

Caracterización Mineralógica y Geoquímica de la Mineralización Vetiforme de Au-Ag de la Quebrada Aserradero, Vereda Angosturas, Municipio de California, Santander: su Incidencia en el Procesamiento y Beneficio Mineral.

Carolina Santamaria Galvis

Trabajo de Grado para Optar el título de Geóloga

Director

PhD. Carlos Alberto Ríos Reyes

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A mi familia, mi gran ejemplo de amor y apoyo incondicional, ustedes son la razón de mis logros, los amo.

A mi segunda familia (Pao, Stefa, Yuna, Maye, Leidy) mi segundo gran soporte, todas muy diferentes, con desacuerdos casi siempre, pero dispuestas a dar una amistad sincera y el apoyo necesario para continuar y compartir cada alegría como propia.

A Lore que tanto espero por este momento dándome siempre su apoyo incondicional y horas de risas interminables.

A Steph, your flame is still burning.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por contribuir de gran manera a mi formación integral, por todos los espacios de aprendizaje y desarrollo personal.

A mi director de proyecto de grado, el profesor Carlos Alberto Ríos por su acompañamiento, apoyo y consejos durante el desarrollo del proyecto.

A Carlos Chacón y Carlos Villareal del laboratorio de microscopia electrónica de barrido del Parque UIS Guatiguara por toda su ayuda, paciencia y dedicación.

Al laboratorio de difracción de Rayos-X del parque Tecnológico UIS Guatiguara.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica y todos sus docentes por permitirme realizar los análisis en el laboratorio de beneficio mineral y pirometalurgia.

Al profesor Walter Pardave por sus recomendaciones, valiosos consejos y aportes tanto académicos como de la vida misma. Al profesor Hernando Mendoza por sus recomendaciones para la culminación de este proyecto. A Yenni Santamaria estudiante de Ingeniería Metalúrgica por sus valiosos aportes y su carisma que hicieron más amena cada situación

A esos amigos incondicionales (Oso, Gabi, Dani, Pedrito, Andrés).

A todos los compañeros y amigos que hicieron parte de este recorrido compartiendo malos y buenos momentos. De todos aprendí no solo en lo académico también en lo personal, cada uno de alguna manera hace parte de la persona que soy hoy.

A todos los docentes que hicieron parte fundamental de mi formación.

Contenido

Introducción.....	17
1. Objetivos.....	21
1.1 Objetivo General	21
1.2 Objetivos Específicos	21
2. Localización.....	22
3. Marco Teórico.....	24
3.1 Depósitos Epitermales.....	24
3.1.1 Epitermal de Baja Sulfidación.	25
3.1.2 Epitermal de Alta Sulfidación.....	25
3.2 Geometalurgia.....	27
3.2.1 Mineralogía.....	28
3.2.2 Liberación.....	28
3.2.3textura.....	28
3.2.4 Química Mineral.....	28
3.3 Liberación Mineral.....	28
3.4 Procedimiento	29
4. Marco Geológico Local.....	31
4.1 Rocas del Proterozoico	32
4.1.1 Neises de Bucaramanga y Anfibolita (Pen, Pea).	33

4.2 Rocas del Mesozoico.....	34
4.2.1 Alaskita (Trtal).....	35
4.2.2 Brecha Tectónica – Hidrotermal (Nbr).....	36
4.2.3 Depósitos Coluviales (Qd).....	37
4.3 Geología Estructural Local.....	38
5. Metodología.....	40
5.1 Etapa 1: Revisión Bibliográfica.....	40
5.2 Etapa 2: Reconocimiento del Área.....	40
5.3 Etapa 3: Laboratorio.....	41
5.4 Etapa 4: Oficina.....	41
6. Grado de Liberacion Mineral.....	43
7. Caracterizacion Mineralogica.....	45
7.1 Veta 1.....	46
7.1.1 Localización de la Veta y Ubicación de la Muestra.....	46
7.1.2 Composición Mineralógica M4.....	47
7.1.3 Análisis Petrográfico.....	48
7.2 Veta 5.....	49
7.2.1 Localización de la Veta y Ubicación de la Muestra.....	49
7.2.2 Composición Mineralógica M41.....	51
7.2.3 Análisis Petrográfico.....	51
7.3 Veta 7.....	52
7.3.1 Localización de la Veta y Ubicación de la Muestra.....	52
7.3.2 Composición Mineralógica.....	53

7.3.3 Análisis Petrográfico	54
7.4 Veta 14.....	56
7.4.1 Localización de la Veta y Ubicación de la Muestra.....	56
7.4.2 Composición Mineralógica.....	57
7.5 Veta 17.....	59
7.5.1 Localización de la Veta y Ubicación de la Muestra.....	59
7.5.2 Composición Mineralógica.....	61
7.5.3 Análisis Petrográfico	61
7.6 Veta 17.....	62
7.6.1 Localización de la Veta y Ubicación de la Muestra.....	62
7.6.2 Composición Mineralógica.....	63
7.6.3 Análisis Petrográfico.	64
8. Geoquímica del Oro	65
8.1 Ensayo al Fuego	65
8.2 Caracterización Geoquímica del Oro Mediante el Uso de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).....	67
8.2.1 Resultados de MEB para la Veta 1- Muestra 4	67
8.2.2 Resultados de MEB para la Veta 17-Muestra 24.	69
8.2.4 Resultados de MEB para la Veta 14- Muestra 18	70
8.3 Resultados de Difracción Convencional de Rayos-X (Drx).....	73
8.3.1 Análisis Bulk.....	74
8.3.2 Análisis DRX para Arcillas	81
9. Acoplamiento con los Procesos de Beneficio Mineral.....	86

9.1. Alternativas de Beneficio de Minerales.....	88
10. Discusión de Resultados	91
11. Conclusiones	93
12. Recomendaciones.....	94
Referencias Bibliograficas.....	95

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Coordenadas del proyecto</i>	23
Tabla 2. <i>Información de las muestras seleccionadas para el análisis</i>	45
Tabla 3. <i>Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra M9</i>	82

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Ubicación del polígono del proyecto sobre el distrito minero Vetas -California (DMVC).	23
<i>Figura 2.</i> Tipos de depósitos epitermales.	26
<i>Figura 3.</i> Método de liberación mineral. Tomado y adaptado de microscopía óptica y sus aplicaciones en metalurgia.....	30
<i>Figura 4.</i> Mapa geológico local. Tomado de archivo interno	31
<i>Figura 5.</i> Distribución de las 24 vetas presentes en el área del proyecto.	32
<i>Figura 6.</i> Características macroscópicas del neis de Bucaramanga.	34
<i>Figura 7.</i> Rocas ígneas tipo granito Alaskita, se encuentra muy fracturada. Tomado de archivo interno empresa minera.	36
<i>Figura 8.</i> Brecha clastosoportada con abundante pirita, clastos subangulares y una matriz con abundante Hematita. Sondeo LB389 en 276.9 m.	37
<i>Figura 9.</i> Vistas en planta del modelo estructural del Proyecto.....	39
<i>Figura 10.</i> Metodología del proyecto.	42
<i>Figura 11.</i> Etapas de reducción de tamaño para el cálculo del grado de liberación mineral ...	43
<i>Figura 12.</i> Microfotografías representativas del grado de liberación mineral para diferentes tamaños de malla.....	44
<i>Figura 13.</i> Vetas seleccionadas para análisis mineralógico y SEM.	46
<i>Figura 14.</i> Imagen 3D de la veta 1, ubicación del sondeo y su correspondiente muestra (M4)	47
<i>Figura 15.</i> A-B. Brecha matriz soportada, muestra 4.	48

<i>Figura 16.</i> Aspecto microscópico de la muestra 4 proveniente de la veta 1.....	49
<i>Figura 17.</i> Imagen 3D de la veta 5, ubicación del sondeo y su correspondiente muestra (M41).....	50
<i>Figura 18.</i> Descripción macroscópica de la muestra 41 proveniente de la veta 5.	51
<i>Figura 19.</i> Aspecto microscópico de la muestra 41 proveniente de la veta 5.....	52
<i>Figura 20.</i> Imagen 3D de la veta 7, ubicación del sondeo y su correspondiente muestra (M45).....	53
<i>Figura 21.</i> Descripción macroscópica de la muestra 45 proveniente de la veta 7.	54
<i>Figura 22.</i> (a) Aspecto microscópico de la muestra 45 proveniente de la veta 7.....	55
<i>Figura 23.</i> Imagen 3D de la veta 14, ubicación del sondeo LB780 y su correspondiente muestra (M18).....	57
<i>Figura 24.</i> Descripción macroscópica de la muestra 18 proveniente de la veta 14.....	58
<i>Figura 25.</i> Aspecto microscópico de la muestra 18 proveniente de la veta 14.	59
<i>Figura 26.</i> Imagen 3D de la veta 17, ubicación del sondeo LB764 y su correspondiente muestra (M24).....	60
<i>Figura 27.</i> Características mineralógicas macroscópicas para la muestra 24.....	61
<i>Figura 28.</i> Aspecto microscópico de la muestra 24 proveniente de la veta 17.	62
<i>Figura 29.</i> Imagen 3D de la veta 17, ubicación del sondeo LB773 y su correspondiente muestra (M25).....	63
<i>Figura 30.</i> Características mineralógicas macroscópicas para la muestra 25.....	64
<i>Figura 31.</i> Aspecto microscópico de la muestra 25 proveniente de la veta 17.....	64
<i>Figura 32.</i> Procedimiento para llevar a cabo el ensayo al fuego.....	66
<i>Figura 33.</i> Geoquímica del oro en la primera región de la muestra.....	68
<i>Figura 34.</i> Geoquímica del oro en la segunda región de la muestra 4.....	69
<i>Figura 35.</i> Geoquímica del oro para la muestra 24.....	70

<i>Figura 36.</i> Geoquímica del oro para la muestra 18	71
<i>Figura 37.</i> Geoquímica del oro para la muestra 18.	72
<i>Figura 38.</i> Geoquímica del oro para la muestra 18	73
<i>Figura 39.</i> Vetas con su correspondiente muestra para análisis DRX.....	74
<i>Figura 40.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065001.....	75
<i>Figura 41.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065002.....	76
<i>Figura 42.</i> Figura. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065003.	76
<i>Figura 43.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065004.....	77
<i>Figura 44.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065005.....	78
<i>Figura 45.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065006.....	79
<i>Figura 46.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065007.....	79
<i>Figura 47.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065008.....	80
<i>Figura 48.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.	82

<i>Figura 49.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.....	83
<i>Figura 50.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.....	83
<i>Figura 51.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.....	84
<i>Figura 52.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.....	84
<i>Figura 53.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.....	85
<i>Figura 54.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.....	85
<i>Figura 55.</i> Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra M49.....	86
<i>Figura 56.</i> Prueba de ángulo de contacto sobre la pirita con xantato isopropílico de sodio....	87
<i>Figura 57.</i> Alternativa 1 para el beneficio de minerales de coexistencia	89
<i>Figura 58.</i> Alternativa 2 para el beneficio de minerales de coexistencia	90
<i>Figura 59.</i> Alternativa 3 para el beneficio de minerales de coexistencia	91

Resumen

Título: Caracterización Mineralógica Y Geoquímica De La Mineralización Vetiforme De Au-Ag De La Quebrada Aserradero, Vereda Angosturas, Municipio De California, Santander: Su Incidencia En El Procesamiento Y Beneficio Mineral *

Autores: Carolina Santamaria Galvis **

Palabras clave: Macizo de Santander, mineralización hidrotermal, argílica, argílica avanzada, filica, grado de liberación, procesamiento mineral

Descripción:

El distrito minero de Vetas-California es un referente minero en el macizo de Santander, caracterizado por la presencia de mineralizaciones de tipo hidrotermal y pórfidos. Cerca de la quebrada la baja se desarrolla una serie de mineralizaciones vetiformes y brechoides bajo un dominio estructural relacionado a fallas locales como la baja, Mongora, Angosturas y fallas menores asociadas. En la zona de estudio se encuentran 22 vetas paralelas entre sí con rumbo NE y buzando 75-80° al Norte. Con base en los análisis mineralógicos realizados a seis secciones delgadas mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido junto con el análisis de difracción de rayos X, se clasifica este depósito como epitermal de media a alta sulfidación. Los minerales de alteración hidrotermal incluyen cuarzo, arcillas (illita y grupo caolín), pirita, sericita, moscovita y alunita. Las fases de alteración hidrotermal incluyen argílica, argílica avanzada, Silicificación y filica. La mineralización de Au-Ag está asociada con la alteración argílica y filica. El grado de liberación óptimo para la pirita se logró con malla 100, este resultado fue obtenido a partir de la molienda del mineral cabeza y su análisis en microscopio. La presencia de minerales arcillosos del grupo de la caolinita, predominantemente dickita representa un inconveniente para lograr un eficaz proceso de molienda y flotación debido a la disminución del flujo del procesamiento mineral, disminución de la recuperación de minerales de interés por un consecuente aumento de la viscosidad, igualmente su presencia implica un mayor gasto económico durante el proceso de cianuración, por lo cual estos minerales deben ser eliminados durante el proceso de flotación. El sistema hidrotermal se derivó de un magma calco alcalino y el depósito es definido como un depósito de oro hidrotermal de media a alta sulfuración hospedado en roca calco alcalina.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director Carlos Alberto Ríos

Abstract

Title: Caracterización Mineralógica Y Geoquímica De La Mineralización Vetiforme De Au-Ag De La Quebrada Aserradero, Vereda Angosturas, Municipio De California, Santander: Su Incidencia En El Procesamiento Y Beneficio Mineral *

Author: Carolina Santamaria Galvis **

Keywords: Santander massif, hydrothermal mineralization, argillic, advanced argillic, phyllic, degree of release, mineral processing

Description:

The mining district of Vetás-California is a mining reference in the Santander massif, characterized by the presence of hydrothermal and porphyry mineralizations. A series of vetiform and brechoid mineralizations develop near the La Baja brook under a structural domain related to local faults such as “La Baja”, “Mongora”, “Angosturas” and associated minor faults. In the study area there are 22 veins parallel to each other with a NE heading and dipping 75-80 ° to the North. Based on the mineralogical analysis performed on six thin sections by means of optical microscopy and scanning electron microscopy along with the diffraction analysis of X-ray this deposit is classified as medium to high sulfidation hydrothermal. Hydrothermal alteration minerals include quartz, clays (illite and kaolin group), pyrite, sericite, muscovite and alunite. The phases of hydrothermal alteration include argillic, advanced argillic, silicification and phyllic. Au-Ag mineralization is associated with alteration argillic and phyllic. The optimum degree of release for pyrite was achieved with 100 mesh, this result was obtained from the grinding of the mineral head and its analysis under a microscope. The presence of clay minerals from the kaolinite group, predominantly dickite, represents an inconvenience to achieve an effective milling and flotation process due to the decrease in the flow of the mineral processing, decrease in the recovery of minerals of interest due to a consequent increase in viscosity. Also, its presence implies a greater economic expense during the cyanidation process, so these minerals must be removed during the flotation process. The hydrothermal system was derived from an alkaline tracing magma and the deposit is defined as an alkaline rock-hosted medium to high sulfur hydrothermal gold deposit.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director Carlos Alberto Ríos

Introducción

Los depósitos epitermales son encontrados en una variedad de ambientes geológicos, los cuales reflejan varias combinaciones de configuraciones ígneas, tectónicas y estructurales (White y Hedenquist, 1990). El estilo de mineralización más característico en ambientes post subducción extensional es epitermal de Au de tipo alcalino, asociado con complejos intrusivos alcalinos máficos (Richards, 2009). Los depósitos epitermales se forman a profundidades someras (White & Hedenquist, 1995). Lindgren (Lindgren, 1922, 1933) fue el primero que definió los depósitos epitermales como acumulaciones de metales base y preciosos formados por aguas hidrotermales ascendentes a profundidades relativamente someras (≤ 900 m) y baja temperatura (50–200 °C), típicamente alojado en rocas volcánicas y adyacentes. Ahora existe un consenso de que los depósitos epitermales se forman a una profundidad menor que ~ 1.5 km y generalmente a temperaturas entre 150 and 300 °C (Hedenquist, Arribas, & Gonzales-Urien, 2000) (Simmons, White, y John, 2005). La generación de depósitos minerales de clase mundial depende de muchos factores (Simmons y Brown, 2006) (Richards y Mumin, 2013), pero los aspectos claves incluyen la concentración de metales en el fluido mineral, la duración del sistema mineralizante y que tan eficiente es el proceso deposicional (Banks, Bozkaya, y Bozkaya, 2019). Se han definido dos estilos de mineralización para los depósitos epitermales, formados a partir de fluidos de química contrastante (White & Hedenquist, 1995), epitermales de alta y baja sulfidación. El término sulfidación fue usado por primera vez por (Jeffrey W. Hedenquist, 1986) para introducir dos tipos de mineralización de sistemas hidrotermales relacionados a volcanismo (depósito de alta

sulfidación caracterizado por valencia de azufre oxidado (SO_4^{2-} , $n=+6$) y depósitos de baja sulfidación caracterizados por azufre reducido (H_2S , $n=-2$) estableciendo la importancia de los sulfuros y cloruros como ligantes. En el ambiente de baja sulfuración, los fluidos mineralizantes son aquellos que generalmente se extraen mediante la perforación en sistemas geotérmicos activos (Henley y Ellis, 1983). El pH casi neutro y los fluidos reducidos forman minerales de sulfuro en estado de baja sulfuración (Barton and Skinner, 1979). Por el contrario, los sistemas de alta sulfuración y sus minerales en estado de sulfuración relativamente alta están asociados con fluidos ácidos y oxidados formados en el entorno hidrotermal magmático adyacente a volcanes jóvenes (Ransome, 1907)(Hedenquist y Lowenstern, 1994). Estos dos estilos de mineralización epitermal también se conocen como los tipos adularia-sericita y ácido-sulfato, respectivamente (Heald, Foley, y Hayba, 1987). Los depósitos epitermales son responsables por el 8% del oro, 17% de plata y una cierta cantidad de producción de metales básicos a nivel mundial, siendo la fuente importante de metales preciosos para México, Estados Unidos, Canadá, Chile, Perú, Papua Nueva Guinea y Japón (Wang, Qin, Song, y Li, 2019).

El distrito minero de oro de Bucaramanga está ubicado en el Macizo de Santander de la Cordillera Oriental en el noreste de Colombia. El macizo de Santander muestra una compleja historia metamórfica. La mineralización en el área ocurre en rocas que se originaron en varias fases de sedimentación seguidas de subducción y actividades orogénicas que ocurrieron desde el Precámbrico hasta el Mesozoico. El núcleo del macizo de Santander consiste en anfibolita, paragneis y ortogneis graníticos fuertemente tectonizados, metamorfoseados y localmente migmatizados (Mathur, Ruiz, Herb, Hahn, y Burgath, 2003). La mineralización en el distrito Vetás y California ocurre durante un hiato relativo de un magmatismo de arco en la Cordillera Central (Pindell y Barret, 1990). (Sillitoe, 1972) señala que puede haber una correspondencia entre el

ángulo de la losa de subducción y los tipos de mineralización presentes en la superficie. Trabajos adicionales sobre metalogénesis regional en arcos por (Skewes y Stern, 1994) (Kay y Mpodozis, 2001) y otros han demostrado que el "aplanamiento" de la losa, o el empinamiento inicial de una losa plana, produce un ambiente que favorece la génesis de los depósitos minerales.

Esta región ubicada en el macizo de Santander, cordillera Oriental de Colombia se caracteriza por presentar yacimientos auríferos de tipo epitermal, caracterizados por (Mathur, Ruiz, Herb, Hahn, y Burgath, 2003) como sistemas de alta sulfidación para el sector de California y baja sulfidación para Vetas. (García Ramírez y Uribe Portilla, 2006) realizan la caracterización del yacimiento la Tosca, depósito hidrotermal de oro y plata, el cual clasifican posiblemente de baja sulfidación. Existe un factor dominante en el DMVC, la morfología de los depósitos, generalmente relacionados a vetas, filones, y brechas mineralizadas. El presente trabajo se desarrolla en esta región, más exactamente cerca a la vereda Angosturas, atravesando la quebrada aserradero. En esta zona se han realizado con anterioridad perforaciones de sondeos, de los cuales se obtuvieron las 50 muestras a analizar, igualmente se obtiene información del modelo geológico para el yacimiento que consiste en bloques tabulares o vetas. En este modelo se observan las 22 vetas que lo conforman. Este depósito de metales preciosos (Au-Ag) presenta como característica principal una mineralización asociada a brechas magmático-hidrotermales que presentan un fuerte control estructural, evidenciado en la presencia de varias fallas alrededor del polígono de trabajo. Regionalmente la falla principal es la falla Bucaramanga, sin embargo, el control estructural sobre el depósito está dado por fallas locales como son: falla San Juan, falla la baja, falla de Angosturas, falla Mongora y otras fallas menores asociadas a estas. En total el área tiene 22 vetas modeladas subparalelas entre sí con rumbo NE, y buzando entre 75 y 85 grados al Norte, son vetas con un espesor muy variable

desde metros a centímetros, pero con una buena continuidad tanto lateral como en profundidad, fueron elegidas 5 vetas principales para la petrografía (1,5,7,14,17) *Figura 1*. De cada una de estas vetas se obtuvieron de dos a tres muestras provenientes de núcleos de perforación y de las cuales fueron seleccionadas aquellas más representativas *Figura 2* de acuerdo con su composición mineralógica y el tipo de alteración presente con el fin de obtener información preliminar sobre el porcentaje de minerales mena y ganga presente, además de definir texturas y alteraciones en muestra de mano. Se realizan secciones delgadas para obtener la información petrográfica necesaria y análisis geoquímicos (ensayos al fuego, microscopía electrónica, DRX).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar mineralógica y geoquímicamente la mineralización vetiforme de Au-Ag de la Quebrada Aserradero, Vereda Angosturas, Municipio de California, con el fin de elegir métodos óptimos de procesamiento y beneficio mineral.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar la composición mineralógica de la mineralización vetiforme de Au-Ag.
- Definir el modo de ocurrencia, características texturales y composición química del oro por medio de microscopia electrónica de barrido.
- Determinar el grado de liberación mineral a partir de diferentes reducciones de tamaño del material que aseguren una buena recuperación del mineral de interés.
- Enlazar las propiedades geológicas a los procesos metalúrgicos de beneficio mineral.

2. Localización

El área de estudio se ubica cerca de los municipios de California y Suratá en el departamento de Santander, A 60 Km de Bucaramanga , dentro de lo que se conoce como distrito minero de Vetas-California, ubicada aproximadamente a 60 Km al NW de Bucaramanga en el Departamento de Santander y a 470 km al noreste de Bogotá, cerca de los límites de Santander con Norte de Santander y a 6 km aproximadamente de la población de California (Santander) y al cual se accede desde Bucaramanga, pasando por municipios como Matanza y Suratá por una carretera de 60 km, de los cuales 20 km están pavimentados ,cuando se llega a California se avanzan aproximadamente 10 km por la carretera que conduce a las veredas La Baja y Angostura, pasando por sitios conocidos como el santuario de San Antonio de Padua o el cuatro para finalmente llegar al área.

Geológicamente el proyecto se ubica en la parte oriental del macizo de Santander, cordillera oriental de Colombia. Geográficamente se encuentra a de 7° 22' Norte y 72° 53' este, cuya área está contenida en la plancha 10-1-C a escala 1:25000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi; que forma parte del cuadrángulo H-13 Pamplona. En la tabla 1 se presentan las correspondientes coordenadas del polígono.

Tabla 1.

Coordenadas del proyecto

Coordenadas de delimitación del proyecto	
Norte	Este
1,307,649,999	1,130,404,999
1,307,649,999	1,130,555,998
1,307,397,002	1,130,560,000
1,306,925,998	1,130,089,001
1,307,009,000	1,130,006,000
1,306,981,000	1,129,979,998
1,307,016,000	1,129,979,998
1,307,119,348	1,129,876,649

El polígono de localización se encuentra ubicado sobre el macizo de Santander en la cordillera Oriental de Colombia, esta zona presenta una historia geológica caracterizada por un basamento metamórfico y varios eventos intrusivos, la zona de estudio se encuentra fuera del actual polígono de delimitación del ecosistema de paramo.

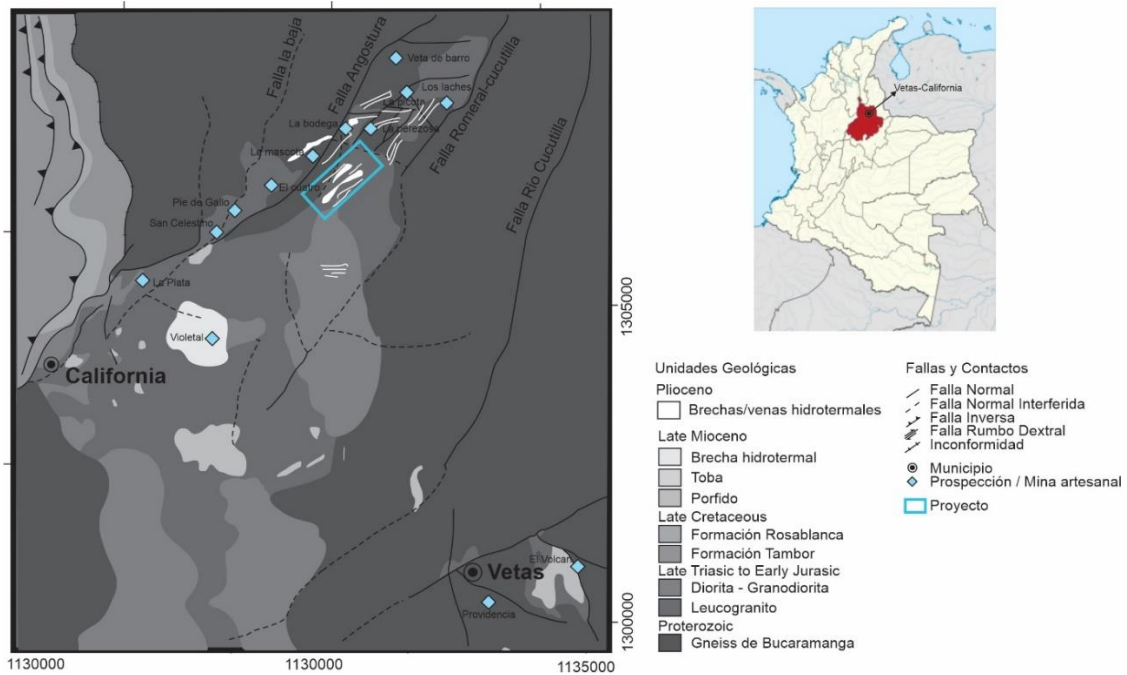


Figura 1. Ubicación del polígono del proyecto sobre el distrito minero Vetas -California (DMVC). Tomado y adaptado de (Bissig, Mantilla Figueroa, y Hart, 2014)

3. Marco Teórico

3.1 Depósitos epitermales.

Los depósitos epitermales son aquellos en los que la mineralización ocurre a poca profundidad. Esta conclusión se basó inicialmente en reconstrucciones geológicas, mineralogía y texturas relacionadas (Lindgren, 1933).

Posteriormente, se ha refinado con datos de inclusiones fluidas para indicar que los minerales epitermales se forman en el rango de temperatura de $<150^{\circ}\text{C}$ a $\sim 300^{\circ}\text{C}$, desde la superficie hasta una profundidad de 1 a 2 km.

Estos depósitos abarcan dos estilos principales de mineralización epitermal, baja sulfidación y alta sulfidación en los que el metal económico dominante es generalmente el oro.

Realizar estudios de campo para observar las relaciones litológicas entre la roca caja y las venas, vetas o brechas que lo intruyen, junto a la identificación de la mineralización, alteraciones presentes y datos fisicoquímicos como el Ph permiten realizar la caracterización de estos depósitos en alguno de los dos estilos planteados, esta diferenciación es primordial para llevar a cabo la exploración ya que si bien es cierto que ambos presentan alteraciones mineralógicas similares la ubicación de estas zonas en cada estilo de mineralización es diferente, identificarlo dará indicios sobre la dirección y profundidad en la que se encuentra la parte más prospectiva del sistema.

3.1.1 Epitermal de baja sulfidación. En los sistemas de baja sulfidación, el fluido se encuentra a una profundidad de 1-2 km, tiene un pH cercano al neutro y se reduce, a mayores profundidades se encuentra en equilibrio con la roca hospedante. El líquido en ebullición se eleva a lo largo de las zonas permeables depositando minerales de mena y ganga y puede descargar de fuentes termales de pH casi neutral. El vapor separado con CO₂ y H₂S se condensa en la zona vadosa para formar agua calentada por vapor, la oxidación ácida del H₂S.

Estudios isotópicos han mostrado que el fluido hidrotermal en ambientes de baja sulfidación está dominado por agua meteórica, pero algunos sistemas contienen agua y gases reactivos de origen magmático (Hedenquist y Lowenstern, 1994)

Los fluidos que se elevan desde gran profundidad se han equilibrado con sus rocas hospedadoras, por lo que se reducen y tienen un pH casi neutro (Giggenbach y Glover, 1992); esta reacción da como resultado que las principales especies en el fluido sean NaCl, CO₂ y H₂S. La ebullición a poca profundidad genera un vapor rico en CO₂ y H₂S que puede condensarse cerca de la superficie en la zona vadosa, formando aguas de sulfato de ácido calentadas con vapor por oxidación de H₂S (pH 2-3 aguas con una temperatura cercana a 100 ° C).

3.1.2 Epitermal de alta sulfidación. En los sistemas de alta sulfidación, los volátiles magmáticos ascienden al ambiente epitermal donde son absorbidos por el agua meteórica, el HCl y el SO₂ forman una solución altamente ácida que lixivia la roca hacia afuera del conducto del fluido. Minerales metálicos pueden ser introducidos en esta roca lixiviada por fluidos magmáticos posteriores (White y Hedenquist 1995).

En el ambiente de alta sulfuración, los componentes reactivos derivados de una fuente magmática oxidada ascienden a la superficie cercana con poca interacción agua-roca en

profundidad. El vapor rico en HCl y SO₂ puede ser absorbido por el agua subterránea (Rye, 1993), lo que resulta en un fluido caliente (200-300°C), altamente ácido (pH 0-2) y oxidado que reacciona ampliamente y lixivia la roca huésped a poca profundidad. Por lo tanto, una diferencia importante entre estos dos tipos de fluidos es el grado en el que se han equilibrado con sus rocas huésped por debajo del nivel de deposición de mineral.

Las características más básicas de cualquier depósito de mena son su forma, mineralogía, texturas y zonas de alteración (White y Hedenquist, 1995). Para estos dos tipos de depósitos se observan varias características similares, pero también algunas características particulares como la forma del depósito y las zonas de alteración.

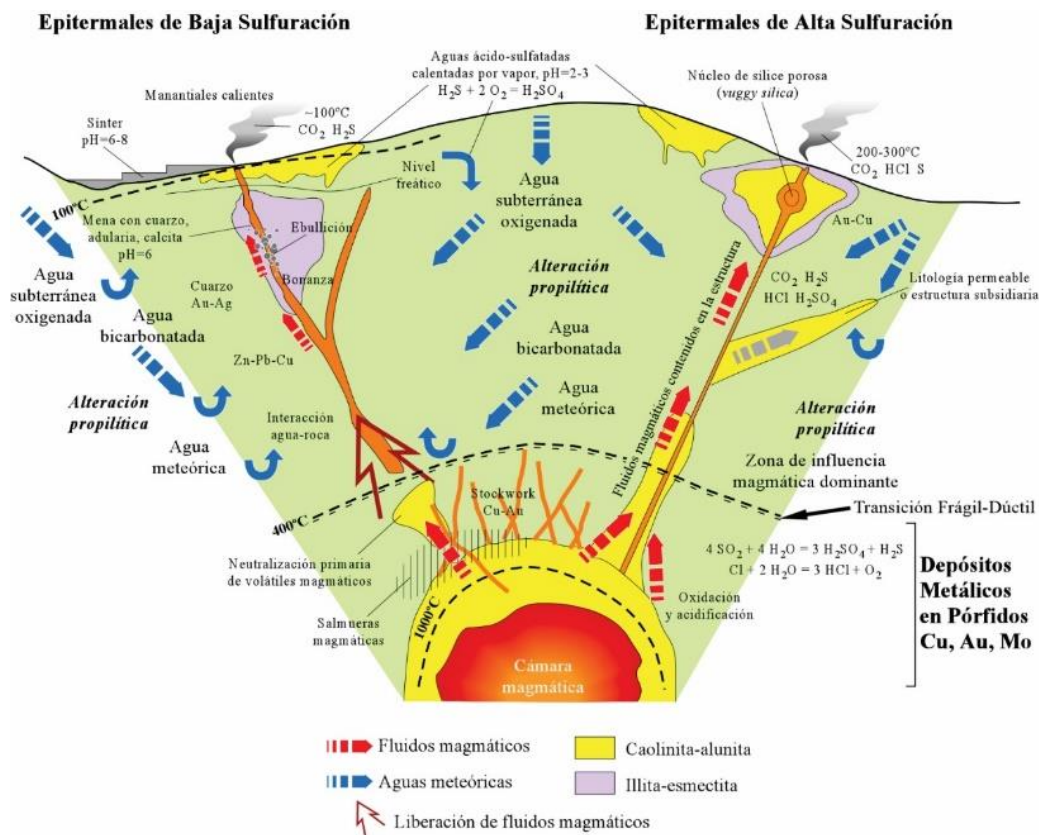


Figura 2. Tipos de depósitos epitermales. Hedenquist en Camprubi et al (2003).

3.2 Geometalurgia

La geo metalurgia es el análisis de datos geológicos espacialmente correlacionados para un modelamiento predictivo de las operaciones metalúrgicas de extracción. (Alruiz, Morell, Suazo, y Naranjo, 2009)(Suazo, Kracht, y Alruiz, 2010) (Alessandro Navarra, Menzies, Jordens, & Waters, 2017). La geometalurgia es una herramienta que involucra a especialistas en el campo de la geología, la microscopía, la minería y la metalurgia extractiva para optimizar los procesos de explotación y beneficio de los minerales. Esto contribuye a tener una perspectiva más amplia del sistema de la cadena de valor mineral. (Alessandro Navarra et al., 2017), coordinando la extracción, almacenamiento y mezcla con las operaciones que ocurren dentro de las plantas de procesamiento mineral. Esta perspectiva supera las barreras interdisciplinarias tradicionales permitiendo decisiones estratégicas más efectivas y prácticas operativas (A Navarra, Grammatikopoulos, y Waters, 2018). Los modelos geo metalúrgicos han sido desarrollados para relacionar el rendimiento del circuito de molienda con los datos mineralógicos entrantes (Alruiz et al., 2009) y posteriormente predecir la cinética de flotación (Suazo et al., 2010).

La incertidumbre geológica es especialmente crucial para las plantas de procesamiento de minerales que son alimentadas por cuerpos de mineral cercanos (Montiel y Dimitrakopoulos, 2015)(Goodfellow y Dimitrakopoulos, 2016). Este tipo de incertidumbre está relacionada a la escasez de muestras de núcleo de perforación utilizadas para caracterizar el yacimiento (A Navarra et al., 2018).

Los modelos geo metalúrgicos son desarrollados considerando los siguientes cuatro aspectos, los cuales están listados en mayor grado de detalle:

3.2.1 Mineralogía. Distribución y correlación entre la fracción de masa de los diferentes minerales.

3.2.2 Liberación. Distribución de minerales en partículas separadas en función del tamaño de partícula, exposición y grado de libertad.

3.2.3 Textura. Distribución, forma y orientación de granos de cristal dentro de la matriz mineral.

3.2.4 Química mineral. Correlaciones entre aspectos anteriores y la presencia de elementos de interés o elementos de penalización.

3.3 Liberación mineral

El denominado grado de liberación es una expresión cuantitativa de la magnitud en la que la molienda es capaz de obtener partículas minerales “libres”; su determinación solo es posible mediante el estudio microscópicos, y dado que es un parámetro de importancia decisiva tal determinación debe basarse en una metodología técnica y científicamente bien fundamentada. La determinación del grado de liberación puede representar una ayuda invaluable al momento de diseñar procesos de tratamiento, para incrementar la eficiencia de plantas en operación e incluso, para evaluar el rendimiento de equipo de molienda y/o clasificación.

Los minerales que requiere la industria para su aprovechamiento generalmente ocurren como agregados heterogéneos asociados entre sí o con intercrecimiento. Estas asociaciones minerales contienen una o varias especies minerales aprovechables (menas) y un número igual o mayor de especies minerales estériles (ganga). De manera que, siendo el objetivo último de toda planta de

beneficio mineral obtener concentrados de un mineral o minerales mena se hace evidente la necesidad de realizar a priori una separación o liberación del material mena-ganga.

Para que este proceso tenga un alto grado de certeza se deben identificar inicialmente los minerales presentes, por esta razón el uso de microscopio o lupa se hace necesario.

Una deducción a priori nos permite observar que los fragmentos de determinada muestra mineral fragmentada tendrá partículas poli minerales para los tamaños gruesos y mono minerales en los tamaños más finos; a partir de esta idea se puede pensar que para conseguir un grado de liberación mineral mayor simplemente habría que moler en exceso la muestra y en teoría esto es cierto, sin embargo, resultaría económica y tecnológicamente inviable ya que se tendría una producción excesiva de granos finos y costos desproporcionados derivados de las diferentes fases de molienda a la que el material debería ser sometido.

3.4 Procedimiento

Para realizar el análisis del grado de liberación mineral, entendiéndose este como el promedio calculado a partir de las variadas magnitudes de liberación alcanzadas por cada mineral inicialmente se realiza la debida fragmentación de la muestra, teniendo en cuenta que el análisis se realizara sobre diferentes tamaños de partículas definidos por el número de malla utilizado.

Posteriormente se realiza la determinación cuantitativa de la liberación alcanzada por cada especie mineral, para esto se establecen dos porcentajes, el área ocupada por cada uno de los constituyentes y el área de superficie expuesta o su periferia. Para efectuar correctamente este procedimiento se debe utilizar microscopio o una lupa con el aumento necesario para distinguir las diferentes partículas y los componentes que la conforman.

Para cada mineral se calcula el producto entre las dos áreas mencionadas anteriormente y se suman todos los porcentajes resultantes para cada mineral, finalmente para obtener el grado de liberación se calcula el cociente entre la sumatoria de estos porcentajes y la cantidad de partículas sobre las que se está haciendo el análisis.

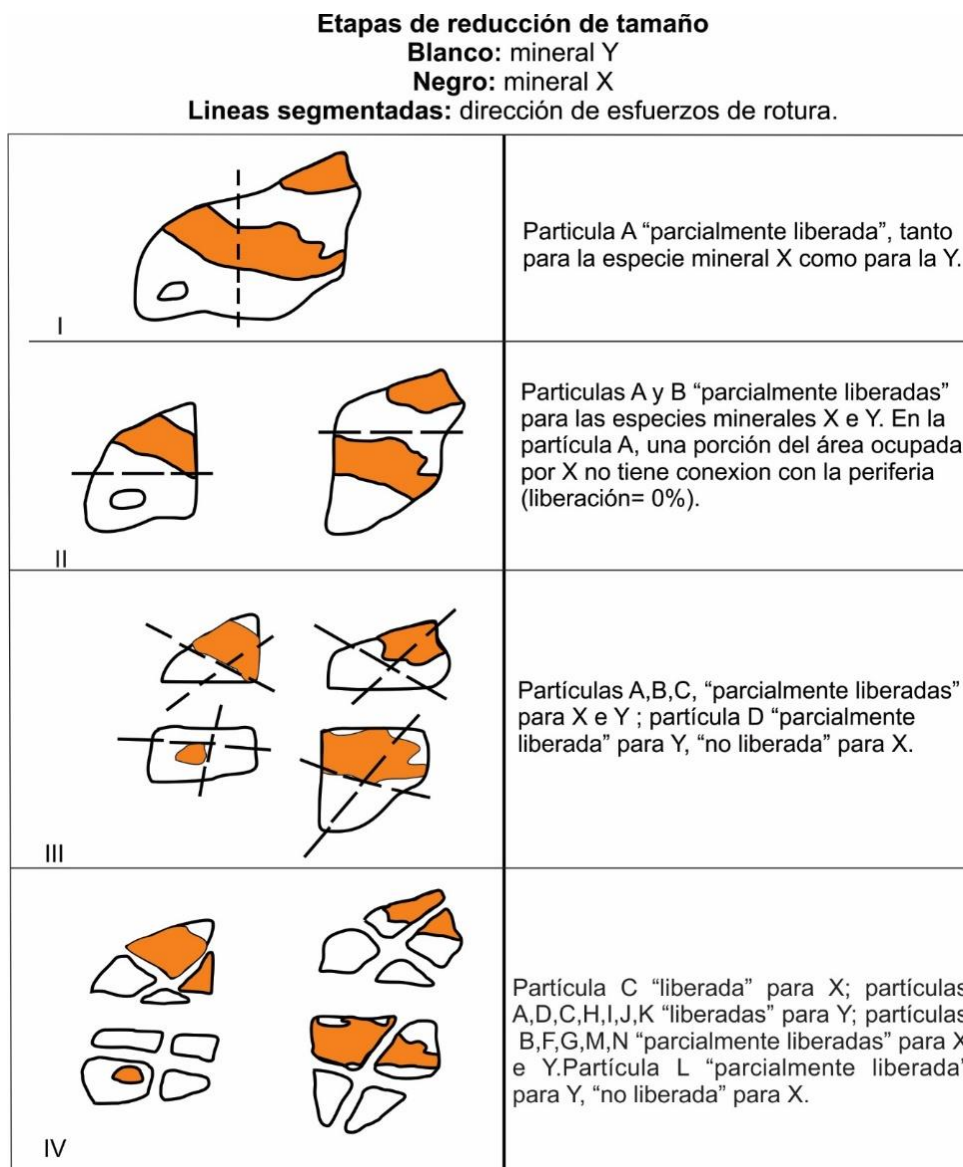


Figura 3. Método de liberación mineral. Tomado y adaptado de "microscopía óptica y sus aplicaciones en metalurgia".

4. Marco Geológico Local

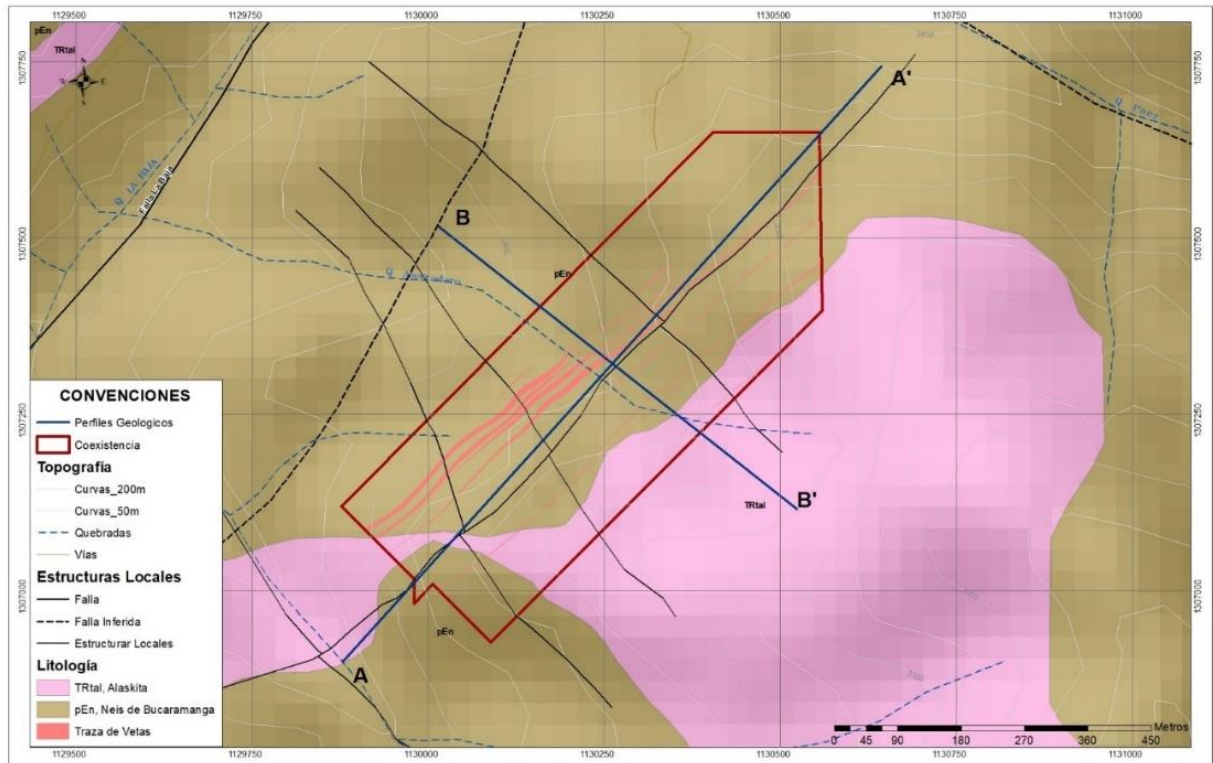


Figura 4. Mapa geológico local. Tomado de archivo interno empresa minera

La zona en la cual se encuentra ubicado el proyecto presenta litologías asociadas a rocas metamórficas del Precámbrico a las que pertenecen el gneis de Bucaramanga, considerada como la unidad más antigua, se encuentran también rocas ígneas de composición granítica del Triásico-Jurásico según (Mantilla Figueroa, Bissig, Cottle, & Hart, 2012)(Mantilla Figueroa, Bissig, Valencia, & Hart, 2013); se indica la evidencia de un pulso magmático de edad Mioceno Tardío

por la presencia de diques y cuerpos porfíricos además de brechas tectónico-hidrotermales de edad Plioceno-Pleistoceno(Rodríguez, 2014) . La información geológica de la zona fue suministrada por la empresa minera que lleva a cabo el proyecto.

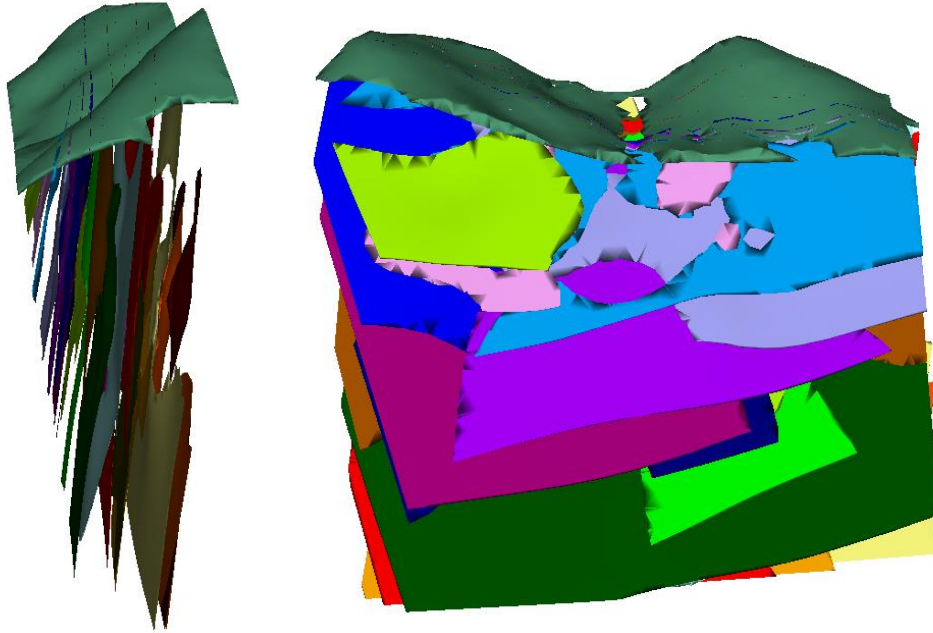


Figura 5. Distribución de las 24 vetas presentes en el área del proyecto.

4.1 Rocas del Proterozoico

Comprende rocas metamórficas que pertenecen al Complejo Bucaramanga constituidas por paragneisses migmatíticos de alto grado de metamorfismo con edades del Proterozoico Temprano (Ward, 1973);(Ordóñez-Carmona, Restrepo Álvarez, & Pimentel, 2006);(Mantilla Figueroa et al., 2012). Este Complejo Migmatítico consta de neises cuarzo-feldespáticos, biotíticos y anfibólicos (hornblenda) (Royero & Clavijo, 2001).

4.1.1 Neises de Bucaramanga y Anfibolita (pEn, pEa). Esta unidad es la de mayor extensión en la zona de estudio y es la unidad más representativa ya que en ella se realizará la explotación aurífera del proyecto. Consta de una secuencia de paraneises cuarzo feldespáticos, hornbléndicos y cantidades subordinadas de anfibolitas, migmatitas y esporádicamente granulitas. A escala de afloramiento y núcleos de perforación, estas rocas presentan bandeamiento caracterizados por leucosomas (cuarzo-feldespáticos) y mesosomas (biotítico-hornbléndico) cuyos espesores fluctúan entre pocos centímetros y en algunos sectores alcanzan metros de espesor.

Las bandas cuarzo-feldespáticas (leucosomas) presentan minerales generalmente de grano fino a medio (*Figura 6 E*); estas bandas son ricas en feldespato potásico y presentan estructura néisica. Está conformada por individuos hetero blásticos a subidioblásticos de feldespato potásico, plagioclasa, moscovita y cuarzo. Presenta muy bajo contenido en minerales máficos principalmente biotita.

El bandeamiento y segregación de los leucosomas ricos en feldespato potásico son interpretados como el resultado de una fusión parcial durante un metamorfismo de alto grado, teniendo como resultado una migmatización y plegamientos (*Figura 6. A, B y D*).

Los mesosomas se caracterizan por ser de grano medio, oscuros, masivos, con altos contenidos de cristales hetero blásticos subidioblásticos a idioblásticos de hornblenda, en menor proporción biotita y magnetita diseminada (*Figura 6C*). Estas bandas también se observan sobre el valle de la Quebrada La Baja, extendiéndose lateralmente por la margen derecha, entre 200 a 400 metros de espesor.



Figura 6. Características macroscópicas del neis de Bucaramanga. A y B) Neis bandeado con mesosomas (hornblenda y biotita) y leucosomas (cuarzo, feldespato potásico +- plagioclasa). C) Mesosoma (anfíbolita) con textura granoblástica y alto contenido de hornblenda. D) Leucosomas con presencia de bandas me bandas melanocráticas (representadas por alto contenido de biotita) exhibiendo textura augen. E) Neis cuarzo-feldespático (leucosoma) con alto contenido de feldespato k y bajo contenido de minerales máficos (principalmente biotita). Tomado de archivo interno empresa minera.

4.2 Rocas del Mesozoico

En la región aflora un cuerpo intrusivo de edad Triásica a Jurásica, los cuales han aprovechado las zonas de fracturamiento al que está sometido el neis de Bucaramanga, que hace las veces de roca

caja. En general, se trata de cuerpos félsicos con variaciones texturales y composicionales que dependen de las condiciones de emplazamiento.

Los intrusivos de la zona pueden agruparse en dos unidades petrográficamente diferentes:

- La unidad más antigua que está constituida por tonalita con variaciones de granodiorita, y cuarzomonzonita. Se han relacionado a un periodo magmático del Triásico-Jurásico (Goldsmith, Marvin, & Mehnert, 1971)(Dörr, Grösser, Rodriguez, & Kramm, 1995). Las dataciones U-Pb en circones mediante LA-ICPMS, establecieron su edad entorno a los 200 Ma (Mantilla, 2011).
- Pórfidos de composición dacita y andesita, relacionados a un evento magmático del Mioceno que coincide que las edades recientes ligadas al desarrollo de yacimientos minerales tipo pórfido-epitermal en diferentes sitios de la Cordillera de los Andes (Mantilla et al, 2009). Las dataciones U-Pb en circones mediante LA-ICPMS, establecieron su edad en un rango de $8,4\pm 0,2$ Ma (Mantilla et al, 2009) y $10,9\pm 0,2$ Ma (Mantilla et al, 2011).

4.2.1 Alaskita (TRtal). Es una roca ígnea tipo Granito muy leucocrático, es una variedad holocristalina, fanerítica, leucocrática de grano fino a medio, color blanco grisáceo en roca fresca. Compuesta principalmente por cuarzo, feldespato potásico-ortoclasa, plagioclasas.

Esta unidad aflora en la parte sur del polígono del proyecto, se encuentra muy fracturada por la tectónica de la región, además presenta un intenso vetilleo de cuarzo y pirita.



Figura 7. Rocas ígneas tipo granito Alaskita, se encuentra muy fracturada. Tomado de archivo interno empresa minera.

4.2.2 Brecha Tectónica – Hidrotermal (Nbr). Estas brechas comprenden gran parte de los cuerpos mineralizados del Proyecto. Las brechas asociadas a la época Plioceno-Pleistoceno con edades entre 2.6–1.6 Ma (Rodríguez, 2014). Son generadas por varios episodios de rompimiento-sellamiento como resultado de una reactivación dinámica de origen tectónico y cementadas por fluidos hidrotermales, exhibiendo en algunos casos texturas relacionadas a la introducción de fluidos hidrotermales (texturas de cristalización y recristalización de la sílice) y la deformación producida por fallas y cizallamiento (foliación tectónica, redondeamiento de los clastos, matriz fina-triturada).

Las brechas del área de estudio presentan una orientación con tendencia NE, buzando al NW. Estas brechas pueden ser monomícticas o polimícticas, las cuales exhiben cambios de facies de

clasto-soportada (clastos de neis, brecha e intrusivo) a matriz-soportada o cemento soportada, en la Figura se observa un ejemplo de estas brechas.



Figura 8. Brecha clasto soportada con abundante pirita, clastos subangulares y una matriz con abundante Hematita. Sondeo LB389 en 276.9 m. Tomado de archivo interno empresa minera.

4.2.3 Depósitos coluviales (Qd). Son depósitos constituidos por materiales de diversos tamaños en una matriz areno arcillosa, depositados por acción gravitacional. Se presentan en variables entre 1 y 5 m, suprayaciendo las rocas que conforman el macizo rocoso y las unidades sedimentarias. La composición de estos depende de la fuente de aporte, desde la cabecera municipal de California hacia el Este se caracterizan por presentar bloques ígneo-metamórficos.

Para realizar el modelo estructural del área se utilizó la información del logueo geológico de los núcleos de perforación dando como resultado dos familias principales.

4.3 Geología estructural local

Para realizar el modelo estructural del área se utilizó la información del logeo geológico de los núcleos de perforación dando como resultado dos familias principales.

- Familia 1: Patrón estructural N45E, subparalelo al tren de las vetas mineralizado y factor estructural controlador de la mineralización, parte de estas fallas se encuentra mineralizadas y las vetas exhiben rasgos texturales como milonitas, clastos angulares y subangulares, foliación tectónica, y cataclasitas que confirman la correlación de estas fallas con las vetas existentes en esta área esta familia además es paralelo a la falla La Baja que es el rasgo estructural más importante de la zona y que se relaciona con el depósito epitermal.
- Familia 2: Patrón estructural N60W, corresponden a estructuras Riedel sintéticas en este contexto perpendiculares a la familia uno y cortadas por ellas, varias de estas fallas exhiben pequeños desplazamientos de rumbo y son subparalelas a las fuentes hídricas que hay en el área de estudio. Típicamente estas estructuras son afectadas por esfuerzos de cizallamiento, pero acomodan en cierto grado extensión o dilatación tensional.

En la *figura 9*, se muestra la correlación de las fallas modeladas en esta área de estudio con las vetas mineralizadas.

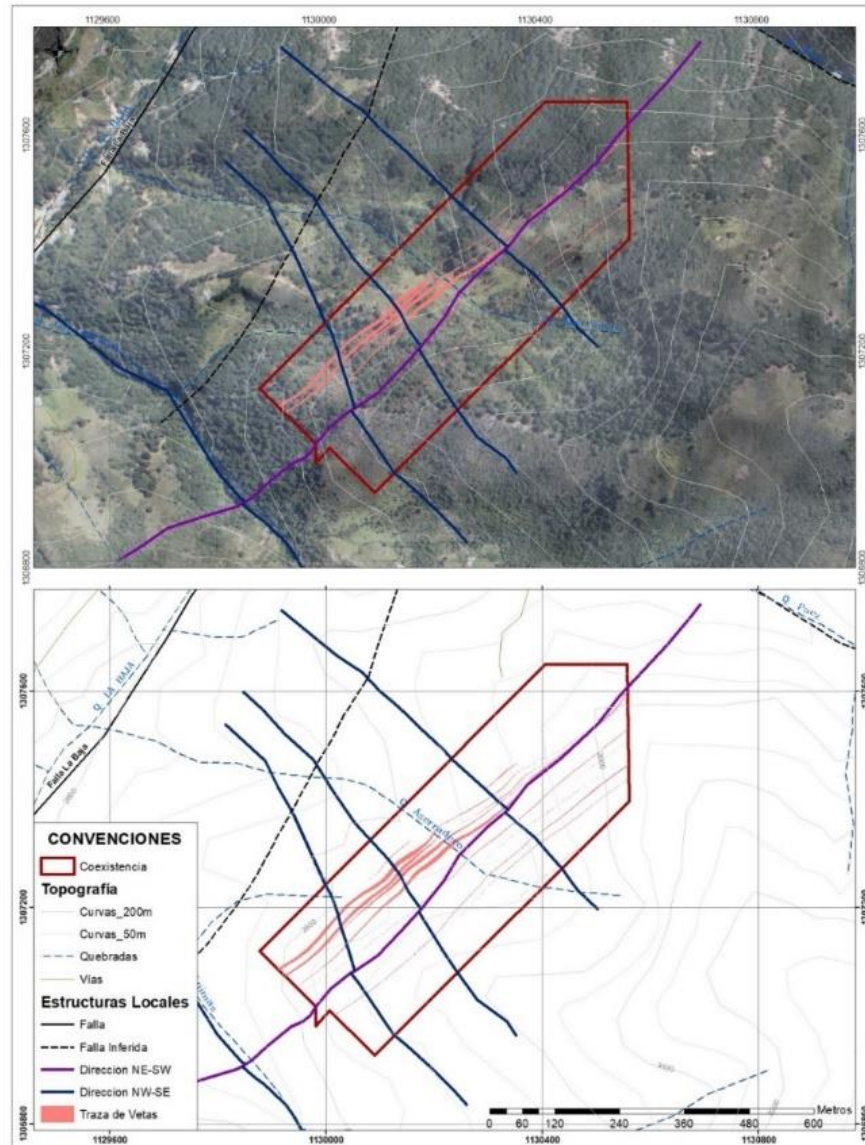


Figura 9. Vistas en planta del modelo estructural del Proyecto. Tomado de archivo interno empresa minera.

5. Metodología

La metodología para la realización de este proyecto se llevó a cabo en varias etapas, como son: 1) revisión bibliográfica, 2) reconocimiento del área y del proyecto, 3) fase de laboratorio, 4) Fase de oficina, todas estas etapas orientadas al cumplimiento a cabalidad de los objetivos planteados inicialmente.

5.1 Etapa 1: revisión bibliográfica

Durante esta etapa se recopiló información proveniente de artículos, tesis, mapas, libros, archivos internos de la empresa, entre otros, con el fin de obtener datos pertinentes respecto a la geología del área de estudio, así como de las técnicas a utilizar y las nuevas herramientas orientadas a mejorar el rendimiento en la prospección minera.

5.2 Etapa 2: reconocimiento del área

Esta actividad se llevó a cabo durante visitas ocasionales al municipio de California, tiempo durante el cual se realizó un recorrido por la zona donde se encuentra ubicado el depósito de mena, además de reconocer minas abandonadas adyacentes a este, durante esta etapa se observaron todos los testigos de perforaciones realizadas durante la fase inicial del proyecto, las diferentes litologías presentes y se reconoció la posible ubicación de la planta de beneficio mineral.

5.3 Etapa 3: laboratorio

En esta etapa se realizó inicialmente la descripción macroscópica de las muestras provenientes de los testigos seleccionados para el análisis, teniendo en cuenta el porcentaje presente de minerales mena y ganga, alteraciones y texturas. Posteriormente se analizaron las secciones delgadas en conjunto con los resultados obtenidos del SEM para obtener la química del oro. Se realizaron análisis de DRX para (8) muestras seleccionadas de diferentes profundidades con el fin de reconocer las características mineralógicas en cada sección del depósito, estos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio instrumental de análisis químico de la Universidad Industrial de Santander y en el laboratorio de Rayos-X en el parque tecnológico Guatiguara (UIS) respectivamente.

5.4 Etapa 4: oficina

Se llevó a cabo la interpretación de los resultados finales y el acoplamiento de estos con el procesamiento metalúrgico para la elaboración de un informe final con toda la información obtenida durante la realización del proyecto.

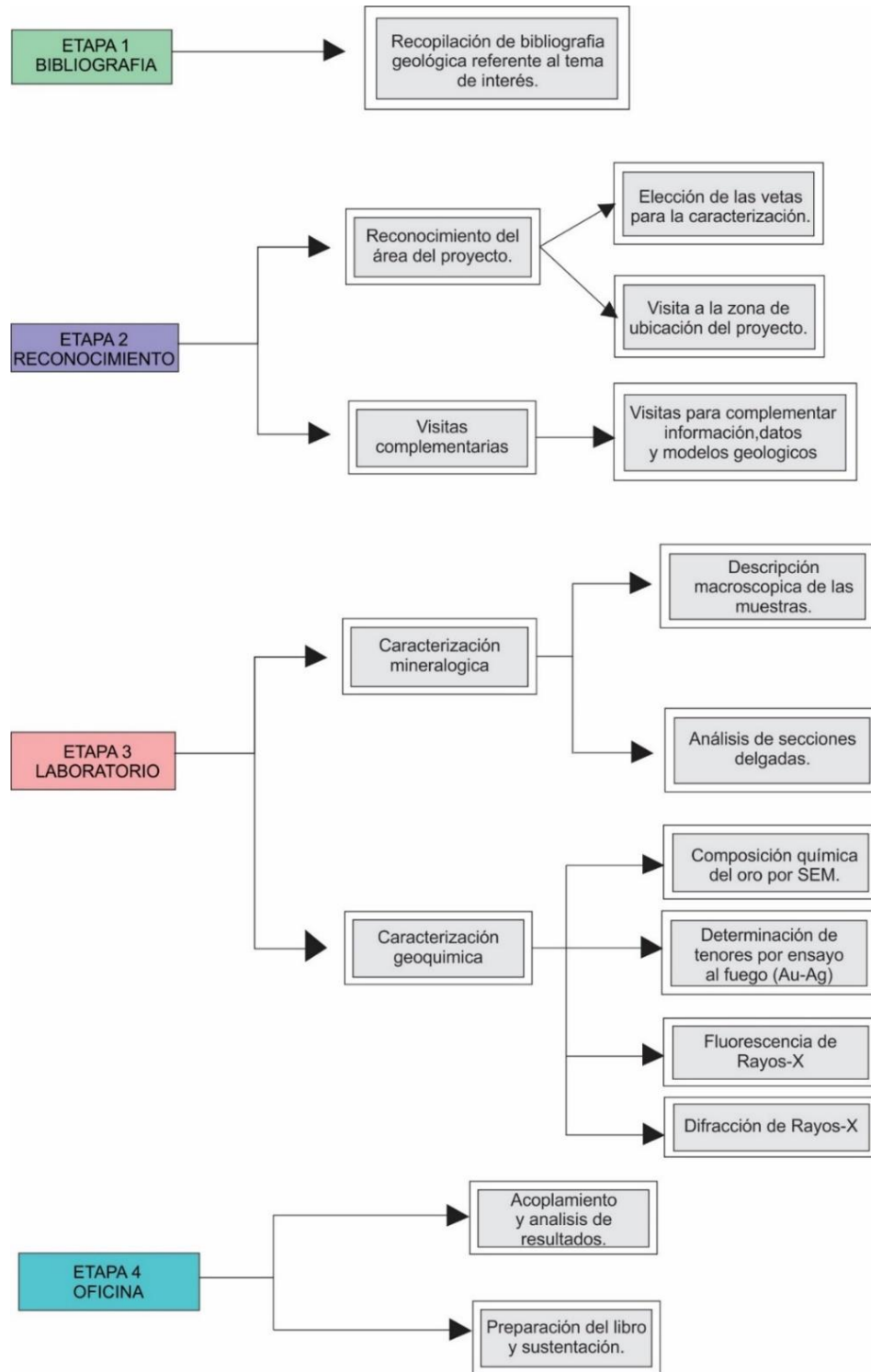


Figura 10. Metodología del proyecto.

6. Grado de Liberación Mineral

El grado de liberación mineral (*Figura 11*) corresponde al promedio calculado a partir de las variadas magnitudes de liberación alcanzadas por cada mineral

Partícula	A	B	C	D	E		
	0.90x100= 90%	0.10x0= 0%					
	0.80x90= 72%		0.20x10= 2%				
			1x100= 100%				
	0.70x80= 56%	0.10x0= 0%		0.20x20= 4%			
	0.80x90= 72%			0.20x10= 2%			
			0.05x5= 0.25%		0.95x95= 90.25%		
		0.02x0= 0%			0.98x100= 98%		
	0.99x100= 99%	0.01x0= 0%					
	0.95x100= 95%	0.05x0= 0%					
	1x100= 100%						
Cálculo del grado de liberación para partículas mixtas A/B/C/D/E, de una malla dada							
Suma de productos area x superficie expuesta			A	B	C	D	E
Máximo teórico de liberación(Total de partículas mixtas =30			1000	1000	1000	1000	1000
Grado de liberación (%)			58.4	0	10.225	0.6	18.825

A	Cuarzo
B	Pirita
C	Alunita
D	Magnetita
E	Feldespato

Figura 11. Etapas de reducción de tamaño para el cálculo del grado de liberación mineral

El material utilizado para la molienda y cálculo del grado de liberación fue un compuesto de las muestras obtenidas de los núcleos de perforación. El grado de liberación óptimo para la pirita se dio con relación a la malla 100-120 con porcentajes de recuperación mayores al 97%. La molienda excesiva, sin embargo, genera sobrecostos por lo que se selecciona la malla 100 como la opción más viable para llevar a cabo el proceso inicial del aprovechamiento mineral. Los diferentes tamaños obtenidos posterior a la molienda y el tamizado se observan en la *Figura 12*.

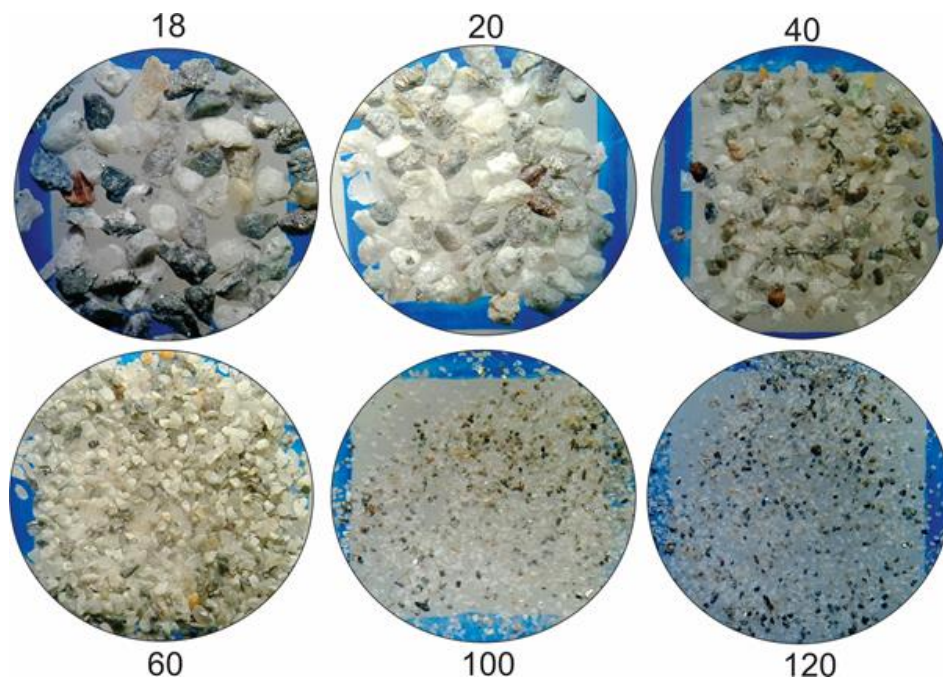


Figura 12. Microfotografías representativas del grado de liberación mineral para diferentes tamaños de malla

7. Caracterización Mineralógica

Se analizó macroscópicamente la mineralogía de todas las muestras provenientes de los sondeos, posterior a este análisis se realizaron 6 secciones delgadas provenientes de 5 vetas seleccionadas según su concentración de Au-Ag, características mineralógicas y el tipo de alteración. Estas muestras fueron analizadas tanto macro como microscópicamente, adicional a esto se verificó la química de los minerales presentes con soporte de microscopía electrónica de barrido (MEB), con esta técnica igualmente se evaluó la composición química del oro; se seleccionaron (8) muestras para realizar análisis de DRX que permitieran determinar los minerales presentes a diferentes profundidades del depósito y análisis de arcillas con el fin de verificar la presencia de estas y saber con exactitud qué tipo de material arcilloso se encuentra presente y de qué manera puede afectar los procesos de beneficio mineral.

Tabla 2.

Información de las muestras seleccionadas para el análisis. Adaptado de archivo interno empresa minera.

HOLE ID	FROM	TO	AG_PPM	AU_PPM	CU_PPM	NSR_USD_t	CODE	Model	MUESTRA
LB750	157	157,73	30	44,3	6660	1537,794	GN	Veta1	4
LB783	338,24	338,95	40,4	104,5	1780	3571,4676	GN	Veta5	41
LB474	263	264	57	90,1	1040	3087,188	GN	Veta7	45
LB780	233,86	234,87	31,5	12,65	9470	472,307	GN	Veta14	18
LB764	251,25	252,17	10	18,95	10	647,813	TBX	Veta17	24
LB773	300,55	301,46	156	47,9	8530	1719,271	GN	Veta17	25

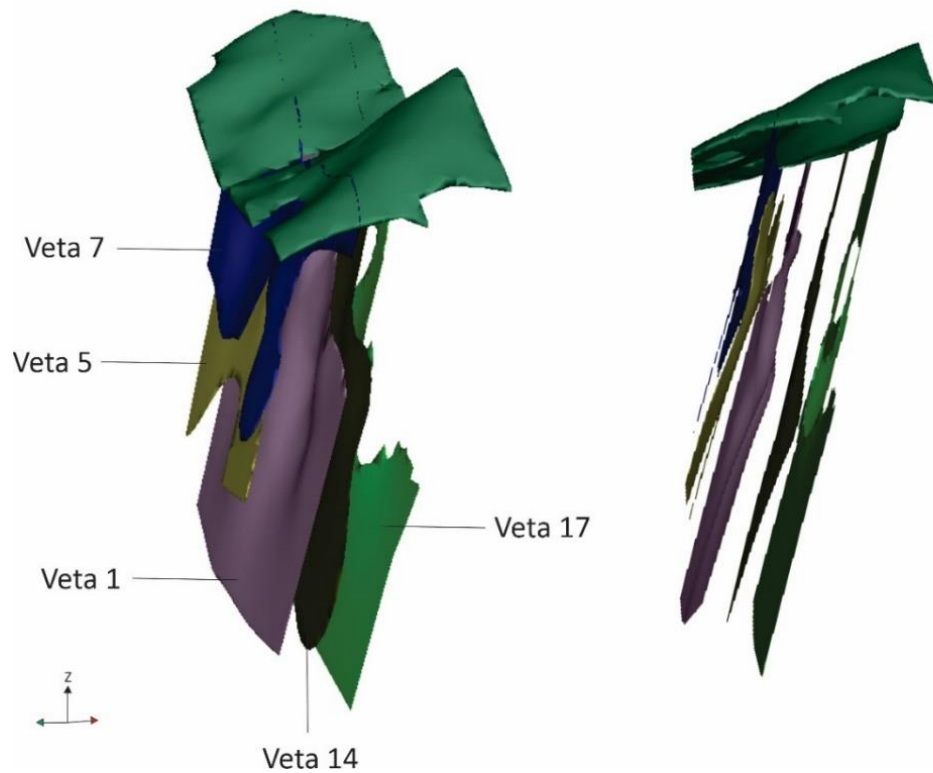


Figura 13. Vetas seleccionadas para análisis mineralógico y SEM.

7.1 Veta 1

7.1.1 Localización de la veta y ubicación de la muestra. La ubicación de la veta 1 está contenida entre los valores X, Y, Z dados a continuación.

X: 1130553.7 m - 1129883.7 m

Y: 1307506.7 m - 1307448.4 m

Z: 3019.6 m - 2208.8 m

Esta veta se encuentra encajada en la unidad metamórfica del gneis de Bucaramanga, cruzando en algunas secciones con secuencias anfibolíticas, intrusivos igneos y es cortada por el sondeo LB750. La extensión total en cada componente está dada por los siguientes datos: en la coordenada X representa 670 m, en Y 58.3 m y en Z 810.8 m.

La muestra seleccionada para esta veta (M4) se ubica en las coordenadas X: 1130375.4 m Y: 1307417.7 m Z: 2740.8 m. En la *figura 14* se observa la dimensión de la veta y la ubicación de la muestra.

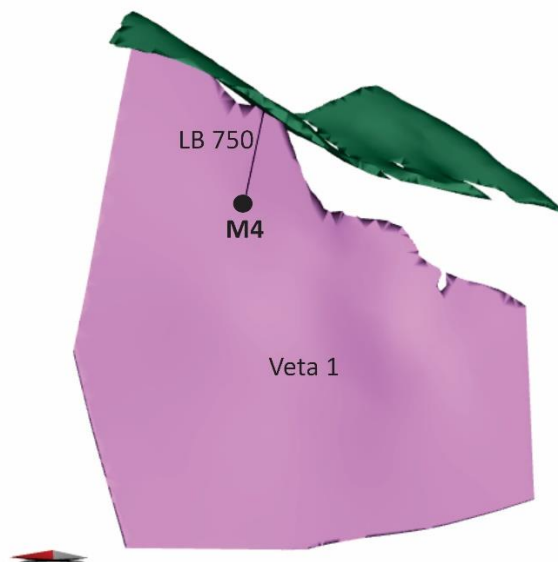


Figura 14. Imagen 3D de la veta 1, ubicación del sondeo y su correspondiente muestra (M4)

7.1.2 Composición mineralógica M4. Brecha oligomictica, matriz soportada silícea, presenta una notoria alteración mineralógica. Es cortada por vetillas compuestas de pirita y en algunas partes con hematita, también se puede encontrar la pirita en forma diseminada. La litología original ha sido reemplazada en su totalidad por efecto del fluido hidrotermal originando esta masa silíce

mineralizada, sin embargo, se considera el gneis como la posible roca original. La muestra presenta una fuerte Silicificación y la asociación mineral cuarzo-pirita-sericita evidencia una alteración filica, en esta alteración ambos feldespatos son transformados a sericita y cuarzo secundario, es común que se presente pirita y cantidades menores de caolinita.

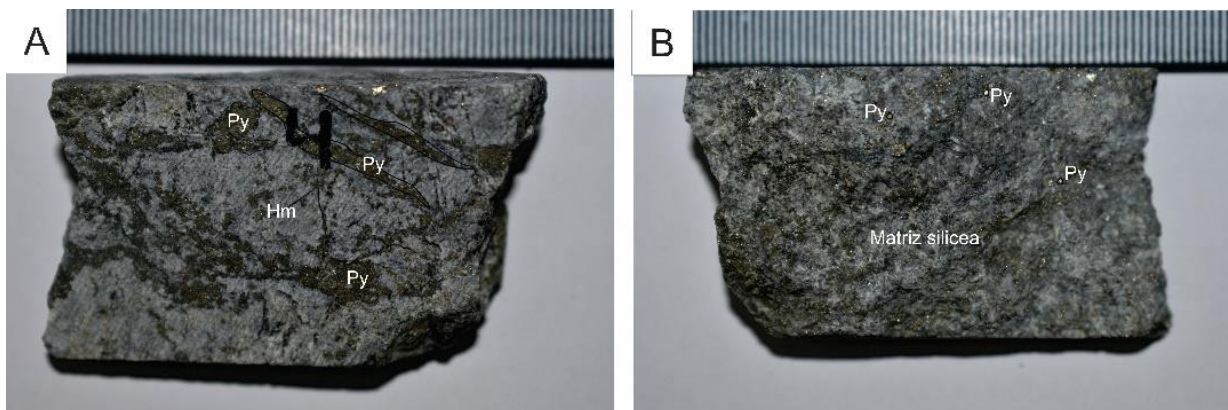


Figura 15. A-B. Brecha matriz soportada, muestra 4. (A) Se observa una matriz silícea, vetillas de pirita y en menor proporción hematita. (B) pirita diseminada en matriz silícea.

7.1.3 Análisis petrográfico. En la *figura 16(a)* la muestra presenta una textura porfídica en NX con fenocristales de cuarzo relictico anhedral y cuarzo microcristalino con minerales opacos (pirita-hematita) en una matriz compuesta por sericita. (b) Textura porfídica en NII, se observa el contacto marcado por los fenocristales de cuarzo anhedral con la matriz de sericita, cristales opacos subhedrales superpuestos y óxidos. (c) Matriz cuarzo-sericita con presencia de minerales opacos, principalmente pirita subhedral, la muestra presenta una textura de tipo cataclástica-porfídica. (d) Presencia de minerales opacos de euhedral a anhedral con tamaños desde 0.5 mm a 0.0001 mm, sobre una matriz cuarzo-sericita.

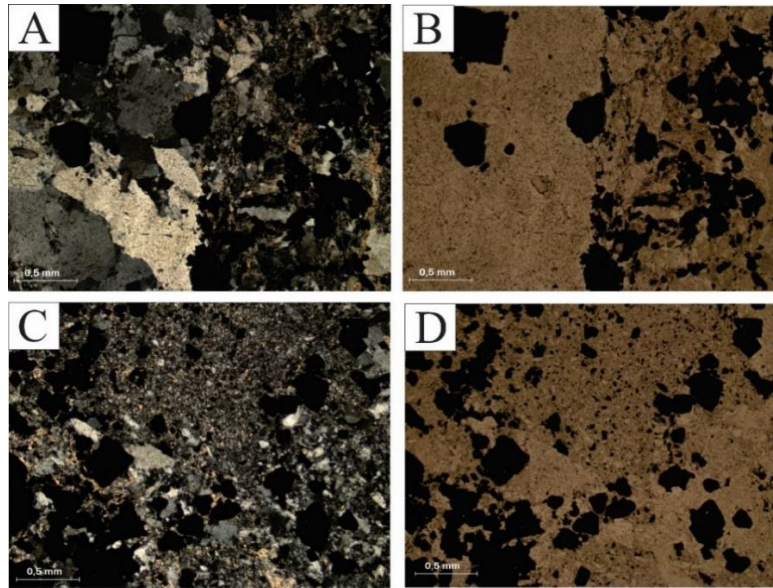


Figura 16. Aspecto microscópico de la muestra 4 proveniente de la veta 1.

La alteración presente en esta muestra es de tipo filica o cuarzo-sericita, formada por cuarzo, arcillas del tipo sericita-illita junto a pirita y otros minerales opacos como la magnetita, estos conforman la matriz de esta sección. La paragénesis mineral está compuesta por **cuarzo ± pirita ± oro.**

7.2 Veta 5

7.2.1 Localización de la veta y ubicación de la muestra. La ubicación de la veta 5 está contenida entre los valores X, Y, Z dados a continuación

X: 1130498.4 m- 1130040.1 m

Y: 1307369.3 m- 1307398.0 m

Z: 2818.8 m- 2386.4 m

Esta veta se encuentra encajada en la unidad metamórfica del gneis de Bucaramanga, se cruza en algunas secciones con secuencias anfibolíticas y es cortada por el sondeo LB783. La extensión total en cada componente está dada por los siguientes datos: en la coordenada X representa 458.29, en Y 28.69m y en Z 432.4.

La muestra seleccionada para esta veta (M41) se ubica en las coordenadas X: 1130106.9 m Y: 1307313.2 m Z: 2490.6 m. En la *figura 17* se observa la dimensión de la veta y la ubicación de la muestra.

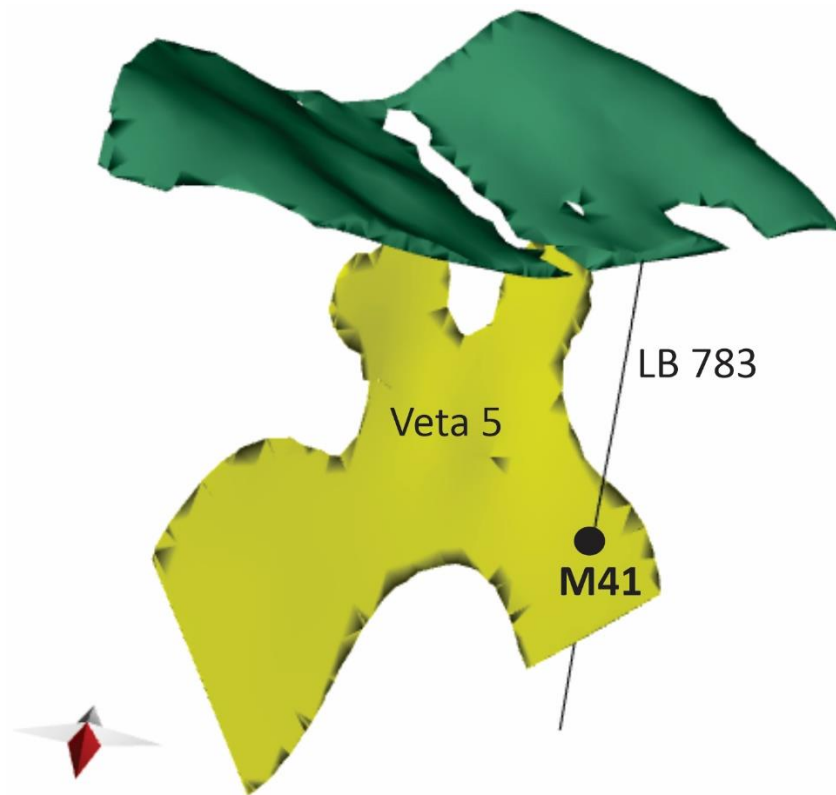


Figura 17. Imagen 3D de la veta 5, ubicación del sondeo y su correspondiente muestra (M41)

7.2.2 Composición mineralógica M41. La muestra 41 proveniente de la veta 5, sondeo LB783 representa un fragmento de brecha hidrotermal matriz soportada silíceo, oligomictica con agregados masivos de pirita. La roca exhibe una composición homogénea como consecuencia de la fuerte alteración como producto de la acción del fluido hidrotermal, como minerales de la mena se encuentra principalmente la pirita y minerales ganga el cuarzo.



Figura 18. Descripción macroscópica de la muestra 41 proveniente de la veta 5.

7.2.3 Análisis petrográfico. En la figura 19 (a) se observa un cristal de cuarzo relictico subhedral en NX con evidencia de extinción ondulante y fracturamiento, la muestra presenta una textura porfirítica-brechoide, gran parte de la sección presenta una fuerte silicificación. (b) Fragmentos de cuarzo relictico subhedral visto en NII. (c) Se observan fragmentos de cuarzo, pirita y feldespatos alterando a sericita, la cual se encuentra conformando la matriz, también se evidencia una microfractura que atraviesa el área en la cual se encontró mediante análisis de MEB un relleno composicionalmente variado, entre ellos cuarzo, telurio de plomo y minerales de Ca, esta asociación cuarzo-pirita-sericita refleja una alteración filica.

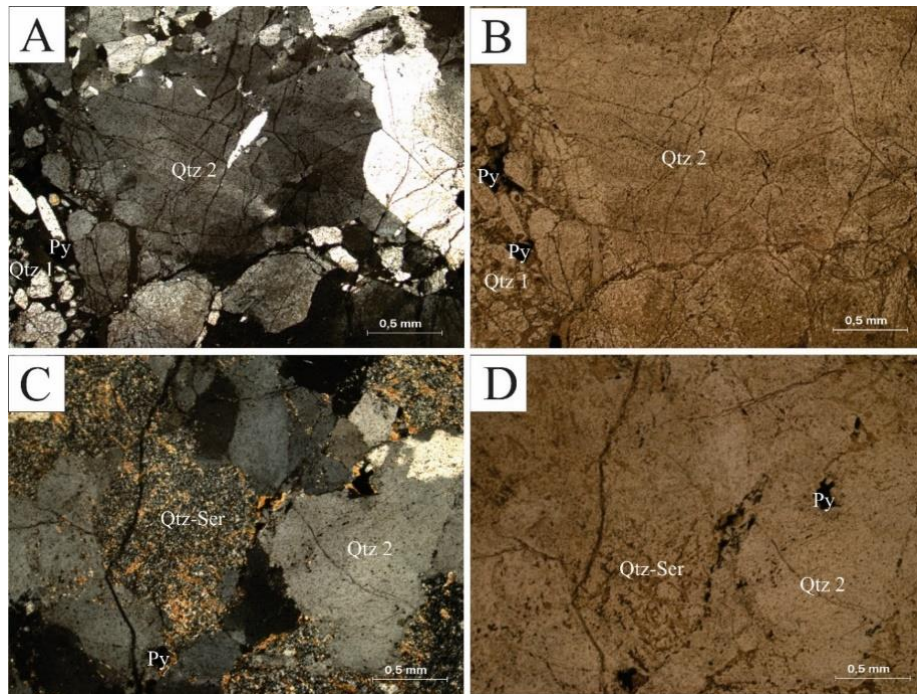


Figura 19. Aspecto microscópico de la muestra 41 proveniente de la veta 5.

La alteración presente en esta muestra es de tipo filica o cuarzo-sericita, formada por cuarzo, sericita-illita y pirita. La paragénesis mineral está compuesta por **cuarzo ± pirita**

7.3 Veta 7

7.3.1 Localización de la veta y ubicación de la muestra. La ubicación de la veta 7 está contenida entre los valores X, Y, Z dados a continuación

X: 1130554.6 m- 1129945.5 m

Y: 1307323.6 m- 1307301.6 m

Z: 2848.2 m- 2476.4 m

Esta veta se encuentra encajada en la unidad metamórfica del gneis de Bucaramanga, se cruza en algunas secciones con secuencias anfibolíticas y es cortada por el sondeo LB783. La extensión total en cada componente está dada por los siguientes datos: en la coordenada X representa 609.1, en Y 22 m y en Z 371.8 m.

La muestra seleccionada para esta veta (M45) se ubica en las coordenadas X: 1130103.6 m Y: 1307317 m Z: 2522.3 m. En la figura (17) se observa la dimensión de la veta y la ubicación de la muestra.

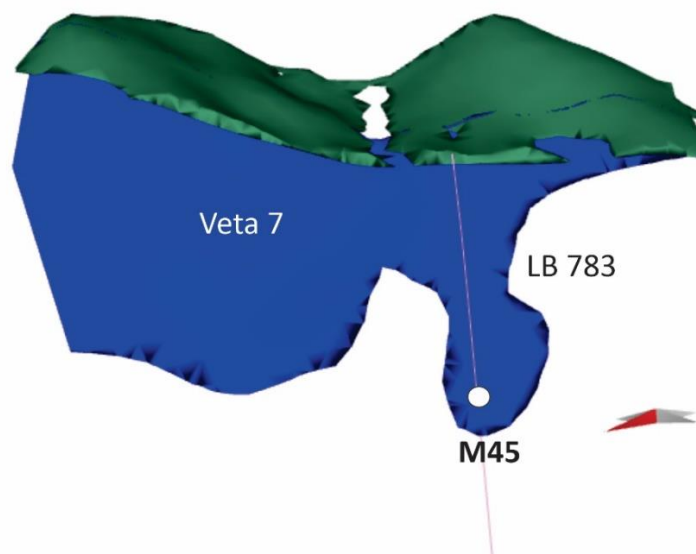


Figura 20. Imagen 3D de la veta 7, ubicación del sondeo y su correspondiente muestra (M45)

7.3.2 Composición mineralógica. La muestra 45, perteneciente a la veta 7, sondeo LB474 exhibe un alto grado de alteración hidrotermal, no se distinguen minerales ni el tipo de roca preexistente. Presenta un color grisáceo y está compuesta por una masa aparentemente silíceo junto a feldespatos

alterados a minerales arcillosos con presencia de vetillas de cuarzo. Con base en las características mineralógicas presentes se deduce una alteración de tipo argílica o argílica avanzada.



Figura 21. Descripción macroscópica de la muestra 45 proveniente de la veta 7. (a) Veta hidrotermal compuesta por minerales arcillosos, cuarzo y algunos cristales de pirita diseminados, presenta una estructura masiva con formación de vetillas de cuarzo.

7.3.3 Análisis petrográfico .En la *figura 22* se observan tres puntos diferentes de la sección delgada con un patrón de mineralización que abarca toda la región, la muestra exhibe una matriz compuesta por fragmentos microcristalinos de cuarzo y posiblemente caolinita u otro mineral del grupo caolin como la dickita, resultado de una caolinitización de la sericita producto de alteración de feldespatos, se plantean tres pulsos hidrotermales sucesivos, en el primero se produce la alteración total de feldespatos a sericita, resultando en una matriz cuarzo-sericita, seguido a esto un segundo pulso donde la reacción fluido-roca lleva a la caolinitización de la sericita y la formación de pirita diseminada en la muestra, seguido a este se presenta un tercer pulso hidrotermal que da formación a las vetillas, dicho fluido hidrotermal contiene sulfatos y promueve la alunitización de la caolinita sugiriendo que este fluido presenta un pH ligeramente mayor a 2 .La

crystalización en estas vetillas se produce del núcleo hacia los bordes donde cristaliza el cuarzo de menor temperatura. Con base en estas características y en la asociación mineral Cuarzo-alunita-caolinita se infiere una alteración argílica avanzada caracterizada por la destrucción total de los feldespatos en condiciones de hidrólisis muy fuerte lo que conlleva a la formación de caolinita y alunita.

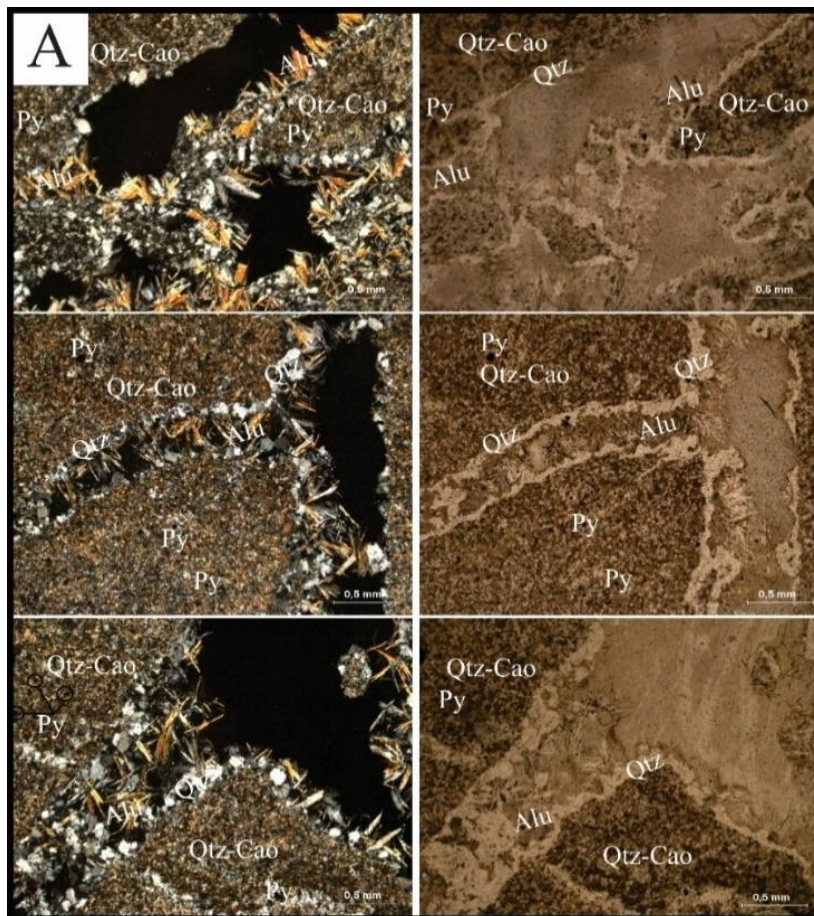


Figura 22. (a) Aspecto microscópico de la muestra 45 proveniente de la veta 7.

La alteración presente en esta muestra es de tipo argílica avanzada, como producto de una intensa lixiviación hidrolítica ácido debido al enfriamiento y oxidación de fluidos en ebullición

ricos en gases, los cuales se condensan junto con el vapor de agua en torno al nivel freático. La paragénesis mineral está compuesta por **Cuarzo ± Alunita**

7.4 Veta 14

7.4.1 Localización de la veta y ubicación de la muestra. La ubicación de la veta 14 está contenida entre los valores X, Y, Z dados a continuación

X: 1130553.0 m- 1129940.6 m

Y: 1307438.1 m- 1307384.8 m

Z: 3004.5 m- 2251.3 m

Esta veta se encuentra encajada en la unidad metamórfica del gneis de Bucaramanga, se cruza en algunas secciones con secuencias anfibolíticas y es cortada por el sondeo LB780. La extensión total en cada componente está dada por los siguientes datos: en la coordenada X representa 612.39, en Y 53.3 m y en Z 753.2 m.

La muestra seleccionada para esta veta (M18) se ubica en las coordenadas X: 1130435.7 m Y: 1307431.8 m Z: 2690 m. En la *figura 23* se observa la dimensión de la veta y la ubicación de la muestra.

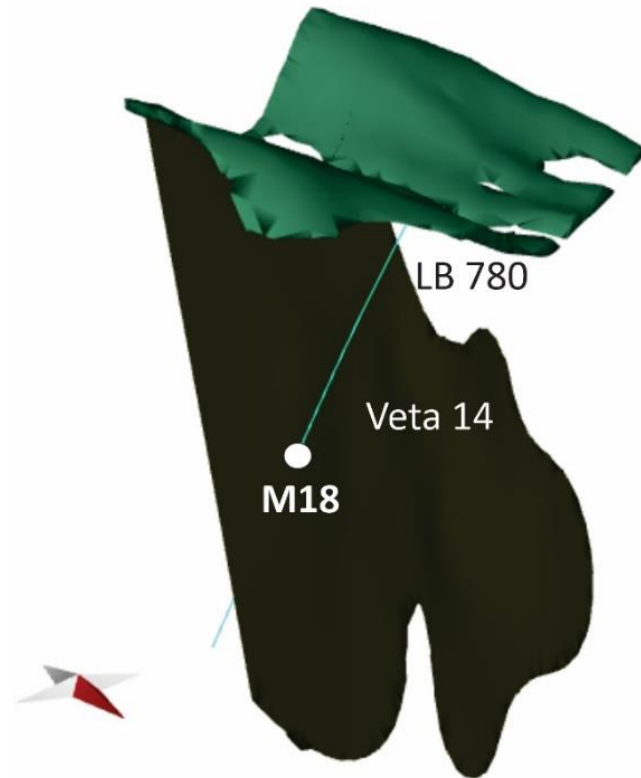


Figura 23. Imagen 3D de la veta 14, ubicación del sondeo LB780 y su correspondiente muestra (M18)

7.4.2 Composición mineralógica. La muestra 18 perteneciente a la veta 14, sondeo LB780 presenta una textura brechoide, matriz soportada silíceo, oligomictica con presencia de pirita en vetillas y diseminada. La roca tiene una composición homogénea como consecuencia de la alteración producto del fluido hidrotermal, como minerales de la mena se encuentra principalmente la pirita, calcantita y minerales ganga el cuarzo y feldespatos, conformando la matriz de la brecha.

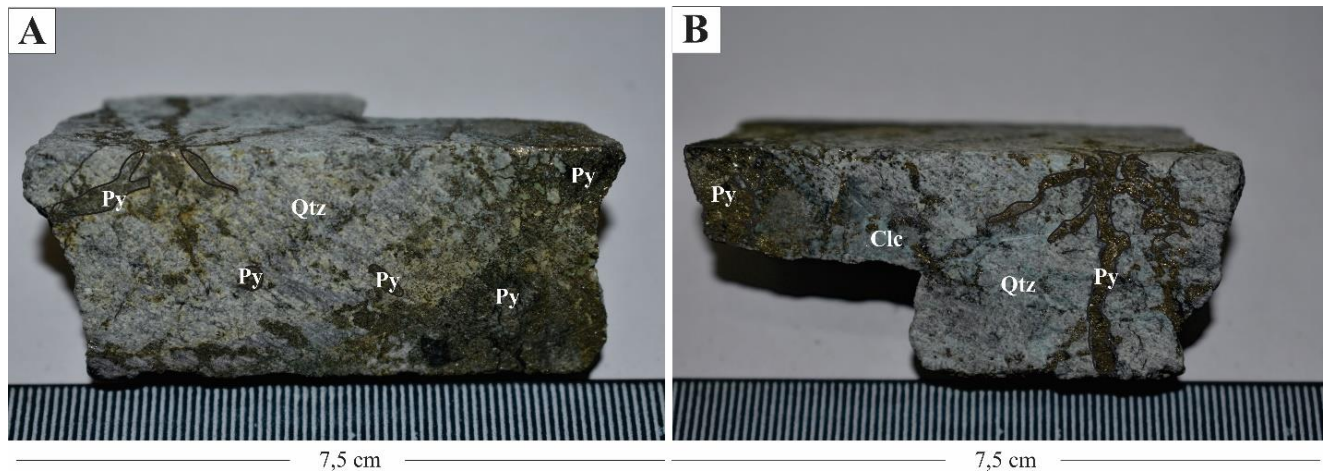


Figura 24. Descripción macroscópica de la muestra 18 proveniente de la veta 14.

7.4.3 Análisis petrográfico. Muestra 18 en NX, cristales euhedrales a subhedrales de pirita en una matriz de sericita, se observan microcristales de moscovita y minerales arcillosos que se presentan como manchas de color marron, también se encuentra en esta muestra algunos cristales de calcopirita. B. Muestra 18 en NII, se observan los minerales opacos y la matriz compuesta por sericita y microcristales de moscovita, se puede observar igualmente la mancha marron característica de los minerales arcillosos. C. Cristal aparentemente anhedral de pirita con cristales de feldespatos a su alrededor y presencia de pequeños minerales opacos que luego de ser analizados con microscopía electrónica de barrido se clasificaron como óxidos de titanio. D. En NII este punto muestra la forma real del cristal de pirita, siendo más euhedral a subhedral y se observan claramente los pequeños fragmentos definidos como óxidos de titanio.

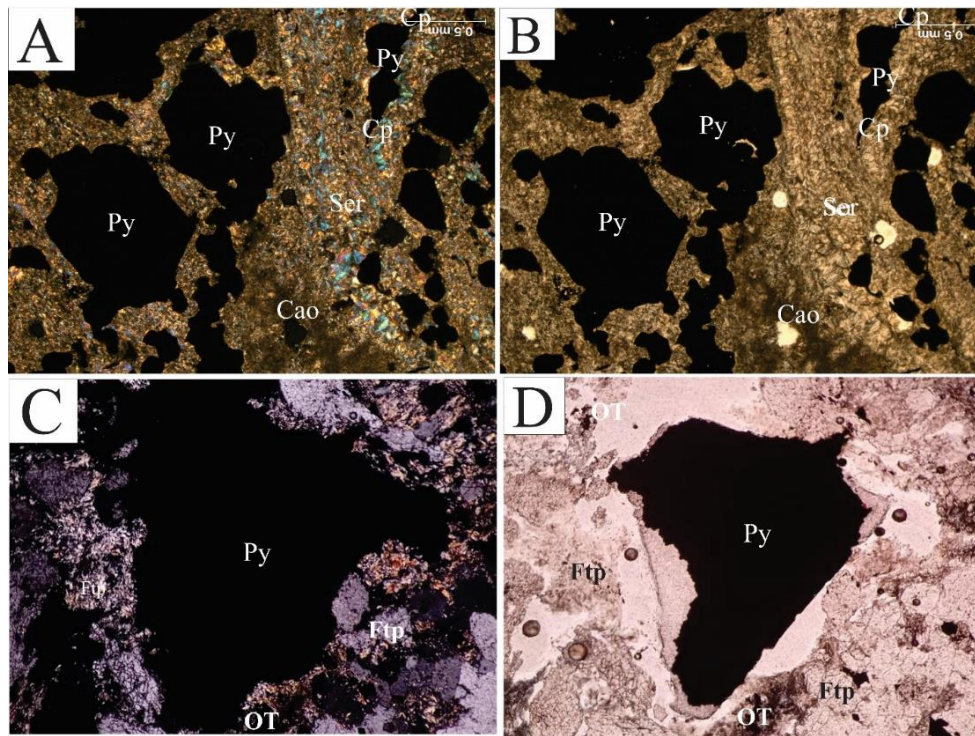


Figura 25. Aspecto microscópico de la muestra 18 proveniente de la veta 14.

La alteración presente en esta muestra es de tipo filica o cuarzo-sericita, formada por cuarzo, arcillas del tipo sericita-illita y del grupo caolín, moscovita, pirita y otros minerales opacos como la magnetita y algunos óxidos de titanio, esta alteración es resultado de una hidrólisis moderada a fuerte de los feldespatos, generalmente presente en un rango de temperatura de 300-400 °C. La matriz está compuesta por sericita y arcillas de tipo illita. La paragénesis mineral está compuesta por **pirita ± calcopirita ± oro**

7.5 Veta 17

7.5.1 Localización de la veta y ubicación de la muestra. La ubicación de la veta 17 está contenida entre los valores X, Y, Z dados a continuación

X: 1130554.9 m - 1129945.3 m

Y: 1307643.1 m - 1307320.2 m

Z: 2961.2 m - 2207.9 m

Esta veta se encuentra encajada en la unidad metamórfica del gneis de Bucaramanga, se cruza en algunas secciones con secciones anfibolíticas y es cortada por el sondeo LB764. La extensión total en cada componente está dada por los siguientes datos: en la coordenada X representa 609.59, en Y 322.9 m y en Z 753.3 m.

La muestra seleccionada para esta veta (M24) se ubica en las coordenadas X: 1130319.3 m Y: 1307253.6 m Z: 2644.3 m. En la *figura 26* se observa la dimensión de la veta y la ubicación de la muestra.

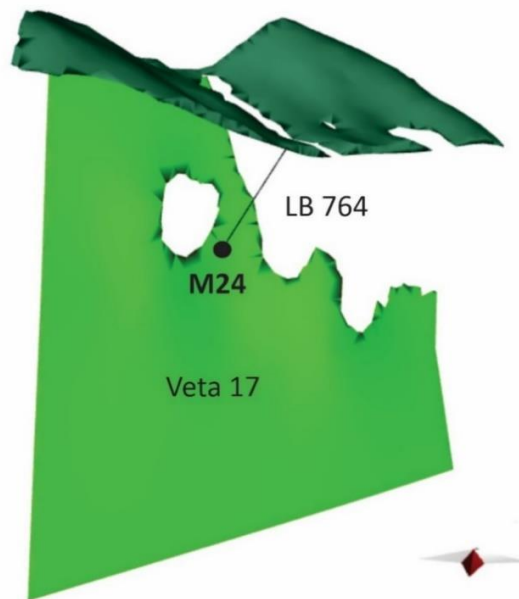


Figura 26. Imagen 3D de la veta 17, ubicación del sondeo LB764 y su correspondiente muestra (M24)

7.5.2 Composición mineralógica. Fragmento de la muestra 24 perteneciente a la veta 17, sondeo LB764, se evidencia una textura brechoide con presencia de cristales de feldespato alcalino, cuarzo, pirita diseminada, magnetita y posiblemente algunos minerales arcillosos, se observa también un grado medio de oxidación y presencia de vetillas de magnetita.

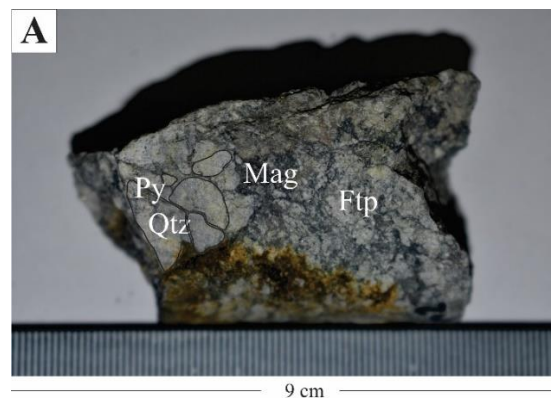


Figura 27. Características mineralógicas macroscópicas para la muestra 24

7.5.3 Análisis petrográfico. En la *Figura 28* (a) se observa una textura brechoide-cataclástica en NX con presencia de feldespato alcalino, cuarzo microcristalino, pirita, magnetita y minerales arcillosos, se puede evidenciar la fuerte alteración sobre los feldespatos. (b) Textura brechoide-cataclástica en NII se puede observar claramente la fuerte alteración de los feldespatos y la presencia de minerales opacos. (c) Cristal de pirita en nicoles cruzados (NX) con fracturas presentando rellenos de Cl, Pb y óxidos. (d) Cristal de pirita en nicoles paralelos (NII).

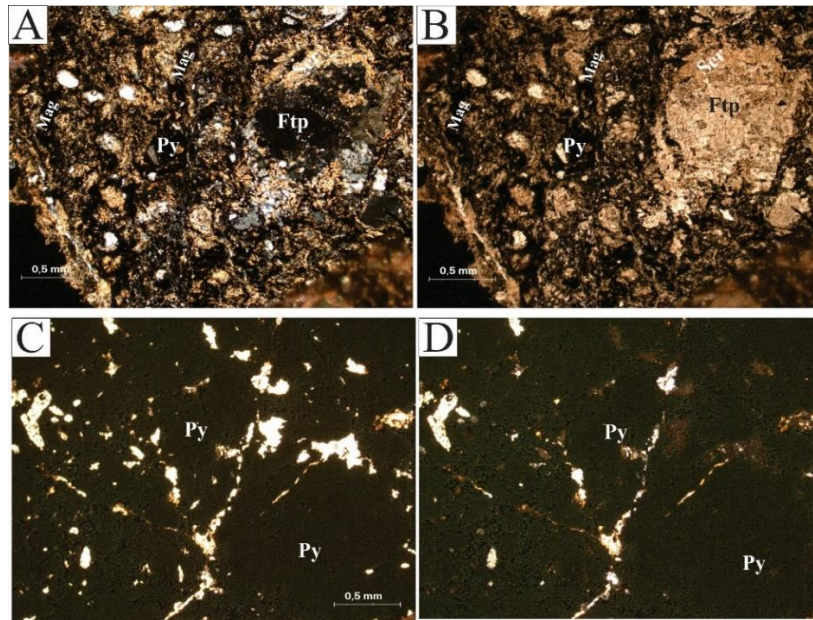


Figura 28. Aspecto microscópico de la muestra 24 proveniente de la veta 17.

La alteración presente en esta muestra es de tipo argílica intermedia, formada por arcillas del tipo dickita, illita, moscovita que ocurren como agregados de manchas moteadas de un color marrón sucio, junto a la pirita y los minerales opacos (pirita, magnetita) forman la matriz de esta sección. La paragénesis mineral está compuesta por **pirita ± oro**.

7.6 Veta 17

7.6.1 Localización de la veta y ubicación de la muestra. La ubicación de la veta 17 está contenida entre los valores X, Y, Z dados a continuación

X: 1130550.1 m - 1129984.3 m

Y: 1307643.1 m - 1307320.2 m

Z: 2960 m - 2213 m

Esta veta se encuentra encajada en la unidad metamórfica del gneis de Bucaramanga, se cruza en algunas secciones con secuencias anfibolíticas y es cortada por el sondeo LB764. La extensión total en cada componente está dada por los siguientes datos: en la coordenada X representa 609.59, en Y 322.9 m y en Z 753.3 m.

La muestra seleccionada para esta veta (M24) se ubica en las coordenadas X: 1130174.8 m Y: 1307167.5 m Z: 2603.6 m. En la *figura 29* se observa la dimensión de la veta y la ubicación de la muestra.

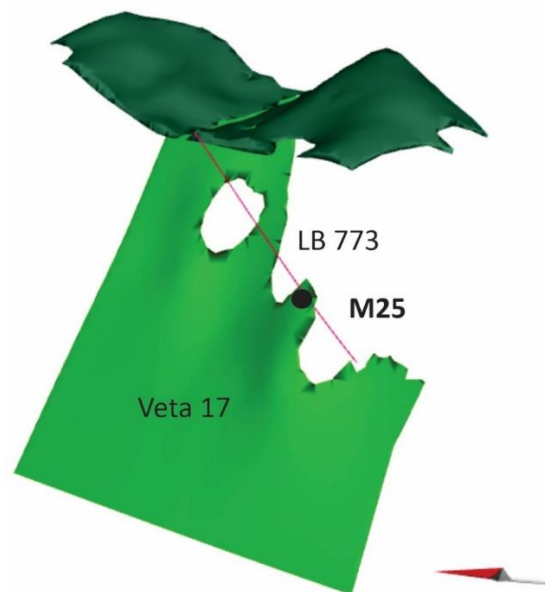


Figura 29. Imagen 3D de la veta 17, ubicación del sondeo LB773 y su correspondiente muestra (M25)

7.6.2 Composición mineralógica. Fragmento de la muestra 25 perteneciente a la veta 17, sondeo LB773 con textura brechoide, compuesta principalmente por cuarzo, un alto contenido de pirita y posiblemente minerales arcillosos. La pirita se presenta en forma masiva distribuida en una matriz silíceo.

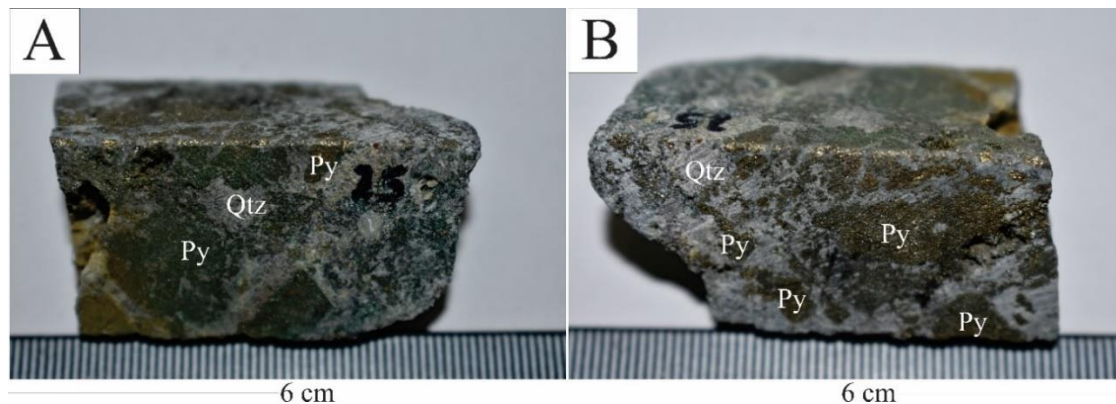


Figura 30. Características mineralógicas macroscópicas para la muestra 25

7.6.3 Análisis petrográfico. En la *Figura 31 (a)* se observa en NX una textura brechoide con grandes cristales subhedrales de pirita, presentando fracturas y oquedades. (b) En NII los cristales subhedrales de pirita evidenciando claramente las oquedades y espacios vacíos de la sección. (c) En esta región se identifica la paragénesis mineral de la sección observándose cristales euhedrales-subhedrales de pirita, cuarzo y una matriz arcillosa con presencia de óxidos de hierro y pirita diseminada. Cuarzo, pirita y sericita conforman la matriz de la sección.

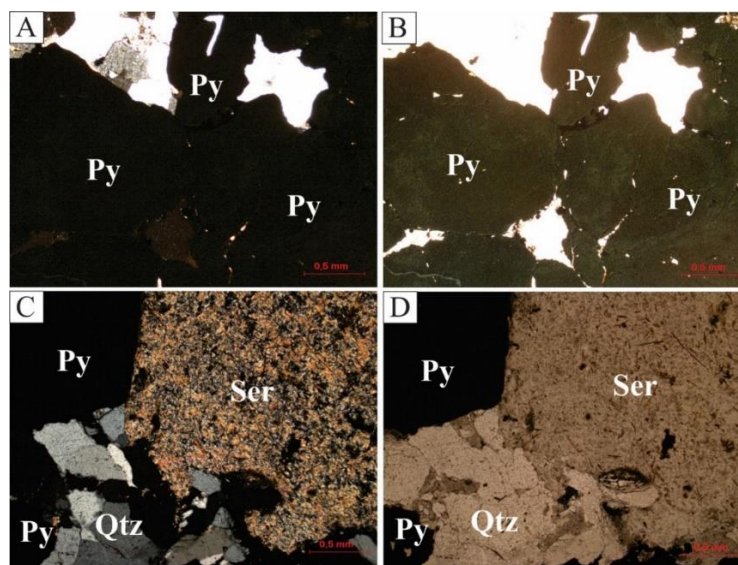


Figura 31. Aspecto microscópico de la muestra 25 proveniente de la veta 17.

La alteración presente en esta muestra es de tipo filica o cuarzo-sericita, formada por cuarzo, pirita y arcillas del tipo illita y dickita. La paragénesis mineral está compuesta por cuarzo \pm pirita.

8. Geoquímica Del Oro

8.1 Ensayo al fuego

El ensayo al fuego es un método que permite valorar el contenido en oro de menas, rocas, minerales, aleaciones y otros componentes. Para determinar el contenido económicamente interesante del depósito, se realizaron pruebas de ensayo al fuego al mineral, este método se basa en la pulverización de la muestra para posteriormente fundirla y producir una fusión de la muestra usando reactivos y fundentes adecuados para obtener dos fases líquidas: una escoria constituida principalmente por silicatos complejos y una fase metálica constituida por plomo, el cual colecta los metales de interés (Au y Ag) de la muestra. El objetivo es recoger el oro metálico presente en el mineral, o en la roca que se pretenda analizar, junto con plomo en estado líquido a unas temperaturas que oscilan entre 900 y 1000 °C. Así, el oro es captado por el plomo fundido, mientras que los no metales presentes en la muestra se reúnen en una escoria formada por el litargirio y otros fundentes (carbonato de sodio, bórax, sílice). La oxidación expelle los metales básicos a la escoria como óxidos.

El procedimiento seguido para tal fin se especifica en la figura 32; este ensayo se ha realizado en el Laboratorio de Pirometalurgia UIS, donde se han obtenido leyes para el compósito de:

- 4,58 g/ton de Au
- 17.2 g/ton de Ag

1. Tostación:

Se somete 100g de mineral a una oxidación en una mufla a 600°C

2. Fusión - Copelación:

Se ubica sobre un crisol de fundición 80 g de carga fundente (61,3% PbO, 24,9% Co₃Na₂, 9,95% Na₂B₄O₇, 3,85% SiO₂) 2,5g de agente reductor (Nitrato de sodio), 20 g de muestra, y una capa de borax. Se coloca el crisol sobre una mufla a 1000°C durante 80 minutos.

3. Régulo:

El mineral fundido, se dispone sobre lingoteras de acero de modo que se forma un régulo de plomo en la parte inferior, y será separado de la escoria con un martillo y luego se ingresa a otra mufla a 900°C durante 2 horas

4. Doré:

Al final, se obtiene el Doré (Au + Ag) como producto el cual debe ser laminado y pesado.

5. Digestión

Para conocer el % de oro, se utilizan planchas calentadoras, sobre las que se ubica el doré en un crisol de porcelana, en ella actúa HNO₃ hasta alcanzar la temperatura de fusión de la Plata y de ese modo el peso final corresponde a la ley de oro y la resta corresponde al peso de la plata.

Figura 32. Procedimiento para llevar a cabo el ensayo al fuego

8.2 Caracterización geoquímica del oro mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (SEM).

8.2.1 Resultados de MEB para la Veta 1- muestra 4. *Figura 33* (a) Demarcación de la región seleccionada en la cual se observan diminutas partículas contrastantes con el color de la pirita (Py) las cuales pueden estar asociadas con diferentes formas de ocurrencias del oro. B. Acercamiento a la región seleccionada donde se observan dos partículas de oro, una de ellas asociada a Teluro y otra de oro nativo, presentan tamaños de 6.516 μm y 14.76 μm respectivamente, muestra formas esféricas con bordes irregulares y una asociación mineralógica compuesta por Qtz-Py-Au. C. Porcentaje elemental para la partícula (1) en donde el contenido de Au corresponde al 82.5 % y un 4% de Ag, el C es resultante del recubrimiento de Carbono aplicado a la muestra para hacerla conductora y ser observada mediante SEM. D. Porcentaje elemental para la partícula (2) en donde el contenido de Au corresponde al 9.47%, 22.24% de Ag y 13% de Te de Te, de acuerdo con esta composición el oro en esta partícula está asociada a teluros, específicamente Petzita, el contenido en Carbono es resultante del recubrimiento utilizado sobre las muestras.

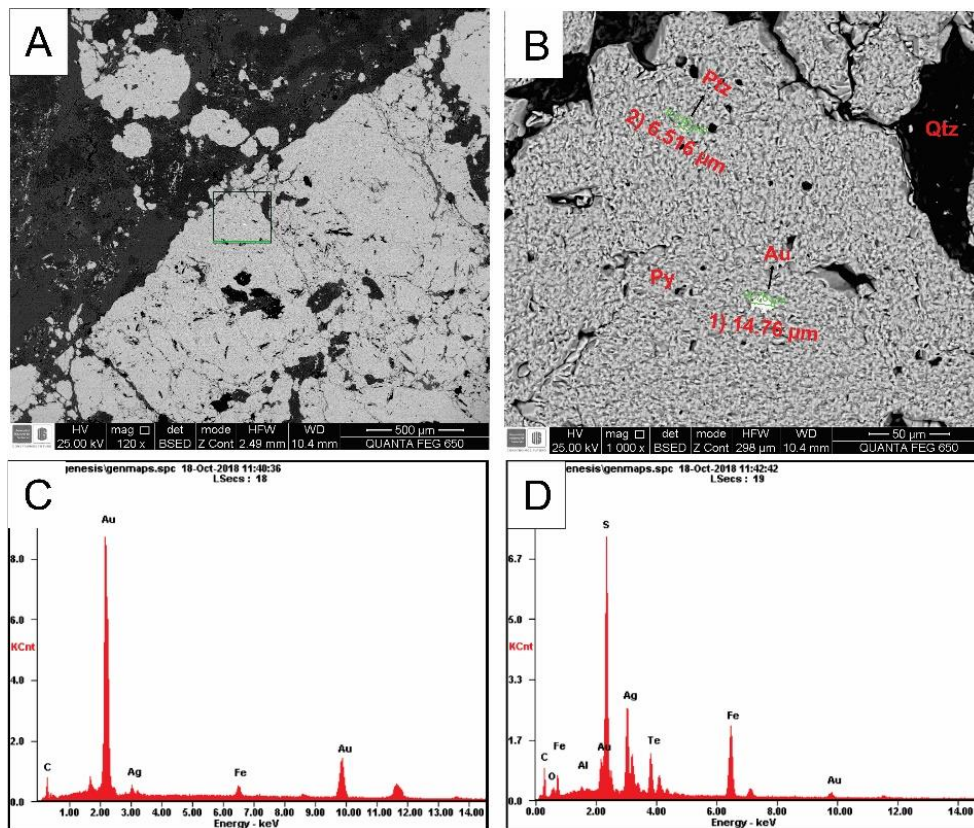


Figura 33. Geoquímica del oro en la primera región de la muestra 4.

En la figura 34 se observan los resultados de microscopía electrónica para una región más analizada de la muestra 4. (a) Demarcación de la región seleccionada en la cual se observa claramente una partícula con un brillo característico del oro observado mediante el uso de SEM, presentando un fuerte contraste con el color del agregado granular de pirita (Py). (b) Acercamiento a la región seleccionada donde se observa una partícula de oro incluida en el cristal de pirita (Py) con un tamaño de 22.01 μm . (c) Espectro de dispersión de energía para la partícula encontrada donde se confirma la presencia de oro. (d) Porcentaje elemental para la partícula localizada con un contenido de oro del 78.99% indicando oro nativo.

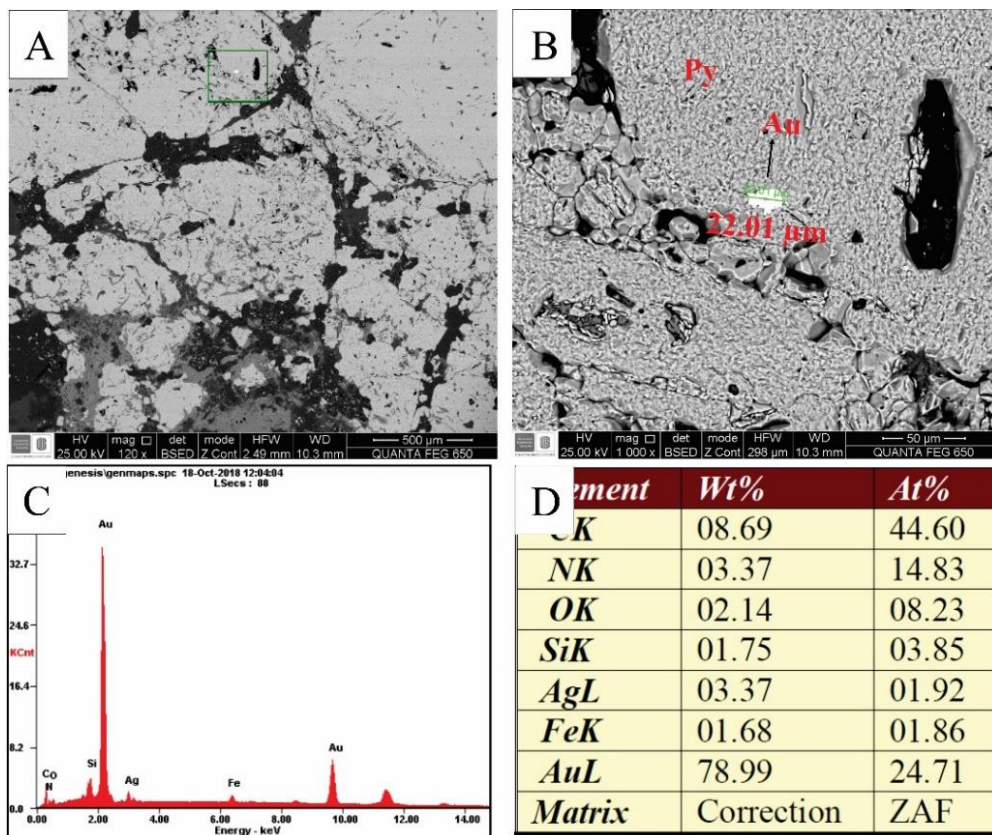


Figura 34. Geoquímica del oro en la segunda región de la muestra 4.

8.2.2 Resultados de MEB para la veta 17-Muestra 24. En la figura 35 a se muestra la delimitación del área en la cual se observa claramente una partícula con un brillo característico del oro observado mediante el uso de SEM, presentando un fuerte contraste con el color del agregado granular de pirita (Py). B. Acercamiento a la región seleccionada donde se observa una partícula de oro incluida en el cristal de pirita (Py) con oquedades. Partícula de oro anhedral incluida en cristal de pirita, presenta un tamaño de 21.90 μm. D. Espectro de dispersión de energía y tabla de porcentaje elemental para la partícula de oro encontrada donde se confirma la presencia de oro nativo de acuerdo con el porcentaje de oro presente (75.36%), el contenido de Carbono (C) corresponde probablemente al recubrimiento utilizado para hacer la muestra conductora.

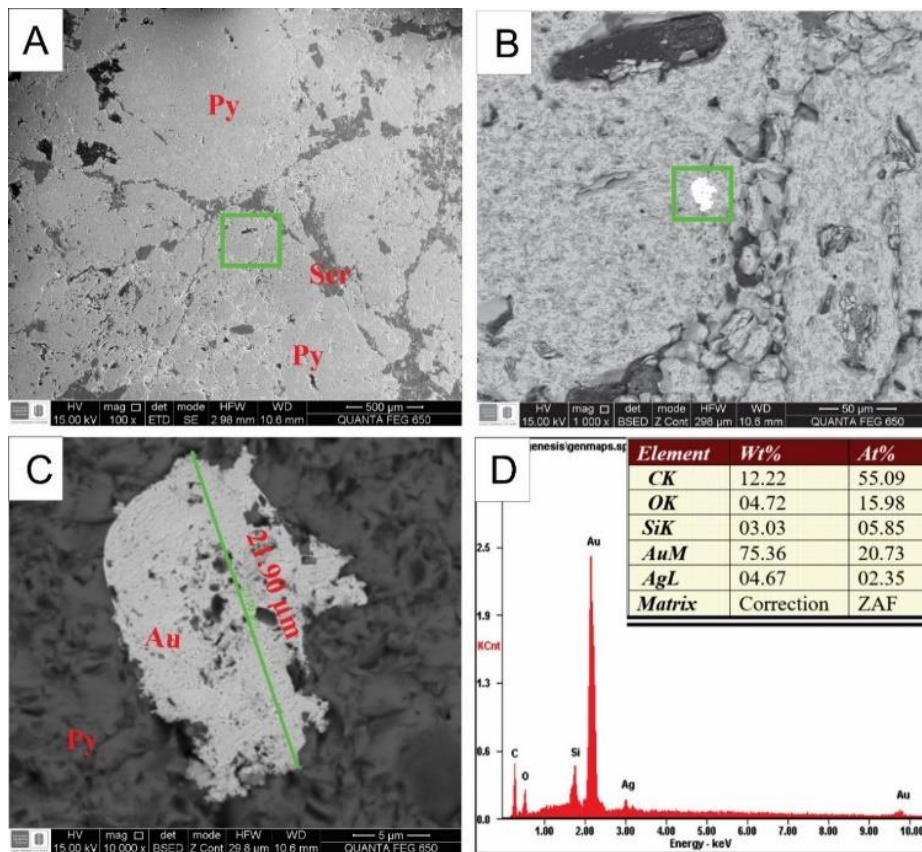


Figura 35. Geoquímica del oro para la muestra 24

8.2.4 Resultados de MEB para la veta 14- muestra 18. En la figura 36 (a) se delimita la ubicación del área en la cual se observan algunas partículas con brillo característico del oro observado mediante el uso de SEM en muestras anteriores, presentando un fuerte contraste con el color del agregado granular de pirita (Py). (b) Acercamiento a la región seleccionada donde se observan partículas de oro y calcopirita incluidas en el cristal de pirita (Py) fracturado y con oquedades, el oro en esta región presenta tamaños de 7.627 μm. Partícula de oro anhedral incluida en cristal de pirita, presenta un tamaño de 21.90 μm. (c) Espectro de dispersión de energía para la partícula de oro encontrada en la cual se confirma la presencia de Au y Ag.

(d) Tabla de porcentaje elemental para la partícula de oro encontrada donde se confirma la presencia de oro nativo de acuerdo con el porcentaje de oro presente (75.36%), el contenido de Carbono corresponde probablemente al recubrimiento utilizado para hacer la muestra conductora.

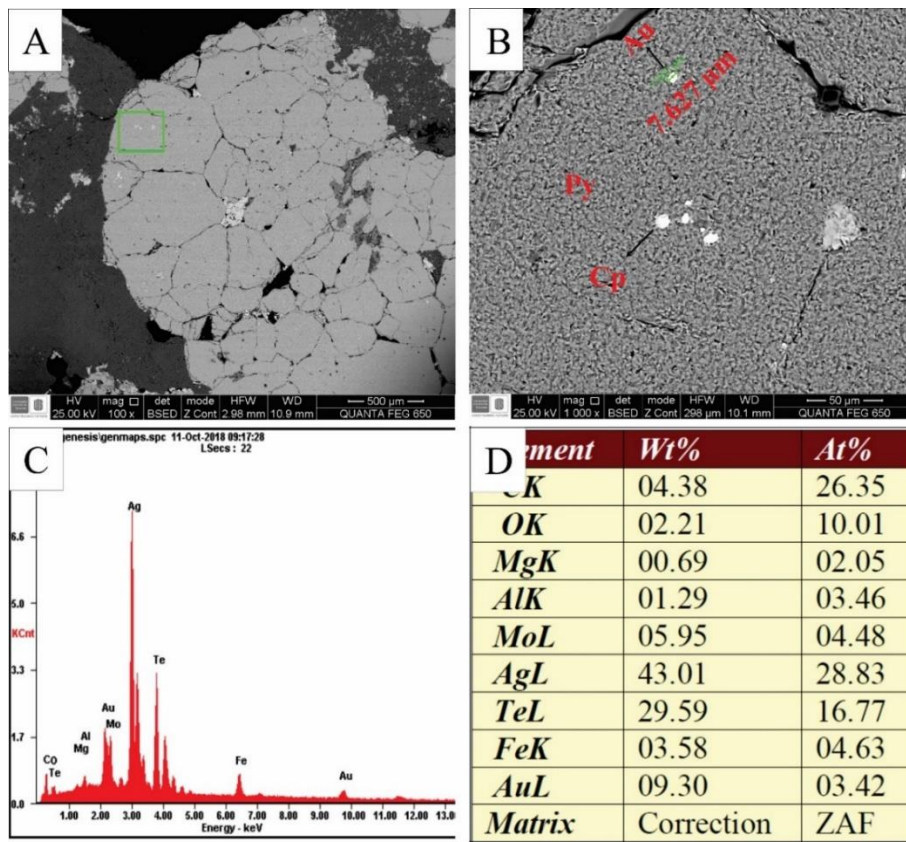


Figura 36. Geoquímica del oro para la muestra 18

En la figura 37 (a) se delimita la ubicación del área en la cual se observan algunas partículas con brillo característico del oro observado mediante el uso de SEM en muestras anteriores, presentando un fuerte contraste con el color del agregado granular de pirita (Py). (b) Acercamiento a la región seleccionada donde se observan algunas partículas de telurio nativo y oro asociado a telurios de variedad silvanita incluidas en el cristal de pirita (Py) fracturado y con oquedades, el oro en esta región presenta tamaños de 8-9 μm . (c) Espectro de dispersión de energía para la

partícula 1 correspondiente a telurio nativo. (d) Espectro de dispersión de energía para la partícula 2 correspondiente a petzita, el contenido de Carbono (C) corresponde probablemente al recubrimiento utilizado para hacer la muestra conductora.

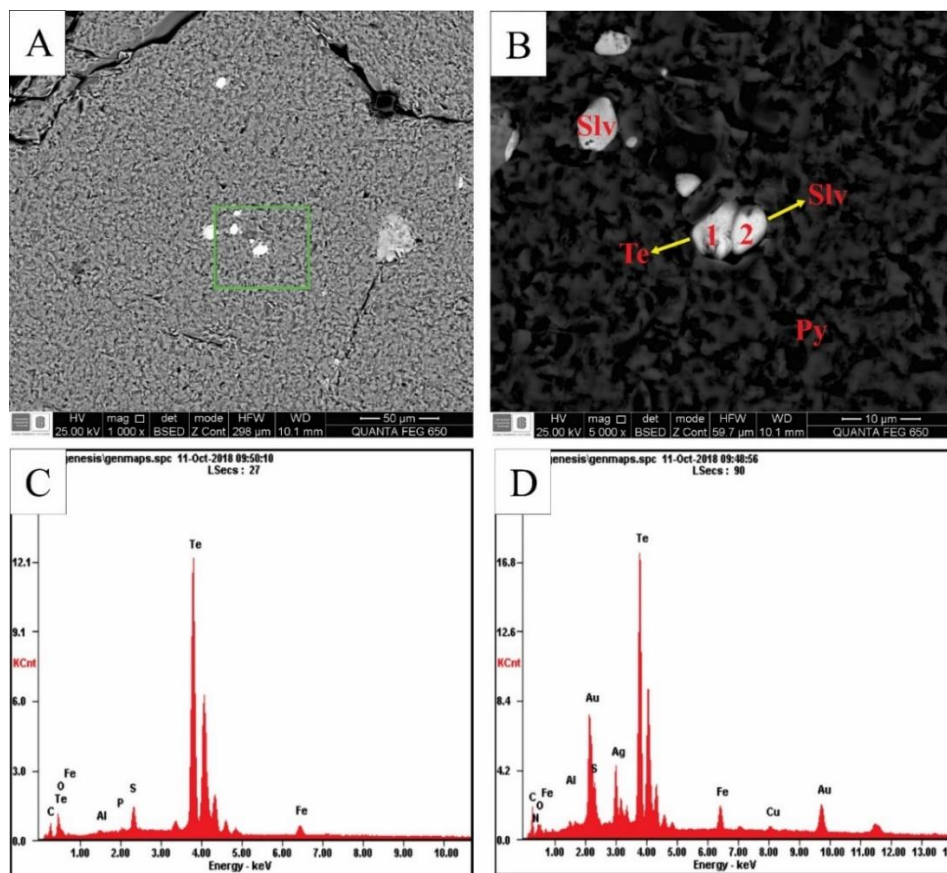


Figura 37. Geoquímica del oro para la muestra 18.

En la figura 38 (a) se observa un cristal de pirita en el cual se evidencian algunas partículas con brillo característico del oro observado mediante el uso de SEM en muestras anteriores, presentando un fuerte contraste con el color del agregado granular de pirita (Py). (b) Acercamiento a la región seleccionada donde se observan algunas partículas de telurio nativo y oro asociado a teluros de variedad petzita incluidas en el cristal de pirita (Py). (c) Tamaños correspondientes a tres de las

partículas de petzita identificadas con microcopia electrónica de barrido; 4.039 μm , 2.475 μm , 3.482 μm para las partículas 1,2 y 3 respectivamente. (d) Espectro de dispersión de energía para la partícula 1 de petzita. E. Espectro de dispersión de energía para la partícula 2 de petzita. F. Espectro de dispersión de energía para la partícula 3 de petzita.

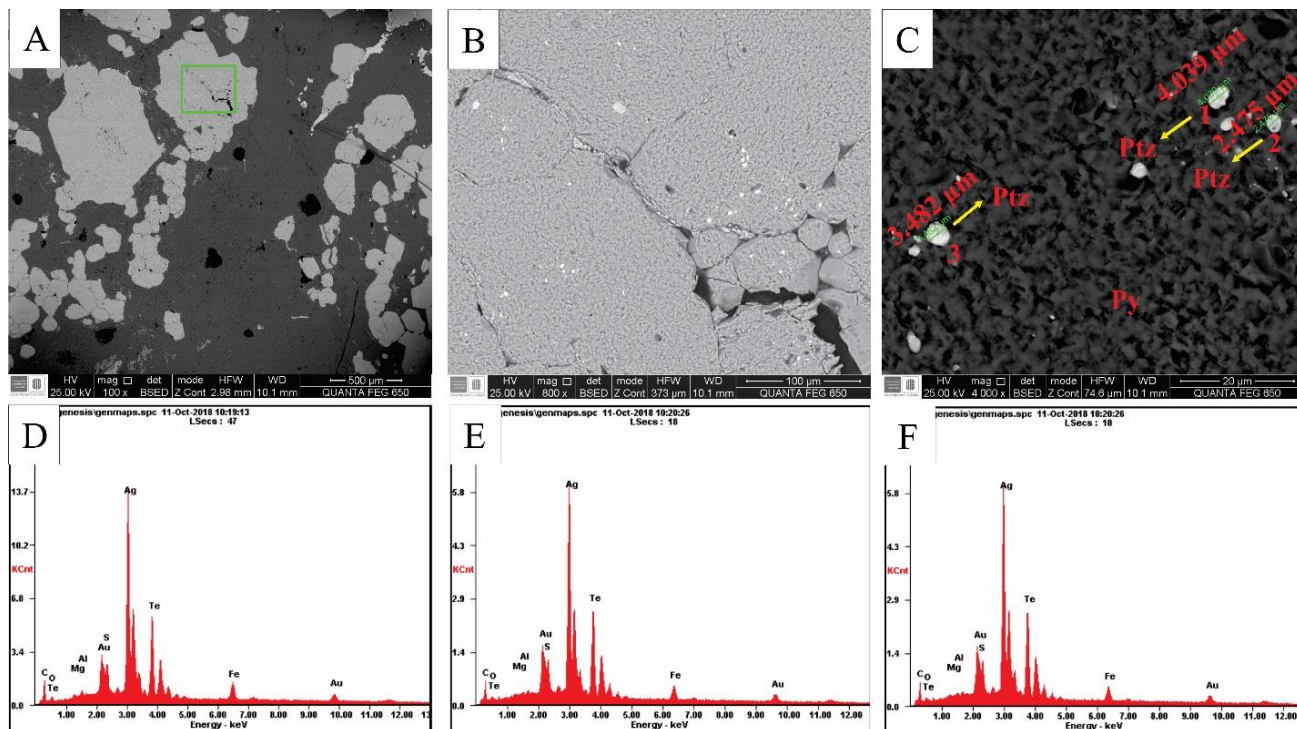


Figura 38. Geoquímica del oro para la muestra 18

8.3 Resultados de difracción convencional de Rayos-X (DRX)

Con el fin de identificar las fases minerales presentes de manera más detallada se seleccionaron 8 muestras para realizar análisis de difracción de Rayos-X (DRX) para análisis bulk y análisis de arcillas obteniéndose dieciséis (16) registros en total de difracción de rayos X. En las cuales su montaje fue el siguiente: Las muestras fueron pulverizadas y analizadas en el laboratorio de rayos

X del Parque Tecnológico Guatiguara de la Universidad Industrial de Santander, en donde las muestras fueron montadas en un porta muestras de polimetilmetacrilato (PMMA) con centro de silicio “Low Background” y 0.5 mm de cavidad, el cual se ajustó en la plataforma de la cuna Euleriana del equipo D8 DISCOVER para su posterior registro de datos por micro difracción de rayos-X. En la figura 39 se muestran las vetas de las que se tomaron las muestras para tomar estos registros.

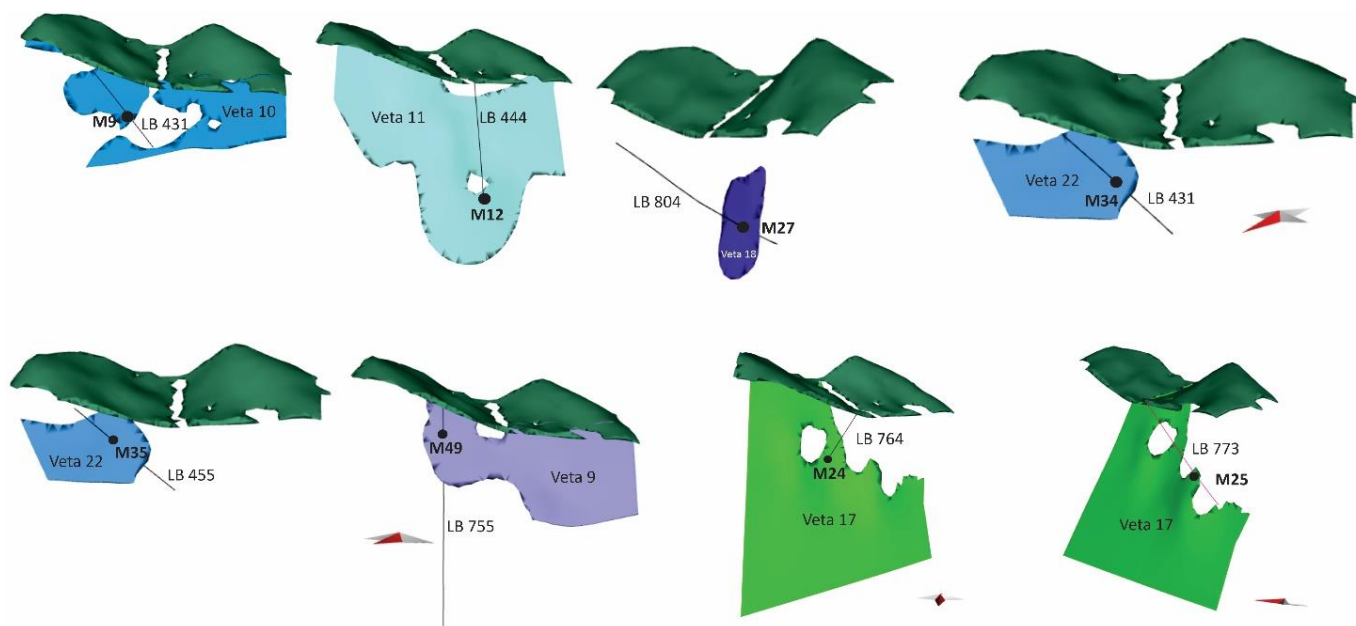


Figura 39. Vetos con su correspondiente muestra para análisis DRX

8.3.1 Análisis bulk. El análisis bulk o roca total permite obtener información detallada acerca de la estructura cristalográfica y mineralógica de minerales generales como de minerales arcillosos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante DRX para las 8 muestras seleccionadas.

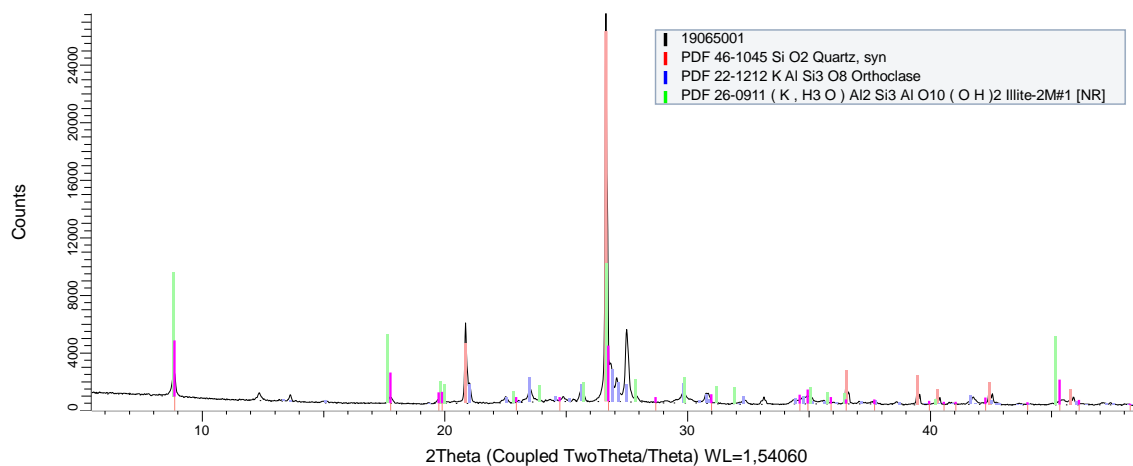
Difracción convencional de rayos X: Muestra 19065001 (M9)

Figura 40. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065001.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a cuarzo, ortoclasa e illita.

De acuerdo con esta información obtenida a partir de difractograma las fases cristalinas presentes evidencian una alteración de tipo filica con la paragénesis Cuarzo-Illita-Ortoclasa.

Difracción convencional de rayos X: Muestra 19065002 (M12)

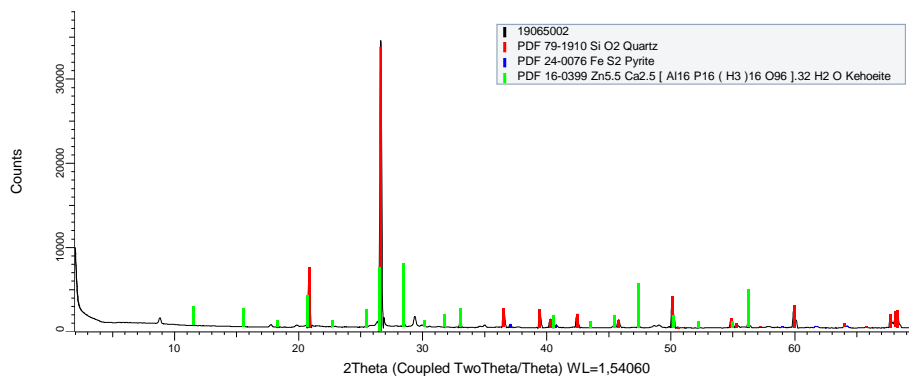


Figura 41. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065002.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a cuarzo, piritita y Kehoeite. De acuerdo con la información presentada en la tabla 3 las fases cristalinas presentes evidencian una alteración de tipo filica con la paragénesis Cuarzo-Piritita.

Difracción convencional de rayos X: Muestra 19065003 (M24)

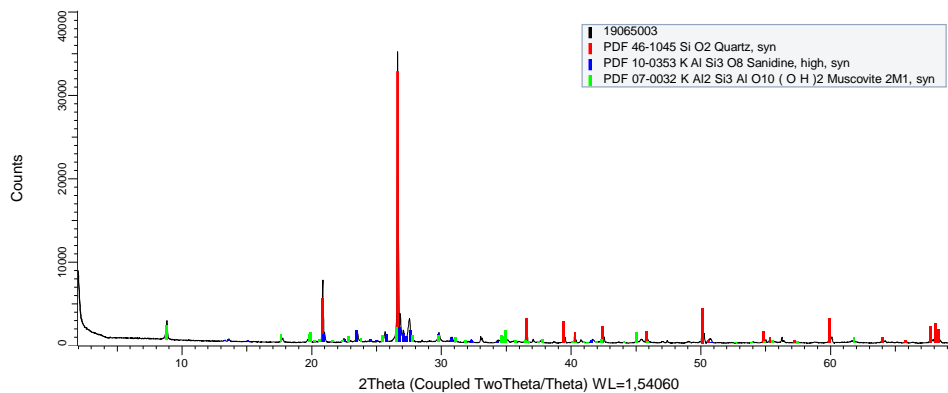


Figura 42. Figura. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065003.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a cuarzo, sanidina y moscovita.

De acuerdo con la información obtenida a partir del difractograma, las fases cristalinas demuestran una alteración argílica con gran cantidad de material arcilloso.

Difracción convencional de rayos X: Muestra 19065004 (M25)

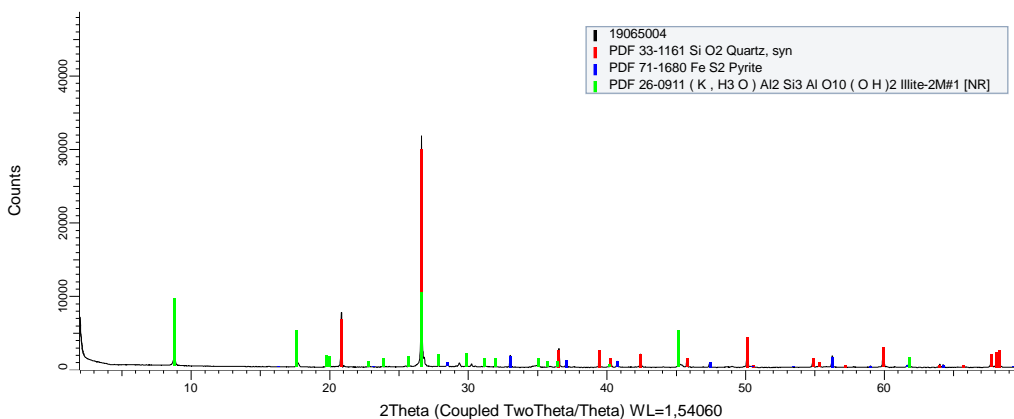


Figura 43. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065004.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a cuarzo, pirita e illita.

La identificación de fases cristalinas de la muestra 25 nos confirma una vez más el tipo de alteración presente (filica) y su paragénesis Cuarzo \pm Pirita \pm Illita. Generalmente es el resultado de una hidrólisis moderada a fuerte de los feldspatos, en un rango de temperatura de 300°-400°C y en un rango de pH 5 a 6. Sin embargo, debido a la presencia de Illita nos indica una temperatura de formación entre (200°-250°C).

Difracción convencional de rayos X: Muestra 19065005 (M27)

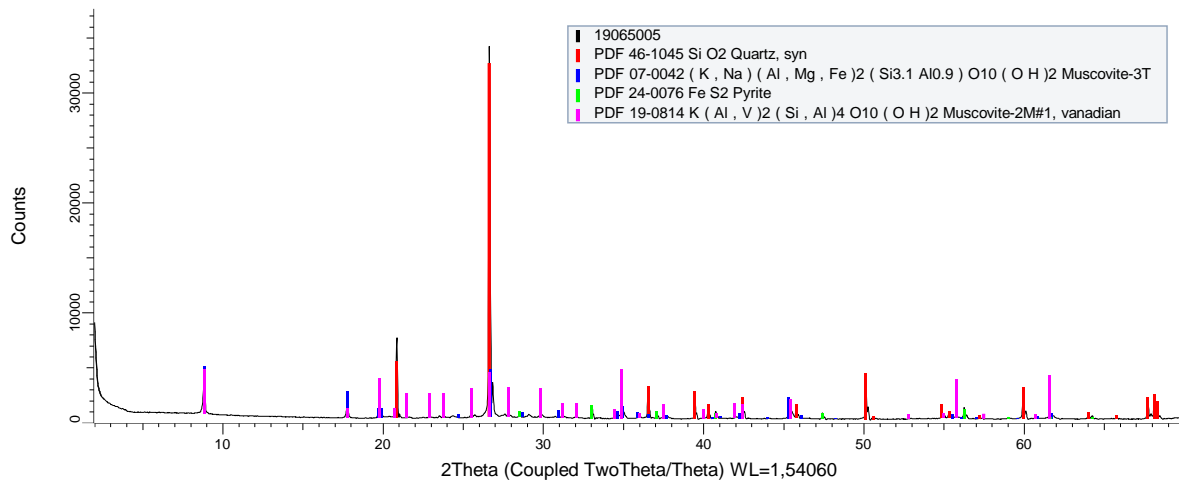


Figura 44. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065005.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a cuarzo, moscovita y piritita.

De acuerdo con la información obtenida en el difractograma, las fases cristalinas presentes para la muestra 27 evidencian una alteración de tipo filica, siendo esta la que se encuentra presente en gran parte del depósito mineral.

Difracción convencional de rayos X: Muestra 19065006 (M34)

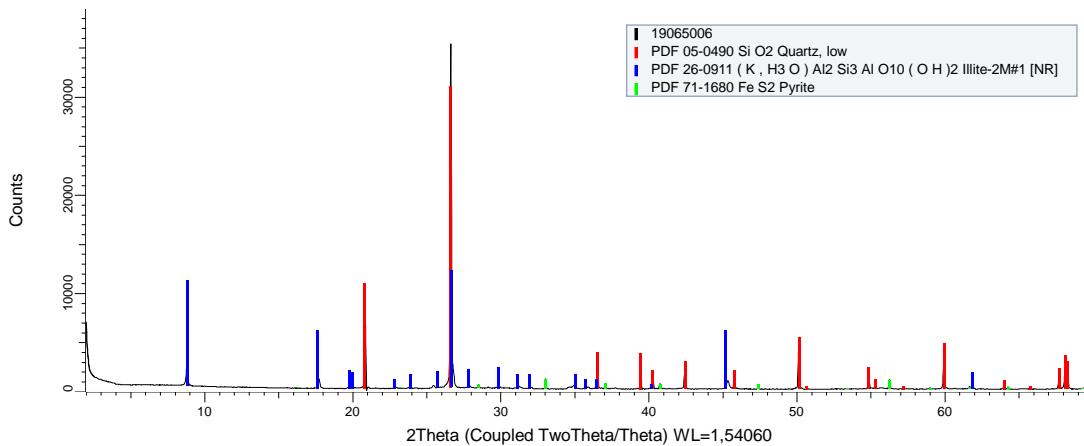


Figura 45. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065006.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a cuarzo, pirita e illita. La identificación de las fases cristalinas para la muestra M34 evidencia una alteración de tipo filica caracterizada por la paragénesis Cuarzo ± Pirita ± Illita.

Difracción convencional de rayos X: Muestra 19065007 (M35)

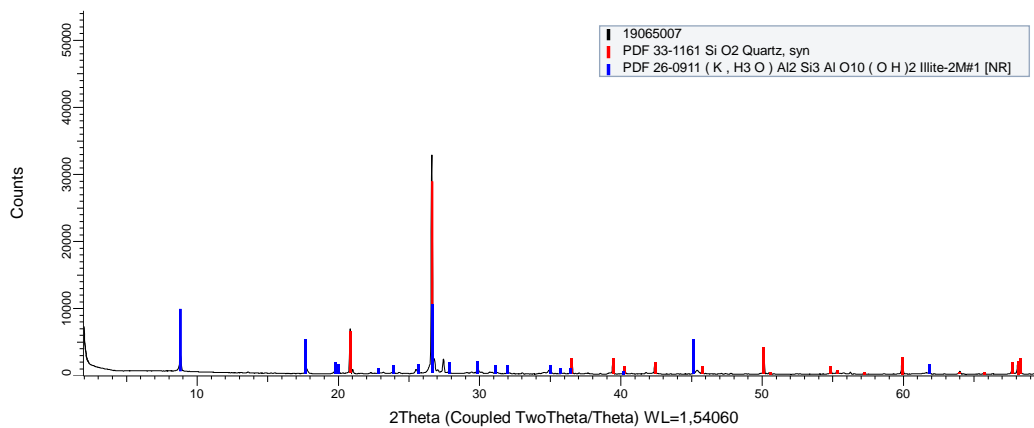


Figura 46. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065007.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a cuarzo e illita. La identificación de las fases cristalinas para la muestra M35 evidencia una alteración de tipo filica caracterizada por la paragénesis Cuarzo \pm Illita.

Difracción convencional de rayos X: Muestra 19065008 (M49)

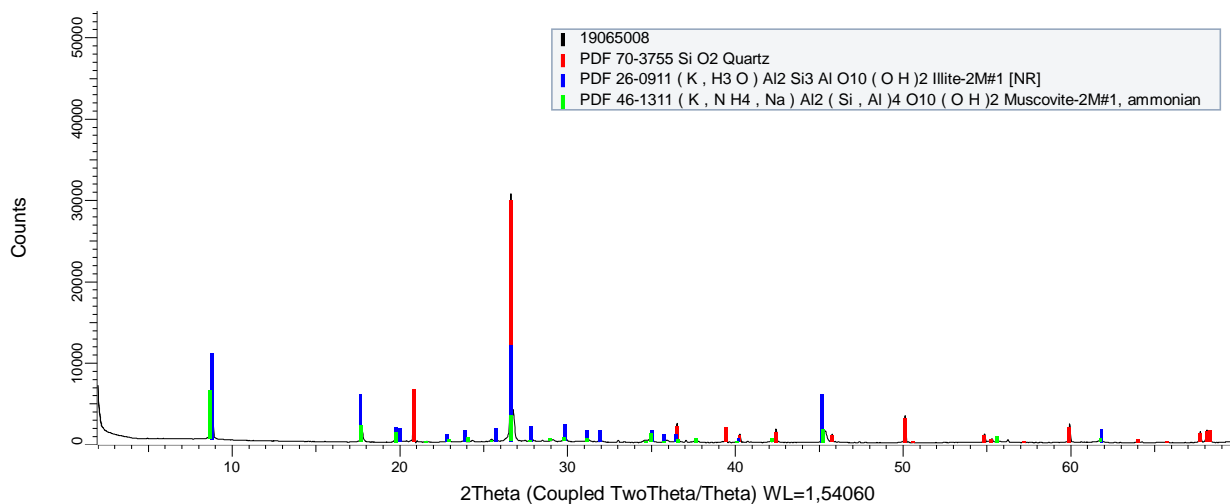


Figura 47. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra 19065008.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a cuarzo, illita y moscovita.

La identificación de las fases cristalinas para la muestra M49 evidencia una alteración de tipo filica caracterizada por la paragénesis Cuarzo \pm Illita \pm Moscovita.

8.3.2 Análisis DRX para arcillas. Los resultados obtenidos en esta sección señalan y confirman la presencia de diversos tipos de material arcilloso que pueden interferir durante el proceso de beneficio mineral.

Las arcillas encontradas son principalmente dickita e illita, estando presentes en todas las muestras analizadas, además se encuentran montmorillonita(M49), talco (M35) y halloisita (M12). Estos minerales arcillosos pueden intervenir durante el proceso de cianuración causando sobre costos o un bajo porcentaje de recuperación del oro ya que pueden generar películas que se adsorben sobre los granos de oro durante el proceso de cianuración, generando un fenómeno de preg-robbing, impidiendo óptimas recuperaciones (Gasparrini 1993, Yannopoulus 1991 y Marsden & House 1992), por tal motivo es necesario durante los procesos anteriores a la cianuración, como son: conminucion, concentración y secado, realizar su eliminación por medio de un proceso de flotación, teniendo en cuenta que los minerales auríferos de carácter refractario requieren de un pre tratamiento para poder ser sometidos a pruebas de cianuración convencionales y así obtener resultados óptimos. Se observan 3 registros para cada muestra, pertenecientes a la muestra normal(negro), glucolada(roja) y calcinada(azul).

Muestra 1-9-17 (N-G-C) (M9)

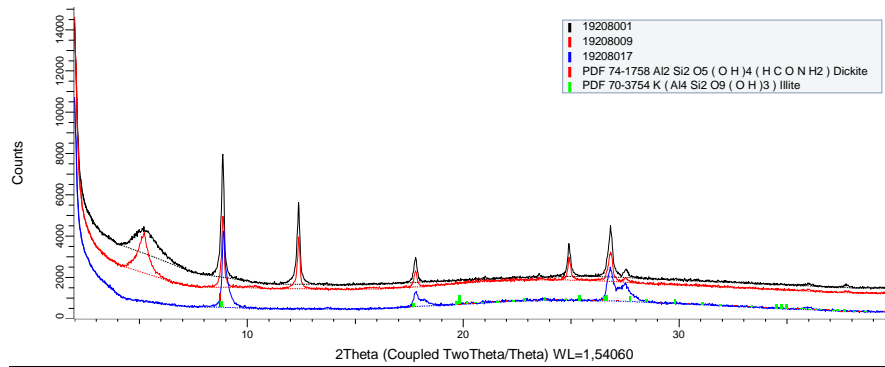


Figura 48. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.

Tabla 3.

Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra M9.

	FASE	PDF No.	NOMBRE
Cristalino	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ (H C O N H ₂)	74-1758	Dickite
	K (Al ₄ Si ₂ O ₉ (OH) ₃)	70-3754	Illite

Muestra 2-10-18 (N-G-C) (M12)

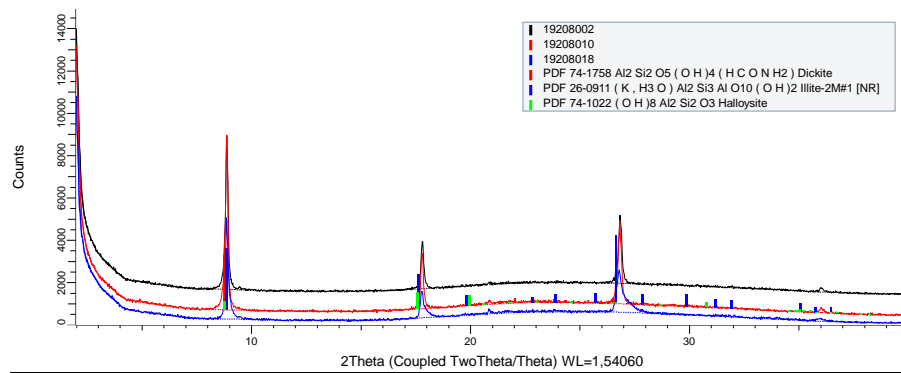


Figura 49. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a dickita, illita y halloisita.

Muestra 3-11-19 (N-G-C) (M24)

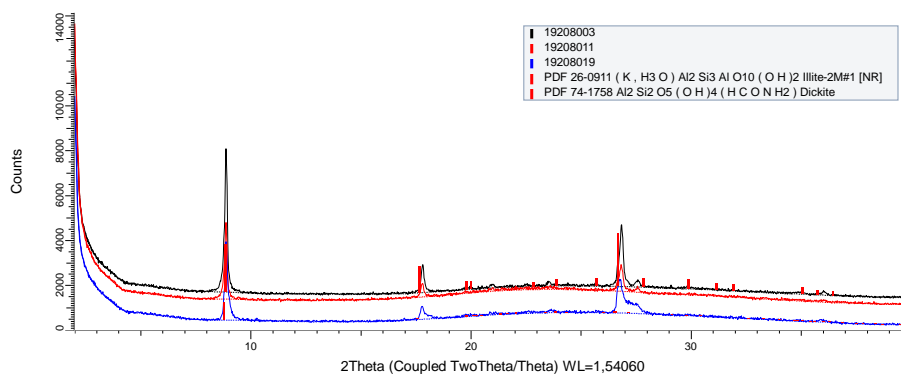


Figura 50. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a dickita e illita.

Muestra 4-12-20 (N-G-C) (M25)

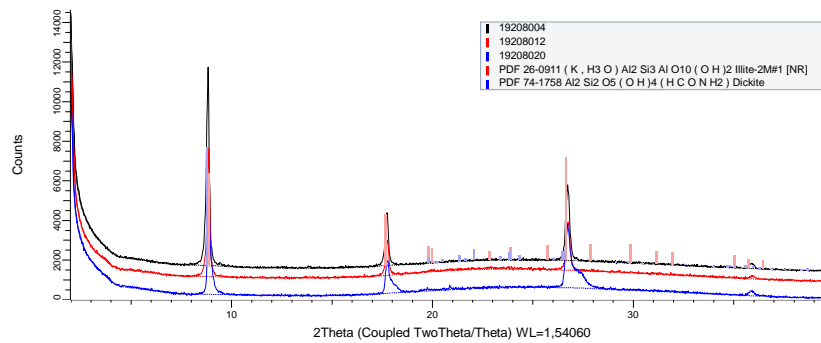


Figura 51. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a dickita e illita.

Muestra 5-13-21 (N-G-C) (M27)

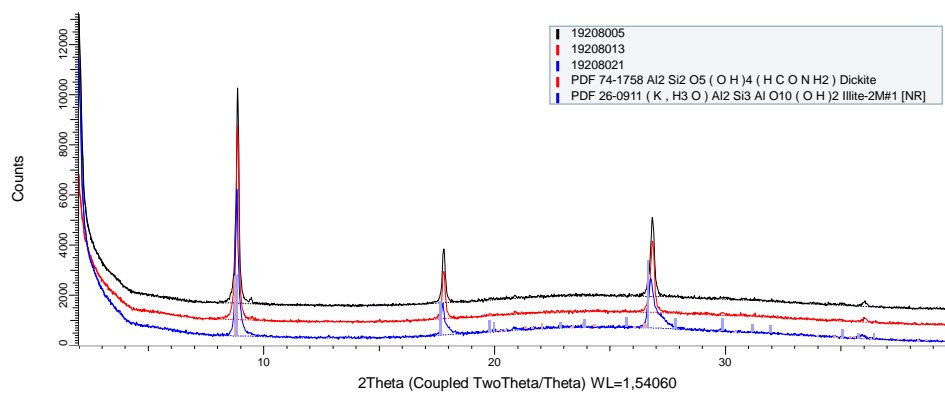


Figura 52. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a dickita e illita.

Muestra 6-14-22 (N-G-C) (M34)

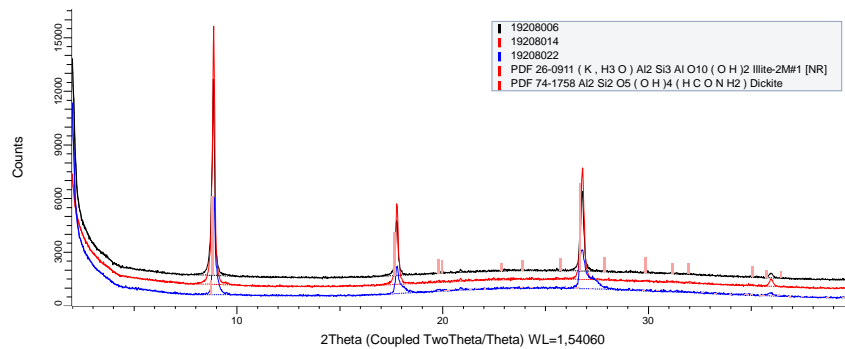


Figura 53. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a dickita e illita.

Muestra 7-15-23 (N-G-C) (M35)

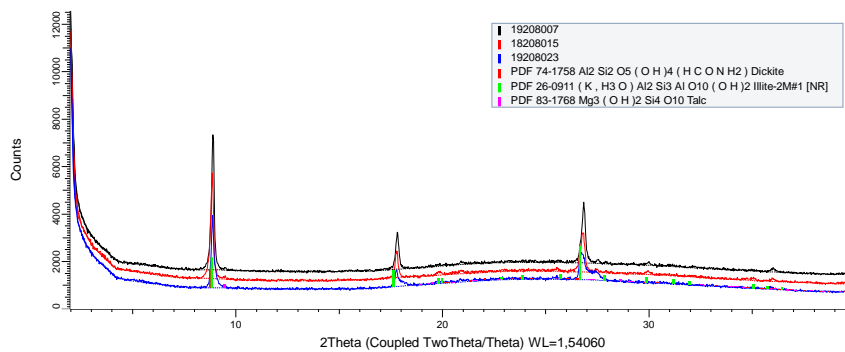


Figura 54. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a dickita, illita y talco.

Muestra 8-16-24 (N-G-C) (M49)

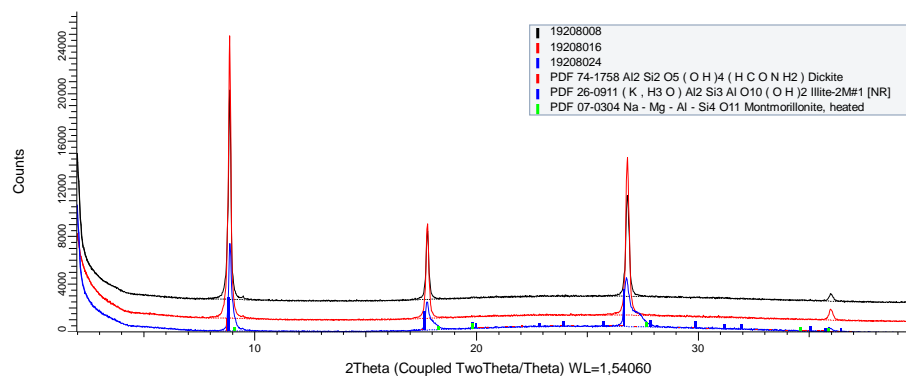


Figura 55. Análisis comparativo por difracción de rayos – X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra M49.

Los picos de difracción obtenidos evidencian la presencia de las fases cristalinas pertenecientes a dickita, illita y montmorillonita.

9. Acoplamiento con los Procesos de Beneficio Mineral

Una vez calculado el grado de liberación óptimo para los minerales de interés, en este caso la pirita, se llevaron a cabo los análisis mineralógicos correspondientes para definir que procesos de

beneficio mineral serian adecuados con el fin de obtener el mayor rendimiento del depósito y menores pérdidas económicas debido a una inadecuada elección de reactivos.

El primer punto para tener en cuenta para el procesamiento fue el modo de ocurrencia del oro que es el mineral de interés en este caso; los análisis de microscopía electrónica permitieron establecer que las partículas de oro se encuentran asociadas a sulfuros, específicamente pirita en la cual se encuentra incluido.

Un segundo punto a tener en cuenta fue el contenido de material arcilloso el cual sobrepasa el 20% presentándose principalmente como Illita y dickita (grupo caolín); puesto que las arcillas absorben agua y afectan la viscosidad de la pulpa modificando su reología lo que aumenta el consumo de reactivos y por tanto reduce el rendimiento económico se llevaron a cabo análisis de laboratorio utilizando diferentes reactivos para el proceso de flotación, entre estos xantato isopropílico de sodio, xantato amílico de potasio y dos tipos de ditiofosfatos.

Para definir que reactivo sería utilizado se realizaron pruebas de ángulo de contacto con los testigos de las secciones delgadas realizadas, el mayor resultado en estas pruebas (62.6%) se consiguió con xantato isopropílico de sodio por lo que las diferentes pruebas de flotación se llevaron a cabo con este reactivo esperando un mayor rendimiento de recuperación.

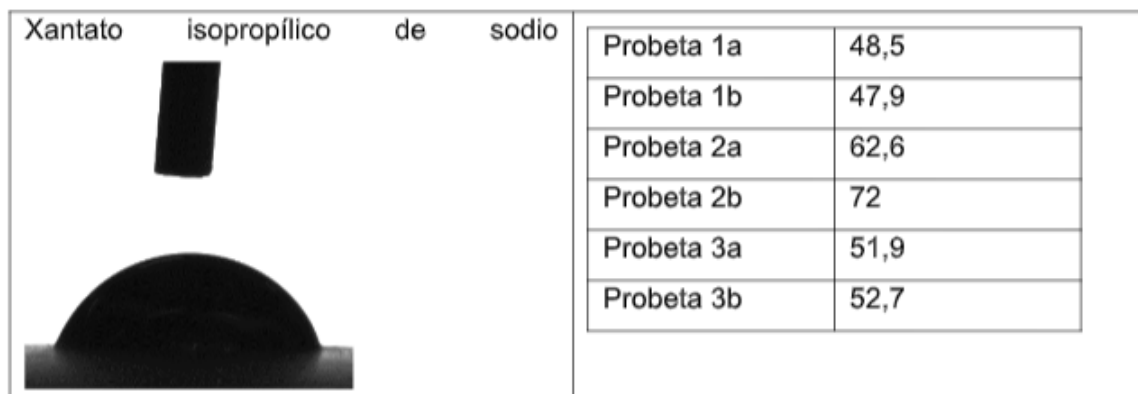


Figura 56. Prueba de ángulo de contacto sobre la pirita con xantato isopropílico de sodio.

El proceso seleccionado para el beneficio de los minerales es la concentración por flotación selectiva por medio del cual se obtendrá un concentrado de cobre y otro de pirita aurífera, alcanzando recuperaciones globales de 99% de cobre, 97% de oro y 80% de plata.

De acuerdo con el estudio de caracterización elemental realizado por ensayo al fuego, se encuentran leyes de oro de 4,58 g/t y de plata de 17,2 g/t.

9.1. Alternativas de beneficio de minerales

Teniendo en cuenta el análisis de caracterización realizado para la muestra, se han establecido 3 alternativas con distintas etapas para el beneficio de minerales de coexistencia, las cuales se encuentran señaladas en los Flowsheet de las figuras 69-71; estos fueron esquematizadas con el programa del Software en línea *draw.io*

Estos 3 diseños, involucran 3 etapas principales:

- **Conminución:** Chancado y molienda
- **Concentración:** A través de procesos gravimétricos: mesas Wilfley y concentradores y/o a través de proceso de flotación de espumas.
- **Secado:** Sedimentación y filtrado de concentrados y relaves

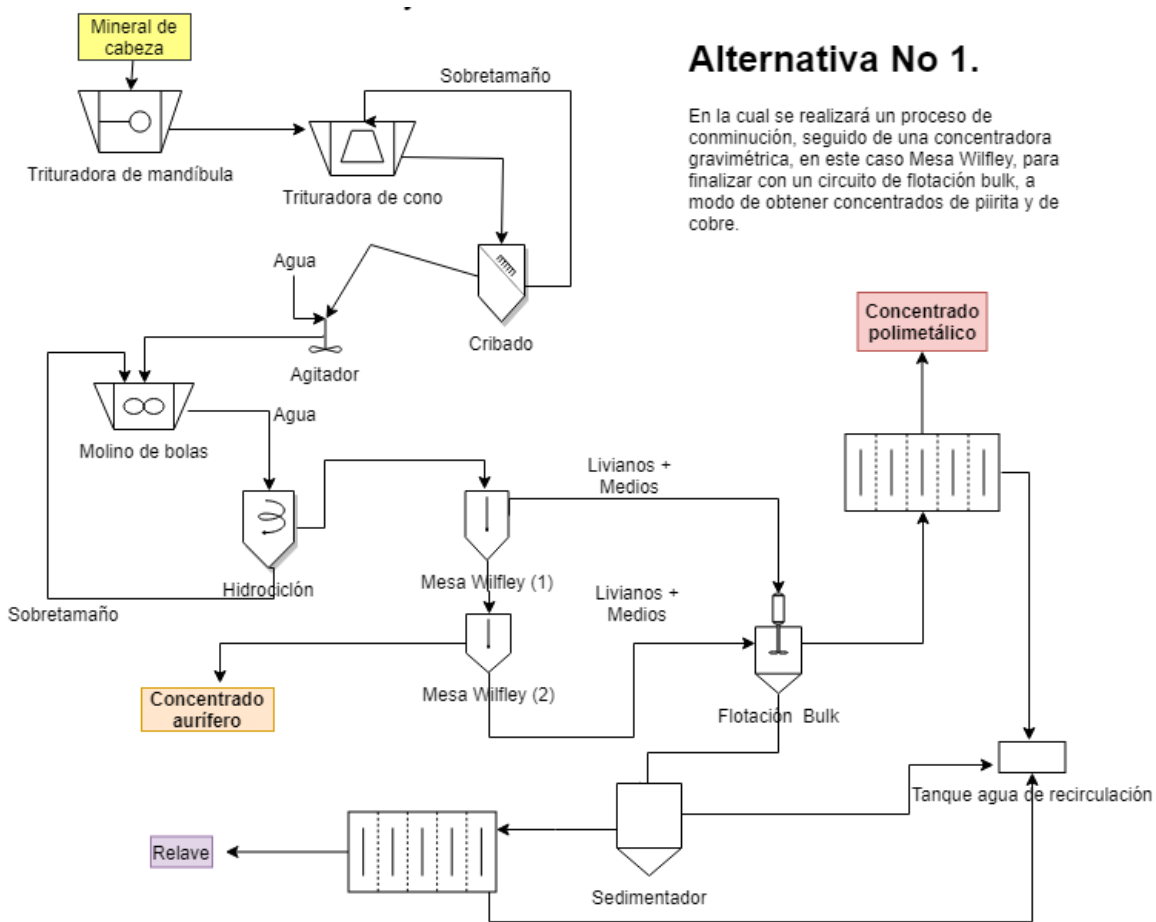
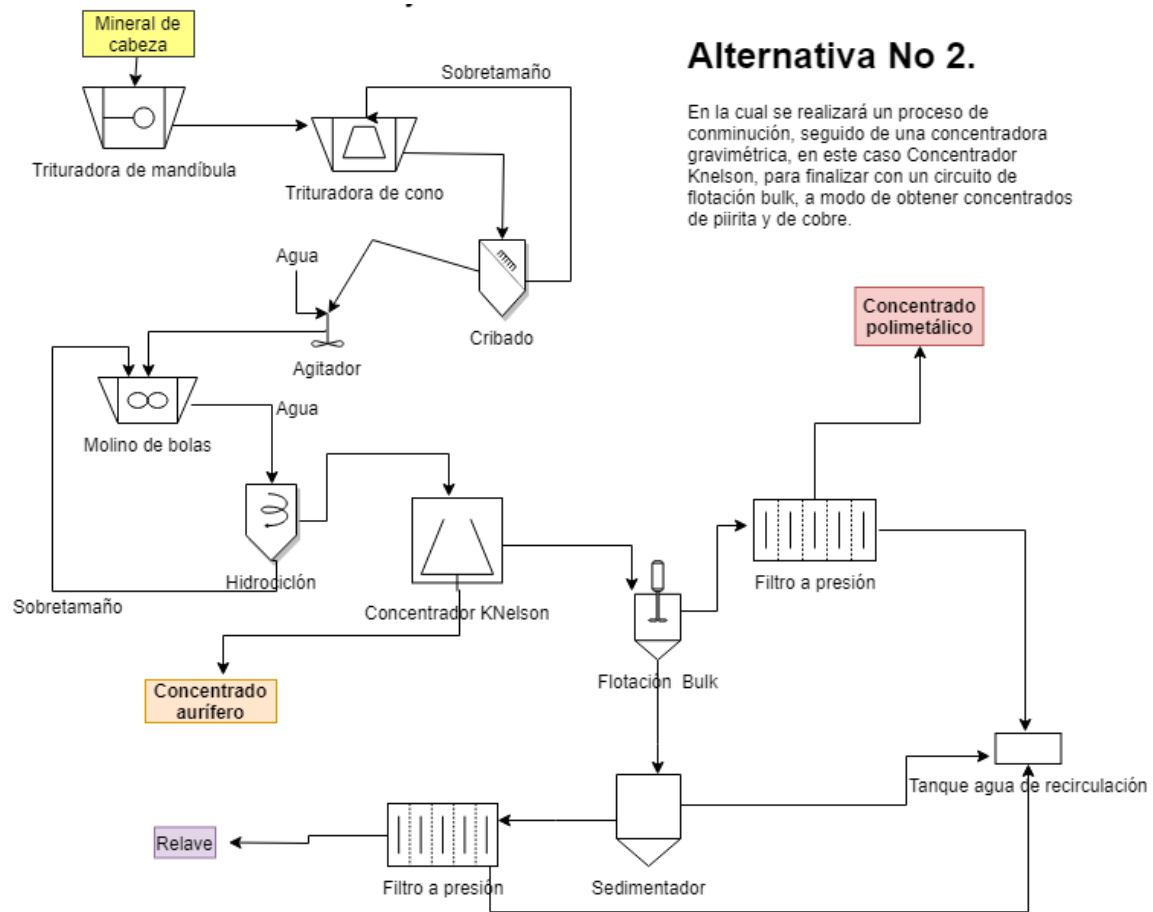


Figura 57. Alternativa 1 para el beneficio de minerales. Tomado de (Pardave, 2019)

Se propone utilizar un circuito de mesas Wilfley, de modo de concentrar gravimétricamente el mineral y obtener un concentrado rico en oro, posterior a este proceso, sus medios y finos pasarán a una etapa de flotación donde el concentrado, será secado a través de procesos de sedimentación y filtración.

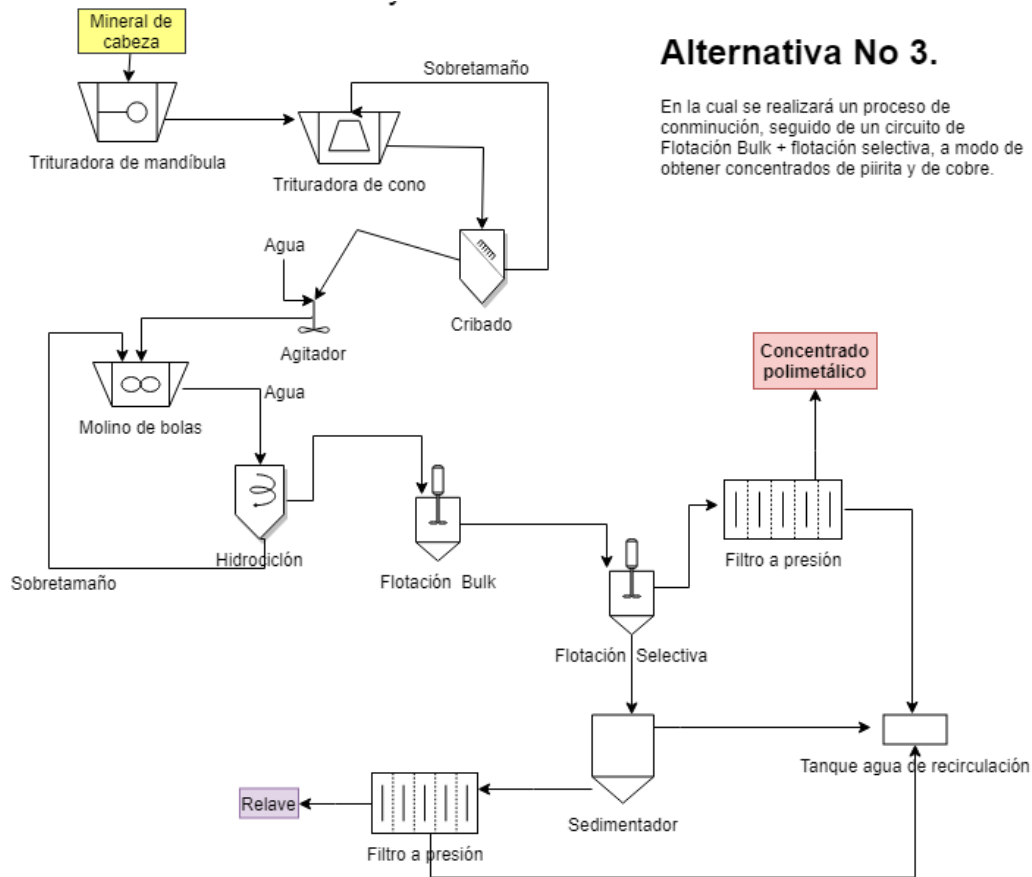


Alternativa No 2.

En la cual se realizará un proceso de conminución, seguido de una concentradora gravimétrica, en este caso Concentrador Knelson, para finalizar con un circuito de flotación bulk, a modo de obtener concentrados de pirita y de cobre.

Figura 58. Alternativa 2 para el beneficio de minerales. Tomado de (Pardave, 2019)

Se propone utilizar un concentrador K Nelson, de modo de concentrar gravimétricamente el mineral y obtener un concentrado rico en oro, posterior a este proceso, sus relaves pasarán a una etapa de flotación donde el concentrado, será secado a través de procesos de sedimentación y filtración.



Alternativa No 3.

En la cual se realizará un proceso de conminución, seguido de un circuito de Flotación Bulk + flotación selectiva, a modo de obtener concentrados de pirita y de cobre.

Figura 59. Alternativa 3 para el beneficio de minerales. Tomado de (Pardave, 2019)

Se propone utilizar una planta concentradora por flotación, de modo de concentrar graviméricamente el mineral y obtener un concentrado de cobre y otro de pirita ricos en oro y plata; de igual manera, los procesos de secado del concentrado serán a través de procesos de sedimentación y filtración.

10. Discusión de Resultados

La caracterización mineralógica y geoquímica para la mineralización vetiforme estudiada reveló el tipo de depósito hidrotermal al que se encuentra ligado y por consiguiente sus estilos de

mineralización, sin embargo, se encontraron minerales que poco coinciden con depósitos epitermales de alta sulfidación, razón por la cual se opta por el termino intermedia a alta sulfidación.

Los resultados obtenidos corresponden a un depósito hidrotermal de intermedia a alta sulfidación tal como menciona (Mathur et al.,2003) en su estudio donde mediante isotopos Re/Os clasifico los depósitos formados en Vetas como de baja sulfidación y aquellos formados en California como alta sulfidación mediante un diagrama de isócronas. Este mismo resultado lo podemos observar en trabajos de (Bissig et al.,2012) (Felder et al., 2005) (Rodríguez, 2014) donde mencionan una mineralización epitermal de intermedia a alta sulfidación para el área de California.

Algunos de los estilos de alteración hidrotermal encontrados en esta área coinciden con los hallados en el trabajo de (Rodriguez,2014) en la Bodega y la Mascota, minas muy cercanas al área de estudio del proyecto, específicamente la alteración filica, siendo esta el tipo de alteración principal y mayormente distribuida en el área del proyecto desarrollado en este trabajo.

Otras de las alteraciones presentes comprenden argílica, argílica avanzada y Silicificación. Conociendo las características mineralógicas, los tipos de alteración, profundidad de las muestras junto con el modelado 3D de las vetas se puede realizar un modelo aproximado de la distribución de la mineralización, sin embargo, para ser un modelo bastante confiable sería prudente realizar estudios petrográficos y geoquímicos a un número mayor de muestras distribuidos a distintas profundidades que abarquen totalmente la mineralización.

Con base en los análisis de microscopia electrónica de barrido se observa que el oro ocurre como oro nativo (Au), silvanita (Te-Au-Ag), petzita (Ag-Te-Au) y se presenta asociado a sulfuros como inclusiones en la pirita presentando tamaños desde 2-22 μm . No se observó oro libre ni presente en minerales de cobre o intersticial a diferencia de trabajos anteriores para el DMVC, este

tipo de teluros de Au-Ag son reportados también por (Gao et al., 2017) para el depósito de oro Dongping en China, caracterizado por ensambles de teluros de Au-Ag.

11. Conclusiones

El área donde se encuentra la mineralización vetiforme está compuesta principalmente por el gneis de Bucaramanga, presentándose secuencias anfibolíticas del gneis y pequeños intrusivos ígneos.

La mineralogía de las vetas se compone principalmente de cuarzo en un 55%, arcillas (Illitadickita, montmorillonita, halloisita) 20%, pirita 20% y feldespatos 5%.

Los minerales de la mena son: oro (nativo, electrum), asociado a teluros (silvanita, petzita), pirita, calcopirita, enargita, bornita, calcosina, hematita, magnetita y rutilos correspondientes al 25% frente a un 75% de la ganga compuesta principalmente por cuarzo, sericita, arcillas (illita, dickita, montmorillonita en menor proporción) y en cantidades menores moscovita, ortoclasa, flogopita, biotita.

La mineralización principal corresponde a filica, argílica, argílica avanzada y silicificación. De acuerdo con los análisis petrográficos y microscopía electrónica el oro ocurre como oro nativo (Au), silvanita (Te-Au-Ag), petzita (Ag-Te-Au) y se presenta asociado a sulfuros como inclusiones en la pirita presentando tamaños desde 2-22 μm .

El grado de liberación óptimo del mineral se dio para la malla 120, sin embargo, la malla 100 se recomienda por ser muy similar el resultado por tanto no es necesario un sobre costo en el proceso de molienda.

Los minerales arcillosos encontrados representan un porcentaje importante en la mineralización y debido a que pueden interferir en procesos posteriores como la cianuración, se hace necesaria su eliminación mediante proceso de flotación para garantizar optimas recuperaciones del mineral.

El proceso seleccionado para el beneficio de los minerales es la concentración por flotación selectiva por medio del cual se obtendrá un concentrado de cobre y otro de pirita aurífera.

Se proponen 3 alternativas para el beneficio mineral, cada una de ellas siguiendo el mismo ciclo de procesos: conminucion, concentración y secado, variando el método y equipos para el proceso de concentración.

12. Recomendaciones

Complementar con análisis químico y mineral a un número mayor de muestras con el fin de cubrir el área de mineralización tanto vertical como horizontalmente y obtener un modelo más específico que pueda ser útil en una futura exploración.

Realizar estudios cuantitativos con el fin de definir con mayor certeza el porcentaje de arcilla presente como de los demás minerales que conforman el depósito.

Complementar con estudios de isotopos estables, radiométricos e inclusiones fluidas para definir las condiciones de formación del depósito.

Realizar estudios conjuntos con otras carreras esenciales para la geología y su desarrollo integral como son química, física, metalúrgica y biología.

Referencias Bibliográficas

- Alruiz, O., Morell, S., Suazo, C., & Naranjo, A. (2009). A novel approach to the geometallurgical modelling of the Collahuasi grinding circuit. *Minerals Engineering*, 1060–1067.
- Banks, D. A., Bozkaya, G., & Bozkaya, O. (2019). Direct observation and measurement of Au and Ag in epithermal mineralizing fluids. *Ore Geology Reviews*, 111(August 2018).
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102955>
- Bissig, T., Mantilla Figueroa, L. C., & Hart, C. J. R. (2014). Petrochemistry of igneous rocks of the California-Vetas mining district, Santander, Colombia: Implications for northern Andean tectonics and porphyry Cu (-Mo, Au) metallogeny. *Lithos*, 200–201(1), 355–367.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.003>
- Dörr, W., Grösser, J. R., Rodriguez, G. I., & Kramm, U. (1995). Zircon U-Pb age of the Paramo Rico tonalite-granodiorite, Santander Massif (Cordillera Oriental, Colombia) and its geotectonic significance. *Journal of South American Earth Sciences*, 8(2), 187–194.
[https://doi.org/10.1016/0895-9811\(95\)00004-Y](https://doi.org/10.1016/0895-9811(95)00004-Y)
- Gao, S., Xu, H., Li, S., Santosh, M., Zhang, D., Yang, L., & Quan, S. (2017). Hydrothermal alteration and ore-forming fluids associated with gold-tellurium mineralization in the Dongping gold deposit, China. *Ore Geology Reviews*, 80, 166–184.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.023>
- García Ramírez, C. ., & Uribe Portilla, E. (2006). Caracterización Geológica Y Mineralógica Del Yacimiento La Tosca (Vetas, Santander , Colombia): Implicaciones Para El Procesamiento

Mineral De Las Menas Auroargentíferas. *Boletín de Geología Vol. 28, No. 2, 28(2)*.

- Giggenbach, W. F., & Glover, R. B. (1992). Tectonic regime and major processes governing the chemistry of water and gas discharges from the rotorua geothermal field, New Zealand. *Geothermics*, 21(1–2), 121–140. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(92\)90073-I](https://doi.org/10.1016/0375-6505(92)90073-I)
- Goldsmith, R., Marvin, R., & Mehnert, H. (1971). *Goldsmith-et-al-1971.pdf*.
- Goodfellow, R. C., & Dimitrakopoulos, R. (2016). Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty. *Applied Soft Computing Journal*, 40, 292–304. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.11.038>
- Heald, P., Foley, N. K., & Hayba, D. O. (1987). Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid- sulfate and adularia- sericite types. *Economic Geology*, 82(1), 1–26. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.1.1>
- Hedenquist, J. W., Arribas, A. R., & Gonzales-Urien, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13(August), 245–278.
- Hedenquist, J. W., & Lowenstern, J. B. (1994). The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370(6490), 519–527. <https://doi.org/10.1038/370519a0>
- Henley, R. W., & Ellis, A. J. (1983). Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. *Earth Science Reviews*, 19(1), 1–50. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(83\)90075-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(83)90075-2)
- Jeffrey W. Hedenquist. (1986). Mineralization Associated with Volcanic-Related Hydrothermal Systems in Circum-Pacific Basin: ABSTRACT. *AAPG Bulletin*, 70, 2009. <https://doi.org/10.1306/9488648e-1704-11d7-8645000102c1865d>
- Kay, S. M., & Mpodozis, C. (2001). Central Andean Ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *GSA Today*, 11(3), 4–9. [https://doi.org/10.1130/1052-5173\(2001\)011<0004:CAODLT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/1052-5173(2001)011<0004:CAODLT>2.0.CO;2)

- Lindgren, W. (1922). A suggestion for the terminology of certain mineral deposits. *Economic Geology*, 17(4), 292–294. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.17.4.292>
- Mantilla Figueroa, L. C., Bissig, T., Cottle, J. M., & Hart, C. J. R. (2012). Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera). *Journal of South American Earth Sciences*, 38, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.03.001>
- Mantilla Figueroa, L. C., Bissig, T., Valencia, V., & Hart, C. J. R. (2013). The magmatic history of the Vetas-California mining district, Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 235–249. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.03.006>
- Mantilla, L. (2011). Miocénico En El Distrito Minero De Vetas-California (Macizo De Santander). *Boletín de Geología*, 33, 43–58.
- Mathur, R., Ruiz, J., Herb, P., Hahn, L., & Burgath, K. P. (2003). Re-Os isotopes applied to the epithermal gold deposits near Bucaramanga, northeastern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(7), 815–821. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00126-8)
- Montiel, L., & Dimitrakopoulos, R. (2015). Optimizing mining complexes with multiple processing and transportation alternatives: An uncertainty-based approach. *European Journal of Operational Research*, 247(1), 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.002>
- Navarra, A., Grammatikopoulos, T., & Waters, K. (2018). NAVARA- INCORPORATION OF GEOMETALLURGICAL MODELLING INTO LONG-TERM PRODUCTION PLANNING.pdf. *Elsevier*.
- Navarra, Alessandro, Menzies, A., Jordens, A., & Waters, K. (2017). Strategic evaluation of concentrator operational modes under geological uncertainty. *International Journal of*

Mineral Processing, 164, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.05.009>

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. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.005>

Pindell, J. L., & Barret, S. F. (1990). Geological evolution of the Caribbean region; A plate-tectonic perspective. *The Geological Society of America*, 11.

Ransome, F. L. (1907). Cali- by the attack of sulphurous fumarolic vapors upon. *Society of Economic Geologists, Inc.*, 2(54), 667–692.

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

Richards, J. P., & Mumin, A. H. (2013). Magmatic-hydrothermal processes within an evolving Earth: Iron oxide-copper-gold and porphyry Cu ± Mo ± Au deposits. *Geology*, 41(7), 767–770. <https://doi.org/10.1130/G34275.1>

Rodríguez, A. L. (2014). *Geology, Alteration, Mineralization and Hydrothermal Evolution of the La Bodega-La Mascota deposits, California-Vetas Mining District, Eastern Cordillera of Colombia, Northern Andes* by Alfonso Luis Rodríguez Madrid Geologist, Universidad Industrial. The University of British Columbia.

Royero, M. J., & Clavijo, J. (2001). Memoria explicativa del mapa geológico generalizado del departamento de Santander, escala 1:400.000. *Ingeominas*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.234>

Rye, R. O. (1993). The evolution of magmatic fluids in the epithermal environment: The stable

- isotope perspective. *Economic Geology*, 88(3), 733–753.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.3.733>
- Sillitoe, R. H. (1972). Downloaded from gsabulletin.gsapubs.org on April 26, 2015. *The Geological Society of America*, 1(29), 29–36.
- Simmons, S. F., & Brown, K. L. (2006). Gold in magmatic hydrothermal solutions and the rapid formation of a giant ore deposit. *Science*, 314(5797), 288–291.
<https://doi.org/10.1126/science.1132866>
- Simmons, S. F., White, N. C., & John, D. A. (2005). *E252F3_4F534704C298Dc399C9Ae6F32D1B2C14.Pdf*. (1), 485–522.
- Skewes, M. A., & Stern, C. R. (1994). Tectonic trigger for the formation of late Miocene Cu-rich breccia pipes in the Andes of central Chile. *Geology*, 22(6), 551–554.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0551:TTFTFO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0551:TTFTFO>2.3.CO;2)
- Suazo, C. ., Kracht, W., & Alruiz, O. . (2010). Geometallurgical modelling of the Collahuasi flotation circuit suazo.pdf. *Minerals Engineering*.
- Wang, L., Qin, K. Z., Song, G. X., & Li, G. M. (2019). A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 107(19), 434–456.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.023>
- Ward, D. E. (1973). *Geologica*.
- White, N. C., & Hedenquist, J. W. (1990). Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 36(1–3), 445–474. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90063-G](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G)
- White, N. C., & Hedenquist, J. W. (1995). Epithermal Gold Deposits: Styles, Characteristics and Exploration. *Published in SEG Newsletter*, 1(23), 9–13.

