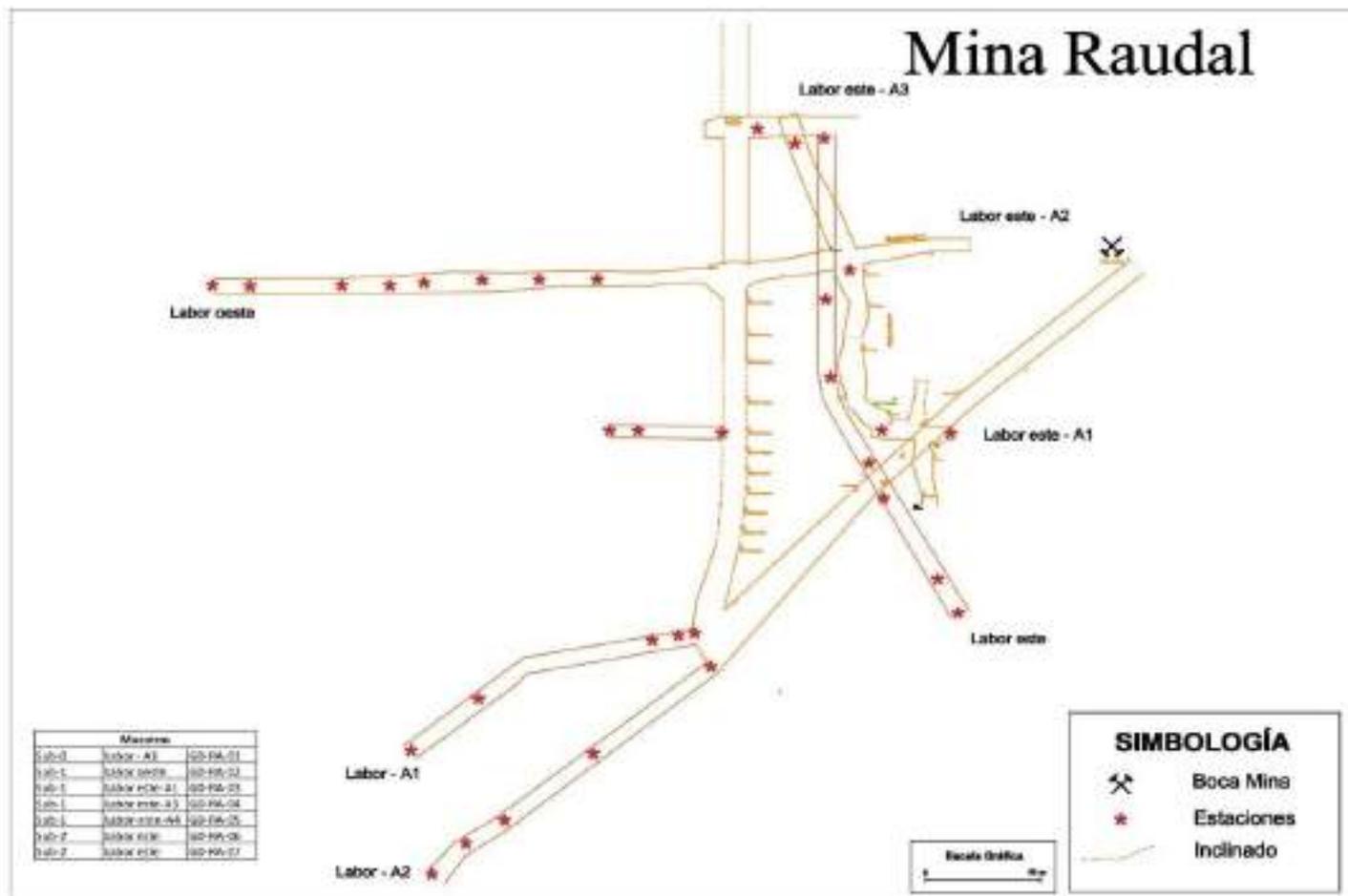


**ANEXO C. TABLA DE UBICACIÓN DE ESTACIONES DENTRO DE LA
MINA RAUDAL JUNTO CON LAS MUESTRAS RECOGIDAS**

MINA EL RAUDAL				
Nivel	Labor	Punto	Avance (m)	Muestra
0	A1	P1	0	
	A1	P2	2	
	A1	P3	5	GD-RA-01
	A1	P4	21,6	
	A1	P5	28,2	
	A2	P6	0	
	A2	P7	14	
	A2	P8	23,5	
	A2	P9	27,5	
	A2	P10	30,5	
1/2	Oeste	P11	0	
	Oeste	P12	6,1	
	Oeste	P13	9,9	
1	Oeste	P14	0	
	Oeste	P15	10	
	Oeste	P16	15	
	Oeste	P17	20	
	Oeste	P18	25	
	Oeste	P19	28	
	Oeste	P20	32	
	Oeste	P21	40	GD-RA-02
	Oeste	P22	43	
	Este - A1	P23	0	
	Este - A1	P24	13,5	GD-RA-03
	Este - A1	P25	17,3	
	Este - A2	P26	-	
	Este - A3	P27	0	
Este - A3	P28	19,5	GD-RA-05	
Este - A4	P29	0		
Este - A4	P30	35		
Este - A4	P31	40	GD-RA-04	
2	Este	P32	0	
	Este	P33	8,5	

MINA EL RAUDAL				
Nivel	Labor	Punto	Avance (m)	Muestra
2	Este	P34	23,8	
	Este	P35	29,75	
	Este	P36	39,1	
	Este	P37	43,35	GD-RA-06
	Este	P38	51,85	GD-RA-07
	Este	P39	56,95	

ANEXO D. PLANO DE LA MINA RAUDAL CON LAS ESTACIONES REALIZADAS

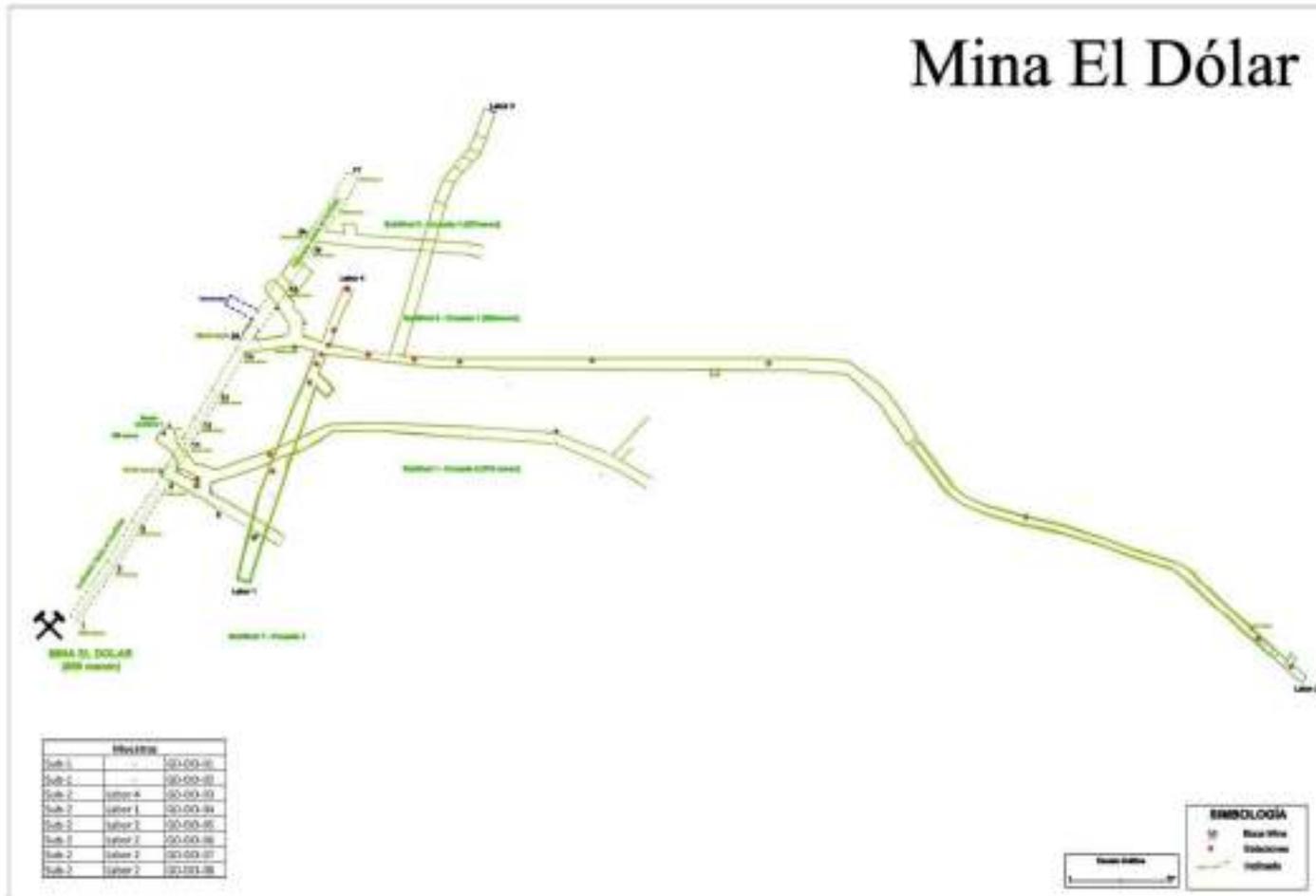


Fuente: ECO-DESARROLOS MINEROS S.A.S., 2017.

**ANEXO E. TABLA DE UBICACIÓN DE ESTACIONES DENTRO DE LA
MINA EL DÓLAR JUNTO CON LAS MUESTRAS RECOGIDAS**

MINA EL DÓLAR				
Nivel	Labor	Punto	Avance (m)	Muestra
S1	-	P40	0	GD-DO-01
	-	P41	20	GD-DO-02
S2	L1	P42	0	
	L1	P43	2	GD-DO-04
	L1	P44	6,6	
	L1	P45	24	
	L1	P46	35	
	L2	P47	0	
	L2	P48	8	
	L2	P49	17,8	GD-DO-05
	L2	P50	23,9	
	L2	P51	49,9	
	L2	P52	85,3	
	L2	P53	161,8	
	L2	P54	188,5	GD-DO-06 GD-DO-07
	L2	P55	210,9	GD-DO-08
	L2	P56	216,1	
	L3	P57	-	
	L4	P58	0	
	L4	P59	2	GD-DO-03
	L4	P60	10,7	

ANEXO F. PLANO DE LA MINA EL DÓLAR CON LAS ESTACIONES REALIZADAS



Fuente: ECO-DESARROLOS MINEROS S.A.S., 2017.

ANEXO G. TABLA DE MUESTRAS RECOGIDAS

Código	Caja/veta
GD-RA-01	V
GD-RA-02	C
GD-RA-03	C
GD-RA-04	C
GD-RA-05	C
GD-RA-06	C
GD-RA-07	C/V
GD-DO-01	C
GD-DO-02	V
GD-DO-03	V
GD-DO-04	C
GD-DO-05	V
GD-DO-06	V
GD-DO-07	V
GD-DO-08	V

ANEXO H. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-DO-01

Código	GD-DO-01	Mina El Dólar Subnivel 1 Inicio de labor
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica	Batolito de Segovia	

Descripción Macroscópica



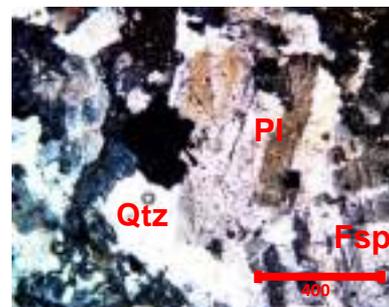
Roca ígnea compacta de color gris, masiva, de textura holocristalina, fanerítica, de grano medio, compuesta principalmente por cristales subhedrales milimétricos de cuarzo y plagioclasas. Presencia de minerales oscuros milimétricos subhedrales y anhedrales como piroxenos y hornblendas en menor proporción. Se evidencia cierto grado de cloritización en los minerales oscuros presentes. Minerales de textura arcillosa al rayar los cristales de plagioclasas pueden evidenciar cierto grado de alteración. La muestra es afectada por un sistema de vetilleo en todas las direcciones o un micro stockwork de cuarzo, en donde se evidencia la presencia de pirita diseminada. Presencia menor de carbonatos debido a su leve reacción con el HCL.

Descripción Microscópica

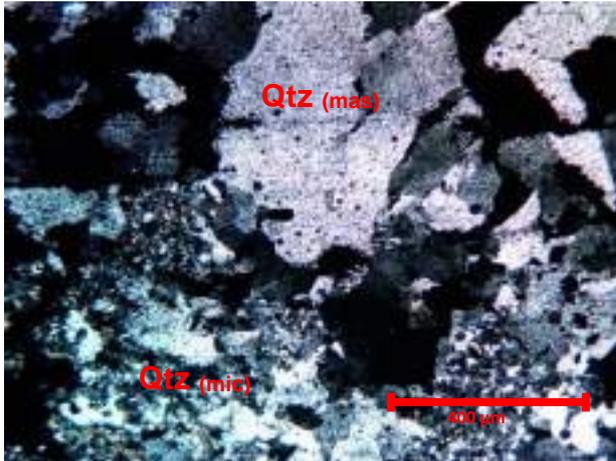
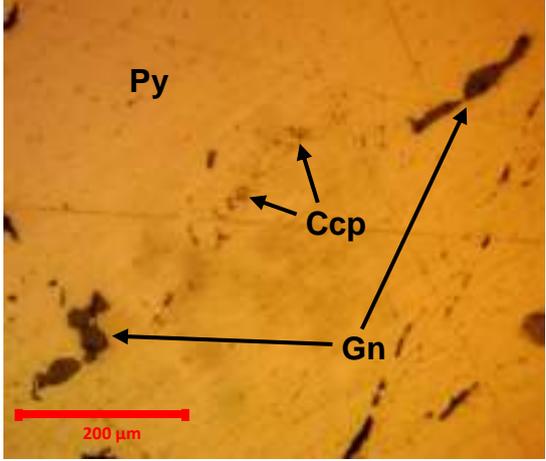
Roca de textura hipidiomorfa inequigranular de grano medio compuesta principalmente por cristales subhedrales de plagioclasa (200 – 600 μm) y cuarzo (100 – 300 μm) y feldespatos (100 – 200 μm), con presencia de minerales secundarios como augita (100 – 200 μm), anfíboles (100 – 200 μm), calcita (100 – 300 μm). Pirita diseminada en un 5 %. Cristales de zircón como traza. La plagioclasas muestran una textura secundaria debido a que se encuentran levemente alteradas a sericita. Los cristales de cuarzo presentan una extinción ondulante. Cristales de piroxenos y anfíboles presentan una cloritización parcial a casi completa.

Porcentajes: Se ha realizado la cuantificación de minerales componentes de la roca en 4 secciones de la lámina.

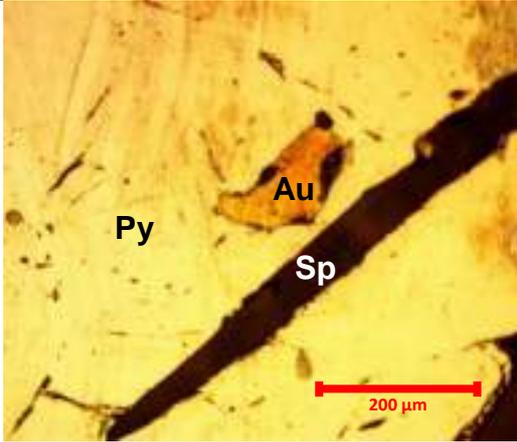
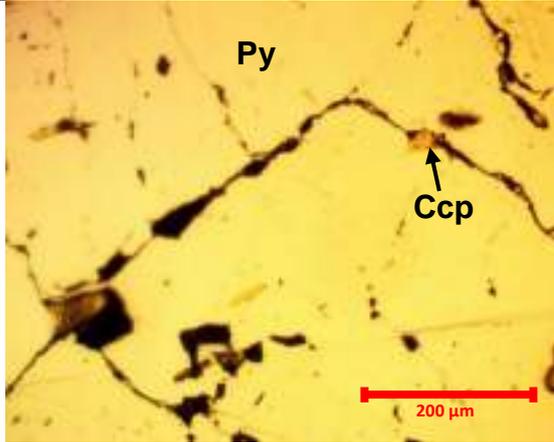
	% Qtz	% Fsp	% Pl
Sección 1	17,230	2,803	25,378
Sección 2	6,16	6,126	33,176
Sección 3	21,9	2,24	27,738
Sección 4	10,709	1,971	44,772
Promedio Ponderado	27,971	6,563	65,466



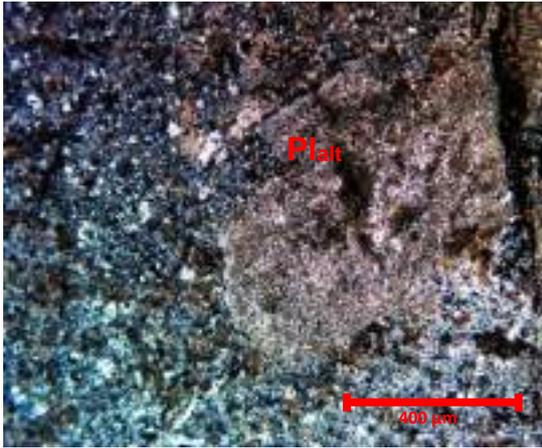
ANEXO I. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-DO-02

Código	GD-DO-02	Mina El Dólar Subnivel 1 Final de labor
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica	Estructuras mineralizadas	
Descripción Macroscópica		
		<p>Roca de veta con presencia de materia carbonosa y mineralización principal de cuarzo y pirita en menor cantidad. El cuarzo es mayormente lechoso y masivo, pero también hay cuarzo drusiforme. La pirita se observa en forma de agregados granulares de tamaños milimétricos. Se distinguen también algunas vetillas de pirita sobre el cuarzo y agregados de pirita iridiscente cercana a los bordes de la roca. Múltiples fracturas se pueden evidenciar sobre el cuarzo en dirección perpendicular a la mineralización.</p>
Descripción Microscópica		
<p>Lámina delgada: Corresponde a veta compuesta principalmente de cuarzo distinguiéndose 2 tipos de texturas presentes: Cuarzo masivo granular con cristales de 100 – 200 μm y cuarzo mosaico con cristales > 30 μm. Material oscuro proveniente de las rocas cajas se encuentra presente como material arrastrado. Presencia de foliación leve con laminaciones constituidas de micro detritos de cuarzo, feldespatos con presencia de minerales de alteración como sericita e illita debido a sus bajos colores de birrefringencia en intercalación con material orgánico particulado en detritos.</p> <p>Sección pulida: Presencia de cristales sub idiomorfos de pirita de tamaños que van generalmente desde 100 – 200 μm hasta tamaños superiores al mm. Cristales de esfalerita de tamaño 100 – 200 μm se encuentran relleno de espacios entre los granos de pirita. Inclusiones sólidas de tamaño 20 – 50 μm de calcopirita y galena, se evidencian sobre los granos más grandes de pirita.</p>		
		

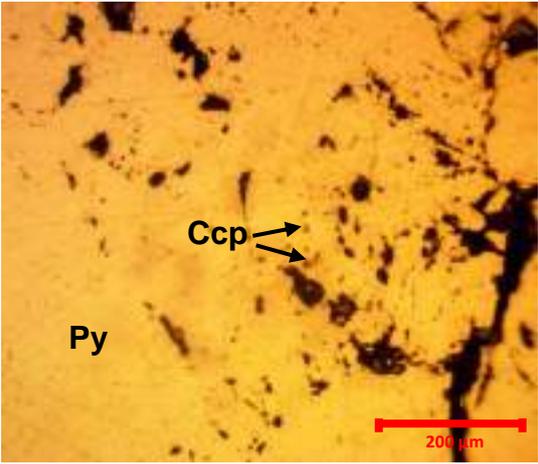
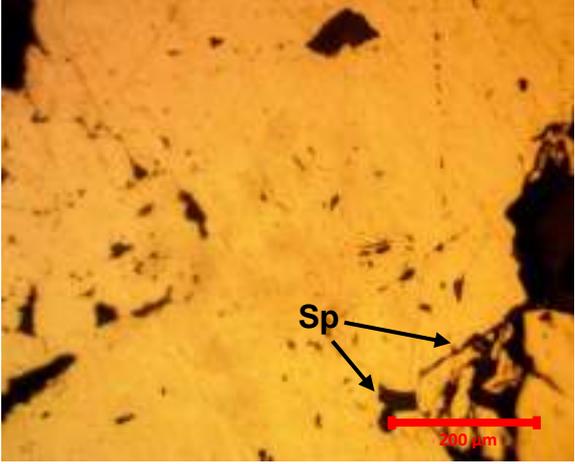
ANEXO J. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-DO-03

Código	GD-DO-03	Mina El Dólar Subnivel 2 Inicio de labor 4
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica	Estructuras mineralizadas	
Descripción Macroscópica		
		<p>Roca de veta con mineralización principal de cuarzo y pirita, y materia carbonosa arrastrada por el cuarzo. El cuarzo se presenta en dos formas: uno lechoso masivo y otro más translucido drusiforme, siendo el lechoso el más abundante en la roca. Cristales de pirita se presentan en agregados masivos con granos milimétricos hasta el centímetro. Se puede observar también un vetilleo de cuarzo y pirita sobre la materia carbonosa y ciertas fracturas en dirección perpendicular a la mineralización.</p>
Descripción Microscópica		
<p>Sección pulida conformada por pirita granular de grano grueso sub idiomorfos de 100 – 300 μm. Cristales de Galena y esfalerita sub idiomorfos coexistiendo con los cristales de pirita granular como inclusiones sólidas entre 20 – 30 μm y como relleno entre fracturas, cristales de calcopirita.</p> <p>Se identificó un cristal de oro alotriomorfo como inclusión sólida en la pirita de aproximadamente 100 μm debido a su color característico. Cabe recalcar que en la sección no se identificaron más cristales de oro.</p> <p>Los cristales de pirita de grano grueso se encuentran relacionados con cristales de cuarzo lechoso, mientras que el material carbonoso presente en la sección está asociado con cristales de cuarzo hialino junto con pirita de grano fino siguiendo la dirección de la estructura.</p>		
		

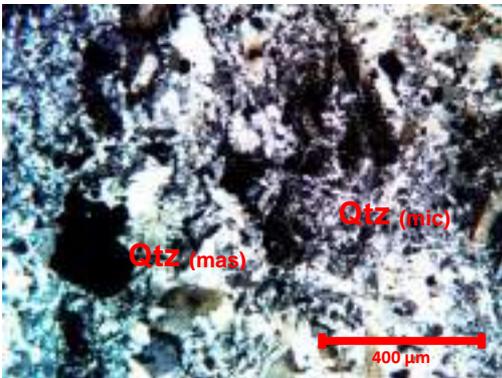
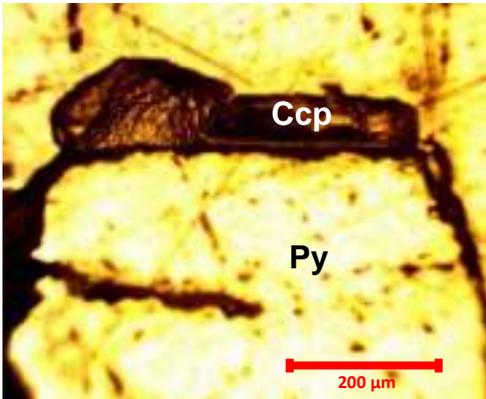
ANEXO K. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-DO-04

Código	GD-DO-04	Mina El Dólar Subnivel 2 Inicio de labor 1
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica		
Descripción Macroscópica		
	<p>Roca ígnea compacta, de color gris blanquecino, de textura holocristalina, porfídica, muy alterada, con fenocristales milimétricos de plagioclasas. Cristales de plagioclasas subhedrales con presencia de alteración a sericita y minerales arcillosos, cristales subhedrales de cuarzo que llegan hasta el milímetro. En escasa cantidad se evidencian granos de menos de 1 mm de pirita diseminada, así como también de otros sulfuros como bornita? y calcopirita?</p>	
Descripción Microscópica		
<p>Roca holocristalina porfídica de matriz félsítica (Compuesta por microcristales de feldespatos y cuarzo) conformado por fenocristales anhedrales de plagioclasas de hasta 1 mm aproximadamente destruidos en su totalidad, presentando remantes de sus moldes y maclas originales, alterados a minerales como sericita e illita presentando estos últimos colores de baja birrefringencia. Cristales de minerales secundarios como biotitas anhedrales alteradas y piroxenos subhedrales como mineral de traza, presentando cierto grado de cloritización. Presencia de opacos diseminados con una ocurrencia de > 1%.</p>		
		

ANEXO L. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-DO-05

Código	GD-DO-05	Mina El Dólar Subnivel 2 A 18 m de avance de labor 2
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica	Estructuras mineralizadas	
Descripción Macroscópica		
		<p>Roca de veta con una fase de cuarzo lechoso masivo y otra de cuarzo drusiforme más translucido, y pirita en una fase de agregados masivos y otra diseminada. En algunos lados se notan los cristales de pirita y cuarzo subhedrales milimétricos. La mayor parte de la pirita se la observa junta al cuarzo más translucido. Se puede observar también un vetilleo de pirita y materia carbonosa sobre el cuarzo lechoso que probablemente vino con el cuarzo más translucido, lo que indicaría que este último fue posterior. Fracturas en dirección perpendicular a la mineralización pueden evidenciarse también.</p>
Descripción Microscópica		
<p>Sección pulida en la que se pueden identificar granos sub idiomorfos de pirita que llegan a medir hasta 1 mm. Granos más pequeños de pirita dispersos en forma diseminada se pueden observar en menor cantidad. Es posible observar cristales de esfalerita de unos 50 a 100 μm relleno de fracturas entre la pirita y el cuarzo, y pequeñas inclusiones de calcopirita de entre 10 – 20 μm.</p>		
		

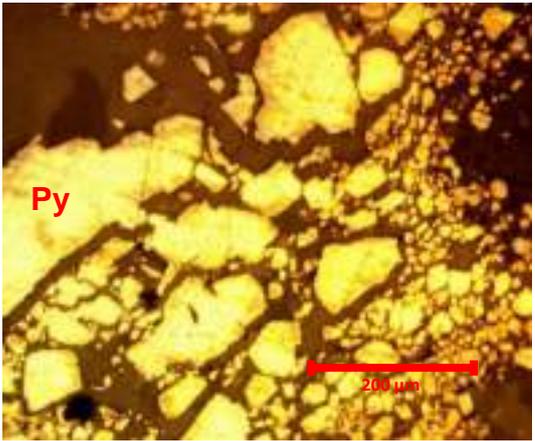
ANEXO M. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-DO-06

Código	GD-DO-06	Mina El Dólar Subnivel 2 A 188 m de avance de labor 2
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica	Estructuras mineralizadas	
Descripción Macroscópica		
		<p>Roca de veta con presencia de materia carbonosa y mineralización principal de cuarzo y pirita. Se evidencian dos fases de cuarzo y pirita. Las dos fases de pirita corresponden a una fase de agregados masivos con granos subhedrales que van de un tamaño milimétrico a centimétrico y otra fase diseminada con granos de menos de 1 mm en menor cantidad. Las fases de cuarzo que se pueden observar son una fase lechosa masiva con cristales subhedrales a anhedrales y otra fase al parecer posterior de cuarzo drusiforme más translucido. También se distinguen vetillas de este cuarzo translucido arrastrando pirita y materia carbonosa en algunos sectores, en dirección perpendicular a la mineralización.</p>
Descripción Microscópica		
<p>Lámina delgada: Sección delgada corresponde a veta de cuarzo y pirita. Se identifican 2 tipos de cuarzo: 1.- Fase de cuarzo masivo granular subhedrales con cristales de xx – xx um constituye más del 50% de la sección. 2.- Microcristales de cuarzo mosaico donde se evidencia claramente que es una fase posterior a la de la fase granular ya que cruza esta última. Se lo encuentra también como vetillas las cuales traen material carbonoso.</p> <p>Sección pulida: Se distinguen dos tipos de pirita: La pirita de grano fino sub idiomorfa de 10 – 100 µm asociadas a cuarzo hialino y material carbonoso arrastrado en textura de laminaciones, esta pirita se la encuentra también diseminada en la matriz de cuarzo. En la parte media de la sección pulida se distinguen cristales de pirita de grano grueso sub idiomorfos alcanzando hasta las 500 µm aproximadamente. Cristales de calcopirita alotriomorfos relleno de fracturas entre la pirita y el cuarzo de hasta 200 µm presentando una leve anisotropía y junto a la pirita como cristalización singenética. Cristales de esfalerita de 30 – 40 µm se presentan como inclusiones sólidas en los cristales de pirita.</p>		
		

ANEXO N. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-DO-07

Código	GD-DO-07	Mina El Dólar Subnivel 2 A 188 m de avance de labor 2
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica	Estructuras mineralizadas	
Descripción Macroscópica		
		<p>Roca de veta con mineralización principal de pirita en forma granular. La mayor parte de los granos de pirita son subhedrales y algunos pocos anhedrales, con un tamaño que va desde menores a 1 mm hasta centimétricos, predominando los granos gruesos centimétricos. Se observa también en menor cantidad cuarzo lechoso y translucido en forma masiva. Son apreciables algunos granos de pirita iridiscente menores a 1 mm.</p>

ANEXO O. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-DO-08

Código	GD-DO-08	Mina El Dólar Subnivel 2 Final de labor 2
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica	Estructuras mineralizadas	
Descripción Macroscópica		
		<p>Roca de veta con mineralización de cuarzo y pirita. El cuarzo en su mayoría es lechoso y se presenta en forma masiva, pero también se evidencia en menor cantidad cuarzo translucido subhedral con granos menores a 1 mm. La pirita se presenta en forma masiva y en algunos sectores atravesada por vetillas del cuarzo translucido, al cual prefiere acompañar. También se puede identificar vetillas de cuarzo translucido y materia carbonosa (arrastrada por el cuarzo translucido) sobre el cuarzo lechoso.</p>
Descripción Microscópica		
<p>Sección pulida en donde se identifica principalmente cristales de pirita de grano fino sub idiomorfa con tamaños que varían entre 10 y 200 μm sobre cristales de cuarzo. Cristales de pirita diseminada de hasta 100 μm es identificada en cristales de cuarzo.</p>		
		

ANEXO P. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-RA-01

Código	GD-RA-01	Mina Raudal Subnivel 0 Inicio de labor A1
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica	Estructuras mineralizadas	

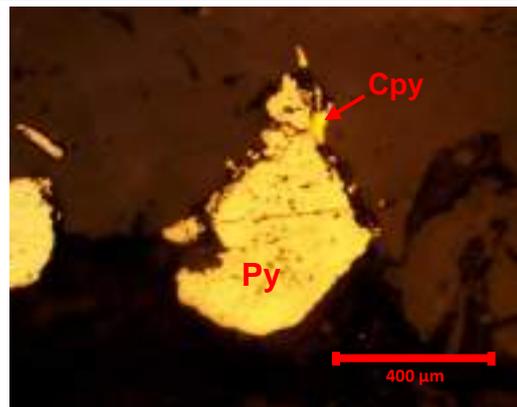
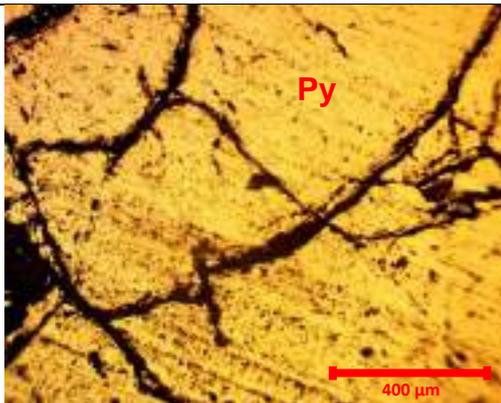
Descripción Macroscópica



Roca de veta con presencia de materia carbonosa y mineralización de cuarzo y pirita. El cuarzo se presenta lechoso masivo y en cristales subhedrales alargados menores a 1 mm. La pirita se puede observar fracturada en agregados masivos y también en forma granular anhedral milimétrica. Vetillas de cuarzo lechoso y más translucido se pueden también evidenciar sobre la materia carbonosa en dirección de la mineralización, siendo más abundantes las de cuarzo lechoso. Son visibles vetillas de materia carbonosa sobre el cuarzo lechoso.

Descripción Microscópica

Sección pulida en la que se puede observar pirita de grano grueso sub idiomorfa, fracturada con un tamaño milimétrico. Esfalerita se evidencia relleno de fracturas en la pirita y también junto a ciertos granos. Es posible observar también granos más pequeños de pirita sobre la materia carbonosa en forma diseminada, cuyo tamaño va desde los 10 hasta los 100 y 200 μm , y en menor cantidad sobre el cuarzo. Adicional a esto, se puede observar dos inclusiones sólidas de calcopirita de unos 20 a 80 μm sobre cristales de pirita mayores a 200 μm .



ANEXO Q. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-RA-02

Código	GD-RA-02	Mina Raudal Subnivel 1 Final de labor Oeste
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica	Sedimentitas de Segovia	
Descripción Macroscópica		
		<p>Roca de color negro, compacta, de granos muy finos, angulosos, bien seleccionados, y medianamente estratificada. La roca está silicificada y presenta cuarzo en vetillas de anchura menor a 1 mm y una vetilla de anchura mayor (milimétrica) de cuarzo drusiforme. Los planos de estratificación se ven marcados por la mineralización del cuarzo, que se ha emplazado en estos, arrastrando parte de la materia carbonosa. Presencia de oxidación es evidente en la roca y aparentemente también contenido de moscovita.</p>

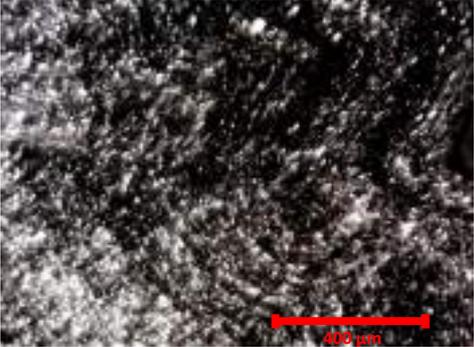
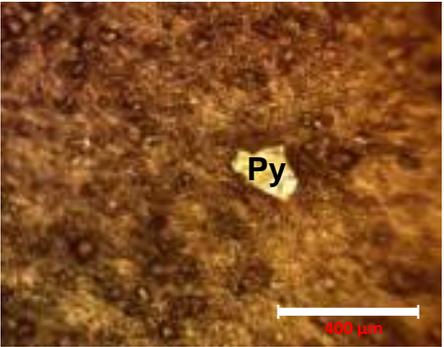
ANEXO R. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-RA-03

Código	GD-RA-03	Mina Raudal Subnivel 1 Final de labor Este-A1
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica		
Descripción Macroscópica		
		<p>Roca ígnea compacta, de color gris y textura afanítica microcristalina. Se puede observar cristales de cuarzo, plagioclasas, algunos diminutos cristales oscuros probablemente de piroxenos o anfíboles, y pirita diseminada en menor proporción. El cuarzo se muestra lechoso y translucido, con algunos cristales alargados que llegan al centímetro, al igual que los cristales de plagioclasas. La pirita se presenta en granos solitarios menores a 1 mm distribuida en algunos sectores. Los cristales opacos son anhedrales y se distinguen también solitarios y distribuidos por toda la roca en mayor proporción que la pirita. La textura arcillosa de la roca da a notar evidencias de alteración en la misma.</p>

ANEXO S. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-RA-04

Código	GD-RA-04	Mina Raudal Subnivel 1 Final de labor Este-A4
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica		
Descripción Macroscópica		
		<p>Roca ígnea compacta, de color gris-marrón, textura porfídica de matriz microcristalina y con presencia de mucha oxidación. Se pueden apreciar abundantes plagioclasas alargadas, alteradas y en proceso de alteración (sericita?), menores a 1 mm. Es evidente también la presencia de cuarzo translucido. Presencia de cristales de pirita diseminada.</p>

ANEXO T. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-RA-05

Código	GD-RA-05	Mina Raudal Subnivel 1 Final de labor Este-A3
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica	Sedimentitas de Segovia	
Descripción Macroscópica		
		<p>Roca negra, deleznable, medianamente estratificada y de grano muy fino. La roca presenta cierto grado de metamorfismo y un brillo sedoso. Se puede evidenciar también laminación paralela mayormente y en algunos sectores tornándose ondulada. Cristales y especies minerales son escasos.</p>
Descripción Microscópica		
<p>Roca meta sedimentaria de textura foliada. Se observa material microdetritico compuesto por cuarzo metamórfico y feldespatos generalmente alterados, con alta presencia de micas como moscovita, entre otros, en intercalación con material orgánico detritico. Se observa cristales sub idiomorfos de clinocloro. Es muy común observar microplegues. Se aprecia en menor cantidad ciertos granos solitarios de pirita sub idiomorfos de unos 80 μm.</p>		
		

ANEXO U. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-RA-06

Código	GD-RA-06	Mina Raudal Subnivel 2 A 43 m de avance de labor Este
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica	Estructuras mineralizadas	
Descripción Macroscópica		
		<p>Roca de veta con presencia de materia carbonosa y brillo sedoso. Presenta mineralización de dos fases de cuarzo: una fase lechosa en mayor proporción y otra translúcida en menor proporción. El cuarzo se presenta en forma masiva y atraviesa la materia carbonosa llevándose parte de ella.</p>

ANEXO V. FICHA DE DESCRIPCIÓN DE MUESTRA GD-RA-07

Código	GD-RA-07	Mina Raudal Subnivel 2 Final de labor Este
Departamento	Antioquia	
Localidad	El Vapor	
Unidad Geológica	Estructuras mineralizadas	
Descripción Macroscópica		
		<p>Roca color negro con alto grado de silicificación. Mineralización de cuarzo y pirita, y algo de oxidación. El cuarzo por lo general se presenta en vetillas paralelas y es en su mayoría lechoso. La pirita se presenta en agregados masivos y en vetillas sin un patrón fijo, aunque también se pueden observar algunos granos menores a 1 mm dispersos preferentemente sobre el cuarzo más translúcido. Se puede observar también pirita iridiscente en zonas aledañas a las fracturas de la roca. Debido al grado de alteración de la roca, se distinguen algunas plagioclasas alterándose.</p>

ANEXO W. PROCESO DE ELABORACIÓN DE SECCIONES DELGADAS Y PULIDAS. IMAGEN A MUESTRA EL PROCESO DE CORTADO DE LAS ROCAS. IMAGEN B MUESTRA EL PROCESO DE DESBASTE Y PULIDO DE LAS SECCIONES.



BIBLIOGRAFÍA

- Afenya, P. M. (1991). Treatment of carbonaceous refractory gold ores. *Minerals Engineering*, 4(7–11), 1043–1055. [http://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90082-7](http://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90082-7).
- Ballesteros, C. I. (1983). *Mapa Geológico generalizado del departamento de Bolívar. Escala 1:500.000*. Bogotá.
- Bogotá, J., & Aluja, J. (1981). Geología de la Serranía de San Lucas. *Geología Norandina*, 4, 49–56.
- Bohlke, J. K. (1982). *Orogenic (metamorphic-hosted) gold-quartz veins*.
- Castro Dorado, A. (2015). *Petrografía de rocas Ígneas y Metamórficas*. (Paraninfo, Ed.) (1st ed.). Madrid.
- Cediel, F., Shaw, R. P., & Cáceres, C. (2003). Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. *AAPG Memoir*, 79, 815–848.
- Coblentz, D. D., & Richardson, R. M. (1996). Analysis of the South American intraplate stress field. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 101(4), 8643–8657.
- Corbett, G. J., & Leach, T. M. (1996). *Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization. Workshop Manual*. Baguio.
- Correa, M., & Alfaro, A. J. (2011). Necesidad de la revisión de los estudios de amenaza sísmica a raíz del sismo de Tohoku de 2011. *Tecnura*, 15(30), 82–92. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2011000300009&lng=en&nrm=iso&tIng=es.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2005). *Censo General 2005*. Santafé de Bogotá.
- Dorado Montalvo, C. E. (2012). *Metalogénesis de las mineralizaciones auríferas del área de El Vapor, Antioquia*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/12102/>.
- ECO-DESARROLOS MINEROS S.A.S. (2017). Planos topográficos de las minas El Dólar y Raudal. Colombia.
- Feininger, T. (1970). The Palestina Fault, Colombia. *Geological Society America Bulletin*, 81(2), 1201–1216.
- Feininger, T., Barrero, D., & Castro, N. (1972). Geología de parte de los

departamentos de Antioquia y Caldas (Sub-zona II-B). *Boletín Geológico. Ingeominas*, 20(2), 1–173.

Gallego, A. N., Zapata, D. M., & Márquez, M. A. (2005). Mineralogía aplicada a La definición del tipo de refractariedad en la mina de oro El Zancudo, Titiribí, Antioquia. *Boletín de Geología*, 27(2).

Gasparrini, C. (1993). *Gold and Other Precious Metals*. Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg.

Goldfarb, R., Baker, T., Dubé, B., Groves, D., Hart, C., & Gosselin, P. (2005). Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes. *Society of Economic Geologists*, 407–450.

González, H. (2001). *Mapa Geológico del Departamento de Antioquia (Memoria explicativa)*. *Boletín Geológico. Ingeominas*.

Goodall, W. R., Leatham, J. D., & Scales, P. J. (2005). A new method for determination of preg-robbing in gold ores. *Minerals Engineering*, 18(12), 1135–1141. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.05.014>.

Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. G., & Robert, F. (1998). Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5), 7–27. [http://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00012-7](http://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00012-7).

Hausen, D. M., & Bucknam, C. H. (1984). Study of preg robbing in the cyanidation of carbonaceous gold ores from Carlin, Nevada., 833–856.

INGEOMINAS. (1999). Geología del departamento de Antioquia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2014). Diccionario Geográfico de Colombia. Retrieved from <http://www.igac.gov.co/digeo/app/index.html>.

Kassem, T., & Arango, J. (1977). *Mapa Fotogeológico de la Serranía de San Lucas. Escala 1:500.000*. Santafé de Bogotá.

Kehl, G. (1954). *Fundamentos de la práctica metalográfica*. (Ed. Aguilar, Ed.). Madrid.

Leica Microsystems. (2006). *Leica DM4500 P, DM2500 P, DM750 P*. Wetzlar.

Marshall, D., Anglin, C. D., & Mumin, H. (2004). *Ore Mineral Atlas*. Geological Association of Canada - Mineral Deposits Division.

- Megard, F. (1987). Cordilleran Andes and Marginal Andes: A review of Andean Geology North of the Arica Elbow (18°S). *Geodynamics Series*, 18, 71–95.
- Meijer, P. T., & Wortel, M. J. R. (1992). The dynamics of motion of the South American Plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B8), 11915–11931. <http://doi.org/10.1029/91JB01123>.
- Millán, H. (2004). *Caracterización Distritos Mineros en Colombia. Plan de infraestructura de transporte y portuaria para el desarrollo minero de Colombia*. Retrieved from <http://www.simec.gov.co/Portals/0/Documental/952.pdf>.
- Multi Mix Systems Pty Ltd. (1992). Treatment of Ores Containing Reactive Iron Sulphides. *Technical Bulletin*, 1, 7.
- Ordóñez-Carmona, O., Restrepo Álvarez, J. J., & Pimentel, M. M. (2006). Geochronological and isotopic review of pre-Devonian crustal basement of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 372–382. <http://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.005>.
- Page, W. (1986). *Geología sísmica y sismicidad al noroeste de Colombia*.
- Paris, G., Machette, M. N., Dart, R. L., & Haller, K. M. (2000). Map and database of Quaternary faults and folds in Colombia and its offshore regions, 61.
- Proingecom Ltda. (2003). Integración de áreas mineras para la explotación aurífera en el sector del Vapor del municipio de Puerto Berrío, Departamento de Antioquia. Convenio 073 de 2002 Minercol - Puerto Berrío.
- Pulido, N. (2003). Seismotectonics of the Northern Andes (Colombia) and the development of seismic networks. *Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, (SPEC. ISS.), 69–76.
- Rangel-Ch, J. O., Lowy-C, P. D., & Aguilar-P, M. (1997). La distribución de los tipos de vegetación en las regiones naturales de Colombia. In *Colombia Diversidad Biotica II* (pp. 383–402). <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.
- Rees, K. L., & van Deventer, J. S. J. (2000). Preg-robbing phenomena in the cyanidation of sulphide gold ores. *Hydrometallurgy*, 58(1), 61–80. [http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00131-6](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00131-6).
- Restrepo-Pace, P. a., Ruiz, J., Gehrels, G., & Cosca, M. (1997). Geochronology and Nd isotopic data of Grenville-age rocks in the

Colombian Andes: new constraints for Late Proterozoic-Early Paleozoic paleocontinental reconstructions of the Americas. *Earth and Planetary Science Letters*, 150(3–4), 427–441. [http://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00091-5](http://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00091-5).

Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. (1988). Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. *Episodes*, 11(3), 189–193. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0024219956&partnerID=40&md5=e790bf7a01a0f2da202dffa8a16167f0>.

Senay, E. (2014a). *Operating and Instructions Manual. FORCIMAT automatic specimen mover*. Metkon Instruments Inc.

Senay, E. (2014b). *Operating and Instructions Manual. GEOFORM thin sectioning and grindind machine*. Mekton Instruments Inc.

Siivola, J., & Schmid, R. (2007). List of Mineral abbreviations. *IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks*, 1–14.

Stefanick, M., & Jurdy, D. (1992). Stress Observations and Driving Force Models for the South American Plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B8), 11905–11913.

Taboada, A., Dimate, C., & Fuenzalida, A. (1998). Sismotectonica de Colombia: deformacion continental activa y subduccion. *Fisica de La Tierra*, 10(ISSN 0214-4557), 111–147.

Toussaint, J. F. (1993). *Evolución geológica de Colombia*.

Urrea, J. (2017). Mapa Geológico Local U.M. El Dolar. Colombia.

Valdivieso, P. (2017). *Diseño de proceso de tratamiento para menas refractarias con alto porcentaje de preg-robbing*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Vaughan, J. P. (2004). The process mineralogy of gold: The classification of ore types. *Jom*, 56(7), 46–48. <http://doi.org/10.1007/s11837-004-0092-8>.

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. <http://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.003>.