

Actividades de apoyo geológico para la estimación de recursos y el planeamiento minero en el contrato de concesión N° 10395, Sociedad Minera La Providencia S.A.S. Vetas, Santander

Camilo Andrés Flórez Ramos

Jose Alberto Guerrero Arias

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Andrés Mauricio Cáceres Bottia

Geólogo M. Sc

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

ACTIVIDADES DE APOYO GEOLÓGICO 2

A mi madre Eleane y a mi abuela Graciela, su inquebrantable apoyo y amor infinito han sido luz en los momentos más desafiantes, por el compromiso y entrega que me han brindado a lo largo de mi formación académica, les expreso mi profundo agradecimiento. El esfuerzo y sacrificio siempre tiene sus frutos, mis logros, triunfos y alegrías también son de ustedes. Las amo, gracias por la paciencia, sabiduría, motivación y ser mi ejemplo de lucha y superación.

A mi tío Ricardo y mi familia, por estar presentes y su gran colaboración.

Amigos y profesores que estuvieron en el camino de mi vida universitaria y ofrecieron su ayuda en momentos difíciles. A Paula por su apoyo incondicional, voluntad determinada y amorosa, por ser parte de mi inspiración.

Con gratitud y aprecio,

Camilo A. Flórez R.

La vida de cada ser humano al igual que los yacimientos son el producto de la unión de casualidades específicas para su formación. Dedico este logro a esas casualidades importantes

que han hecho de mi quien soy hoy en día y llegar hasta este punto.

Nacer en el seno de dos grandes seres quienes me han hecho la persona que soy brindándome todas las herramientas necesarias para afrontar la vida y todo su apoyo incondicional que me

ayudo a tener la fuerza necesaria para superar los desafíos que se me presentaron durante el

camino. Mis padres María y Reinaldo.

Tener en mi familia dos grandes ejemplos de superación y crecimiento quienes en el transcurso

de los años me guiaron hacia el camino de la geología y el gusto por las rocas, en especial por

la minería, llevándome a elegir esta hermosa profesión. Mi abuelo Alberto, minero ancestral y

mi tía Margareth, geóloga.

Coincidir en la vida con una gran mujer quien me ha brindado su apoyo, compañía y amor

estando a mi lado durante este camino y siendo parte de mi inspiración. Mi novia Juliana.

Y tener en mi vida a los mejores familiares y amigos quienes de una u otra manera han aportado

a lo que soy y a culminar con éxito este importante logro académico. Mis abuelos, mis

hermanos, mis tíos, mi madrina, mis primos y mis mejores amigos Jefferson, Jair, Alejandro y

Manuela.

Infinitas gracias y este logro es de ustedes.

Jose A. Guerrero A.

Agradecimientos

Expresamos un fuerte agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Geología por educarnos y brindarnos todos los recursos necesarios para formarnos como personas y profesionales íntegros.

Un agradecimiento especial a la Sociedad Minera La Providencia encabezada por su gerente Ronal González quienes nos brindaron la oportunidad de integrar a su equipo de trabajo brindándonos su apoyo y los insumos de seguridad necesarios para el desarrollo de las actividades geológicas en la mina.

A nuestro director, el profesor Andrés Mauricio Cáceres Bottia por su compromiso con nosotros brindándonos su paciencia, su apoyo y conocimiento, así como su respaldo y guianza en nuestra formación no solo como profesionales sino como buenas personas.

A los Geólogos Diego Fernando Salazar por su apoyo y colaboración en el desarrollo del proyecto.

A nuestros padres y familiares quienes nos han acompañado en cada uno de los proyectos emprendidos a lo largo de nuestra carrera.

A nuestros amigos, compañeros y demás profesores quienes nos acompañaron en nuestro paso por la universidad aportando a nuestro crecimiento profesional.

A la comunidad del municipio de Vetas por su hospitalidad y el recurso humano de la empresa por su tiempo y acompañamiento en nuestras labores en la mina.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Planteamiento del Problema y/o Justificación	16
3. Metodología	17
3.1 Búsqueda de Bibliografía.....	17
3.2 Trabajo de Campo.....	17
3.3 Análisis de Laboratorio.....	18
3.4 Tratamiento de Datos.....	18
3.5 Elaboración del Documento Final	19
4. Antecedentes	20
5. Marco Teórico.....	21
5.1 Minería.....	21
5.1.1 Pequeña minería.....	22
5.2 Oro (Au).....	22
5.3 Marco Geológico	24
5.3.1 Geología regional.....	24
5.3.2 Geomorfología	25
5.3.3 Geología estructural.....	26
5.4 Tipo de Yacimiento Mineral.....	30

5.5 Mineralización	32
6. Resultados	33
6.1 Trabajo de Campo	33
6.1.1 Reconocimiento de la mina.....	33
6.1.1.1 Determinación del área de extracción.....	33
6.1.1.2 Proceso de extracción.	33
6.1.1.3 Recuperación metalúrgica.....	34
6.1.2 Levantamiento geológico.....	34
6.1.3 Geología estructural de la mina	36
6.2 Tratamiento y análisis de laboratorio.....	40
6.2.1 Análisis petrográfico.....	40
6.2.2 Análisis e interpretación de datos litogeoquímicos	43
6.2.3 Modelamiento	45
7. Conclusiones	48
8. Recomendaciones	49
Referencias Bibliográficas	51

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Mapa base y de localización del contrato de concesión N° 10395, demarcado en el recuadro naranja.</i>	13
Figura 2 <i>Diagrama esquemático que muestra los diferentes tipos de formación de los yacimientos de oro. Tomado de: (Leal, 2011).</i>	23
Figura 3 <i>Mapa geológico regional tomado de (Mantilla et al, 2013)</i>	24
Figura 4 <i>Modelo conceptual de estilos de mineralización de arco magmático epitermales Au-Ag y pórfidos Cu-Mo. Tomado de (Corbett, 2002).</i>	30
Figura 5 <i>Cartografía de túneles.</i>	34
Figura 6 <i>Mapa geológico del Título Minero 10395.</i>	35
Figura 7 <i>Tendencia principal de las vetas. A. Delirios 2. B. Lajones. C. Pedro Frio. D. Majaos. E. La Derecha. F. López. G. Lanas. H. Real.</i>	37
Figura 8 <i>Estrías de falla. F1. Guerrero. F2. Salazar. F3. Cáceres.</i>	38
Figura 9 <i>Sistema de enrejado. Cota 2950 msnm.</i>	39
Figura 10 <i>Fotografías de secciones delgadas MP1, MP2 y MP3 en objetivo 5X.</i>	41
Figura 11 <i>Modelo Geológico – Estructural.</i>	46
Figura 12 <i>A. Sección W-E del sistema de fallas de la mina. B. Sección con azimuth 210^a del sistema de fallas de la mina.</i>	47
Figura 13 <i>Modelamiento de Vetas. A. Bloque Lajones. B. Bloque Providencia.</i>	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Fallas</i>	38
Tabla 2 <i>Análisis estadístico de los elementos As, Au, Ag, Cu, Mo, Pb y Zn</i>	43
Tabla 3 <i>Análisis estadístico de los elementos Hg, Ca, Na, K, Fe y S</i>	44

Lista de Apéndices

Verá apéndices adjuntos y se pueden visualizar en el repositorio

Apéndice A. Contenido del trabajo de grado

Apéndice B. Compilatorio de los levantamientos de datos estructurales tomados en la fase de campo.

Apéndice C. Datos de química multielemental de 110 muestra

Apéndice D. Mapa geológico del contrato de concesión 10395

Apéndice E. GDB del mapa geológico del contrato de concesión 10395

Resumen

Título: Actividades de apoyo geológico para la estimación de recursos y el planeamiento minero en el contrato de concesión N° 10395, Sociedad Minera La Providencia S.A.S. Vetas, Santander*

Autor: Camilo Andrés Flórez Ramos y Jose Alberto Guerrero Arias**

Palabras Clave: Modelo geológico - estructural, mina La Providencia, auroargentífero, geoestadística.

Descripción: El Distrito Minero de Vetas – California (DMVC), ha sido un territorio enfocado a la actividad minera desde el nacimiento de sus pueblos quienes a lo largo de la historia han desempeñado esta actividad de manera tradicional por medio de pequeñas empresas familiares, las cuales buscan crecer y mejorar sus métodos de extracción para llegar a ser empresas sostenibles que aporten al crecimiento de la región y al cuidado del medio ambiente.

La presente práctica empresarial centró sus esfuerzos en desarrollar actividades que permitieran apoyar a la empresa minera La Providencia en la toma de decisiones para mejorar el desarrollo de sus actividades en la mina y de esta manera tener un mayor conocimiento y posterior mejor aprovechamiento de sus recursos, para ello se desarrolló un modelamiento geológico – estructural el cual permite una mejor claridad de las estructuras (Fallas y Vetas) y su comportamiento dentro de la mina, de igual manera, se elaboró un modelo de bloques a partir de los análisis químicos realizados a un grupo de muestras tomadas en los túneles de la mina usando los protocolos de QA/QC.

Las labores realizadas durante la practica corresponden al levantamiento litológico y estructural del título minero, a la elaboración del modelo geológico – estructural y el modelo de bloques. Insumos que se espera aporten al crecimiento de la empresa, mejorando de esta manera sus planeamientos mineros y permitiendo un mayor aprovechamiento de sus recursos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director Andrés Mauricio Cáceres Bottia. Geólogo M. Sc.

Abstract

Title: Geological support activities for resource estimation and mining planning in the concession contract N° 10395, Sociedad Minera La Providencia S.A.S. Vetas, Santander *

Author(s): Camilo Andrés Flórez Ramos y Jose Alberto Guerrero Arias **

Key Words: Geological – structural modeling, La Providencia mine, auroargentiferous, geostatistics.

Description: The Vetas – California Mining District (VCMD) has been a territory focused on mining activity since the born of its towns, who throughout the history has carried out this activity in a traditional way through small family businesses, which seek to grow and improve their extraction methods to become in sustainable companies that contributes to the growth of the region and to the environment care.

This business practice has put its efforts on developing activities that allow supporting to La Providencia mining company, to making of decisions to improve the development of its activities in the mine and in this way have a greater knowledge and subsequent better use of its resources. For these reasons, a geological-structural modeling was developed, which will allow better clarity of the structures (Faults and Veins) and their behavior within the mine. Likewise, a blocks modeling was developed based on the chemical analyzes carried out a group of samples taken in the mine tunnels using QA/QC protocols.

The results of this practice correspond to the lithological and structural survey of the mining title, the geological – structural model and blocks model. Inputs that are expected to contribute to the growth of the company, thus improving their mining plans which will lead to greater use of their resources.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering, School of Geology. Director Andrés Mauricio Cáceres Bottia, Geologist M.Sc.

Introducción

El oro históricamente se ha caracterizado por ser un metal de alta importancia económica debido a que a lo largo de los años se ha convertido en un sinónimo de riqueza y poder. En la industria es un metal de gran interés debido a sus propiedades físicas como su alta maleabilidad, conductividad y capacitancia eléctrica, así como su resistencia a la corrosión y a la oxidación.

La exploración y explotación de depósitos de este tipo representan para las regiones crecimiento y desarrollo económico de las comunidades. (Christopher et al, 2023). Colombia cuenta con un alto potencial de este metal a lo largo de todo su territorio, principalmente en regiones bien conocidas como el cinturón metalogénico del Cauca medio, el batolito antioqueño y el distrito minero de Vetas – California, (Leal, 2011). Estos han sido identificados mediante diferentes campañas de cartografía y exploración desarrolladas por entidades del estado como el SGC, universidades y empresas mineras como es el caso de AngloGold Ashanti, B2Gold, Galway Resources, Aris Mining, entre otras. Estos depósitos han sido descritos y catalogados como depósitos de tipo magmático-hidrotermal tipo pórfido, reduced intrusion related (RIR), VMS, Skarn y depósitos de tipo epitermal principalmente con edades entre el Cretácico y el Mioceno determinados en el trabajo desarrollado por (Leal, 2011).

Para el área de trabajo localizada en el municipio de Vetas, Santander dentro del Distrito Minero de Vetas – California catalogado en este documento como DMVC, la extracción de oro a lo largo de la historia ha sido la principal actividad económica, desarrollando labores mineras mediante métodos empíricos y tradicionales por más de 400 años.

Con el fin de generar un mayor aprovechamiento de la acumulación de este metal en la corteza terrestre más específicamente en el área del contrato de concesión 10395, el presente trabajo en modalidad practica empresarial se plantea generar un aporte en el entendimiento del sistema mineralizado mediante el modelamiento de las estructuras que sirvieron como canales y trampas para los fluidos en la zona de la Mina La Providencia.

Este cometido se realizará mediante la toma sistemática de datos estructurales de vetas y alteraciones hidrotermales, las cuales serán modeladas en 3D mediante el software Leapfrog Geo y correlacionadas con datos litogeoquímicos de muestras tomadas sobre las mismas zonas.

Este modelamiento es un insumo primordial para la toma de decisiones en el planeamiento minero teniendo en cuenta que se podrán diferenciar las vetas de mayor ley de Au, así como las interacciones con otras estructuras de falla y las zonas con problemas geometalúrgicos por elementos cianicidas como el As, Cd, Sb, Zn, entre otros (Gonzalez Barrios & Angel, 1996) y las zonas de cierre y dilatación por factores estructurales.

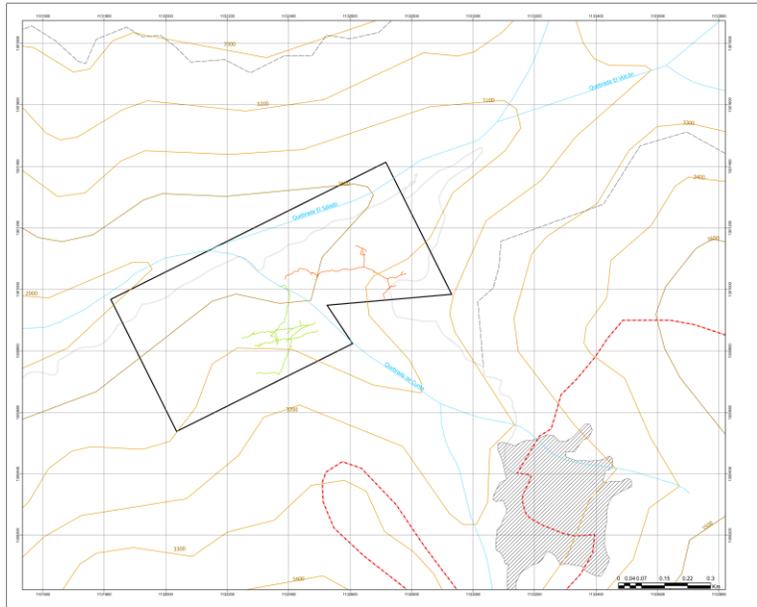
Localización del área de estudio

La zona de estudio está localizada sobre la cordillera oriental de los Andes Colombianos, al este del territorio colombiano en el noreste del departamento de Santander. El título minero 10395 se ubica en la parte central del municipio de Vetas a 2,5 Km del casco urbano en jurisdicción de la vereda Borrero sobre la vía Vetas-California con un área correspondiente a 46,33 ha. (Fig. 1.).

Figura 1

Mapa base y de localización del contrato de concesión N° 10395, demarcado en el recuadro naranja.

ACTIVIDADES DE APOYO GEOLÓGICO 14



Mapa Base del Titulo 10395

Localización



Leyenda

- Via**
- Via Tipo 2
- Via Tipo 5
- Via Tipo 6
- Drenaje Sencillo**
- Permanente
- Curva Nivel**
- Índice
- Intermedia
- Vetas**
- ▨ Casco Urbano
- Tunel Providencia
- Tunel Lajones
- ▭ Titulo

Escala

1:10000

Sistema de Coordenadas

Nombre: GAUSS BTA MAGNA
 GCS: CGS SIRGAS
 Proyeccion: Transverse Mercator
 Falso Este: 1,000,000.0000
 Falso Norte: 1,000,000.0000

Mapa elaborado por:

Jose Alberto Guerrero Arias
 Camilo Andres Florez Ramos



1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar actividades geológicas de apoyo para la estimación de recursos y el planeamiento minero del contrato de concesión N° 10395, localizado en el municipio de Vetas Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Compilar información bibliográfica para la comprensión del contexto geológico en la zona del distrito minero de Vetas-California.

Proponer un modelo geológico – estructural a partir de la recopilación de datos cartográficos a escala 1:500 de los túneles activos e históricos en el área de estudio.

Caracterizar la mineralogía de la mena y la ganga en las vetas mineralizadas a partir del uso de técnicas como petrografía, microscopía óptica de luz transmitida.

Generar la memoria técnica de la cartografía y el mapa a escala 1:5000 del título minero.

2. Planteamiento del Problema y/o Justificación

Hoy en día el uso de métodos mineros más tecnificados ha permitido que los títulos mineros localizados en DMVC tengan mejores desempeños en producción y por tanto sean más eficientes con respecto a la disposición de materiales estériles y de relaves, lo cual los lleva hacia una industria ambientalmente sostenible.

Para el caso de la mina La Providencia se ha observado que pese a contar con nuevas tecnologías en su planta de beneficio la mina no está logrando los niveles de producción esperada. La falta de conocimiento geológico, estructural y litogeoquímico adicional a la carencia de un buen planeamiento minero son los factores problemáticos identificados.

Al ser este un yacimiento de características magmáticas hidrotermales controlado estructuralmente la caracterización geológica es necesaria para entender la continuidad de los cuerpos mineralizados. La información topográfica suministrada demuestra que no se han seguido parámetros geológicos – estructurales en el desarrollo de la explotación de los túneles.

El planeamiento minero es fundamental para lograr el mayor aprovechamiento del recurso mineral presente en la mina, sin embargo, la falta de control geológico durante el desarrollo de este ha llevado a que factores geoquímicos y geomecánicos propios de cada veta no sean tenidos en cuenta afectando la recuperación minera y geometalúrgica de los metales preciosos.

De esta manera el modelamiento geológico – estructural, así como el análisis litogeoquímico son insumos necesarios para lograr un mejor planeamiento minero y un mayor conocimiento de los minerales cianicidas, necesarios para desarrollar una adecuada metalurgia en la planta de beneficio.

3. Metodología

El desarrollo de este trabajo de grado se llevará a cabo mediante la modalidad de práctica empresarial para la cual se determinaron cinco fases de desarrollo que corresponden a la búsqueda bibliográfica y de material científico de investigación, trabajo de campo, análisis de laboratorio, tratamiento de los datos y elaboración del documento final. Estas se describen a continuación:

3.1 Búsqueda de Bibliografía

Se realizará una búsqueda de información correspondiente a estudios previamente realizados en el área del proyecto y sus alrededores, con el fin de determinar un contexto geológico y tectónico de la zona que ayude al entendimiento del sistema de mineralización aportando información que unida a los datos recopilados en el desarrollo de la práctica den cumplimiento a los objetivos propuestos.

3.2 Trabajo de Campo

Se desarrollarán fases de campo en la cual los practicantes se desplazarán hacia el área del proyecto minero donde se llevarán a cabo labores de geología de mina que apoyen en las actividades diarias en la mina, se realizara una toma masiva de datos estructurales de cada cuerpo mineralizado y estructuras presentes para obtener una densidad considerable de información que permitan la propuesta de un modelo geológico – estructural confiable, finalmente se realizará un muestreo sistemático con un total de 110 muestras de las zonas mineralizadas dentro de las labores activas del proyecto bajo estándares de QA/QC, las cuales fueron enviadas al laboratorio SGS Colombia S.A pago por la empresa minera para análisis químicos multielementales y de ensayo al fuego para la determinación de valores de elementos químicos como el oro, útiles en la definición del modelo de bloques-.

3.3 Análisis de Laboratorio

Las muestras tomadas serán analizadas bajo la técnica de absorción de dos ácidos/absorción de agua regia y espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) que consiste en generar átomos excitados que emiten radiación electromagnética al retornar a su estado fundamental. La longitud de onda de esta radiación es característica de cada elemento y esto hace que sea una técnica muy selectiva para la determinación de la litogeoquímica de cada una de las muestras y de esta manera poder comprender el comportamiento químico de la interacción fluido – roca en el sistema magmático hidrotermal, (IQS 2018) así como análisis de ensayo al fuego que consiste en 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, (INGEMMET). que permiten definir los contenidos de oro (Au) presentes en el sistema. De igual manera se realizará un análisis a tres secciones delgadas mediante el uso del microscopio petrográfico de luz transmitida presente en los laboratorios de la escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander con el fin de observar los aspectos mineralógicos y las asociaciones paragenéticas presentes.

3.4 Tratamiento de Datos

Inicialmente se seleccionará la información estructural recopilada en la mina a partir de la cual se podrán definir las diferentes estructuras allí presentes lo cual ayudara al entendimiento del sistema geológico – estructural del área de trabajo para iniciar la construcción de la propuesta del modelo respectivo que permita conocer el comportamiento de dichas estructuras tectónicas en relación con la roca caja y el emplazamiento de los fluidos mineralizantes.

El análisis de los resultados litogeoquímicos se desarrollará utilizando la metodología del coeficiente de correlación de Pearson el cual corresponde a un estudio geoestadístico que permite relacionar los datos obtenidos de diferentes elementos entre si mediante el uso de parámetros estadísticos centrales como lo son la desviación estándar y la covarianza de los elementos determinados a partir de la siguiente formula:

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Donde ρ corresponde al coeficiente de correlación de Pearson, σ_{xy} a la covarianza de los datos y $\sigma_x \sigma_y$ es la desviación estándar de cada uno de los datos.

Así mismo se realizará una transformación de los datos mediante el uso del logaritmo natural que permite disminuir la asimetría de la información y representarla de manera grafica. Esta metodología fue tomada y aplicada a partir de (Echavarría, L.E. & Etcheverry R.O. 1998).

3.5 Elaboración del Documento Final

Los datos tomados serán recopilados y estructurados en un documento de investigación donde se cumplirán los diferentes objetivos propuestos previamente.

4. Antecedentes

En el área del Distrito Minero de Vetas - California (DMVC) se ha realizado minería desde épocas coloniales, se remonta al menos al siglo XVII. A fines del siglo XIX, una empresa británica inició la minería subterránea en la mina San Bartolo. La extracción de oro en el área de Vetas se ha llevado a cabo mediante métodos subterráneos rastreados. En general, el desarrollo se realiza mediante socavones en varios niveles, derivando a lo largo de vetas angostas, extrayendo y transportando el mineral en vagones de dos toneladas, a lo largo de vías de madera y/o acero. Unos años más tarde, una empresa francesa, financiada por el Banco Rothschild, llevó a cabo una minería subterránea en la zona. Durante las últimas décadas, aumentó la producción de los depósitos de vetas del DMVC en la Cordillera Oriental. Esto condujo a una mayor exploración y estudio geológico en el Macizo de Santander y al descubrimiento de los yacimientos de Angostura y La Bodega – La Mascota.

Actualmente en el territorio existen varios títulos mineros para el desarrollo de actividades de prospección y exploración de minerales metálicos a cargo de compañías multinacionales, contratos de concesión para formalización minera de tradicionales labores activas de pequeña minería por empresas de la región, minería artesanal y/o subsistencia como principal actividad económica de la zona.

En términos de geología económica, regional y tectonoestructural en el área de estudio, se destaca esfuerzos por reconstruir los eventos magmáticos del neógeno parentales de los depósitos minerales presentes en el DMVC, trabajos realizados por la industria minera en proyectos de exploración, evaluación y estimación de recursos minerales, al igual que aportes al conocimiento

de la génesis, caracterización mineralógica, geológica y estudios de impactos ambientales por la operación minera.

En Vetas, a escala detallada de la zona de estudio, (García & Rey, 1991) realizan un seguimiento estadístico del control estructural del emplazamiento de cuerpos vetiformes en la mina de oro La Tosca, destacando tres tendencias estructurales: N60-70°W/50E, N20-30°E/40°W y N60-70°/50°W. (Lasprilla & Lozano, 1991), realizaron la evaluación geológica de eventos metasomáticos y paragénesis mineral del yacimiento aurífero tipificado como epitermal de alta sulfuración en la mina Reina de Oro, (García 1996); estudia la geología y mineralogía de la mina la Providencia y del Depósito de colas de la mina Reina de Oro, con fines de implementaciones de procesos metalúrgicos, determinó para el yacimiento auroargentífero de la Providencia oro nativo asociado a un primer pulso mineralizante con pirita, calcopirita y pirrotina; y un segundo pulso mineralizante con oro asociado a pirita y pirrotina. (García, et al. 2003 y 2006), realizan una serie de caracterizaciones metalogénicas a los yacimientos Delirios y La Tosca, determinando para Delirios a partir de alteraciones y mineralización dominante en Au, Ag, Pb, Zn y alteración fílica con evidencias en mezclas de fluidos más asemejada a depósitos epitermales de baja sulfuración.

5. Marco Teórico

5.1 Minería

El concepto de minería en el transcurso de los años y a través de diferentes culturas ha hecho referencia a la actividad de la extracción de los recursos minerales presentes en la tierra. En

Colombia la minería se contempla como una actividad económica que se encarga de la extracción y explotación de los minerales que se encuentran en el suelo y el subsuelo, siendo esencial para la vida de toda sociedad y junto con la agricultura son las más antiguas de la humanidad, (Mineregia).

5.1.1 Pequeña minería

La clasificación de los tipos de minería se de acuerdo con la ley y los estándares de cada nación, determinándose en gran medida por las áreas de extensión o sus niveles de producción. Colombia determina la clasificación de los tipos de minería de acuerdo con el decreto 1666 del 2016, artículo 2.2.5.1.5.4. “Clasificación de la minería en pequeña, mediana y gran escala en etapa de exploración, o construcción y montaje: Pequeña minería corresponde a menor o igual a 150 hectáreas” y al artículo 2.2.5.1.5.5. “Clasificación de la Minería a pequeña, mediana y gran escala en etapa de explotación: Pequeña minería de minerales metálicos con una producción de hasta 25.000 toneladas al año.”

5.2 Oro (Au)

El término "Oro" se origina en el latín "Aurum," que a su vez proviene del hebreo "Aor," que significa "luz." Su descubrimiento se menciona en antiguos manuscritos de civilizaciones hindúes, chinas y hebreas. El oro ha desempeñado un papel fundamental en el avance del conocimiento, especialmente en la química en tiempo de los alquimistas. Propiedades como el brillo y la inalterabilidad de este metal lo han posicionado con el tiempo como el metal máspreciado por el hombre como símbolo de riqueza y prosperidad, (Lozano & Pulido, 1986).

El oro es un metal químicamente situado en el grupo 11 y período 6 de la tabla periódica, con número atómico 79 y masa atómica de 196.967 g/mol, (Royal Society of Chemistry, 2023).. Presenta propiedades físicas como un color amarillo brillante, dureza baja, maleabilidad,

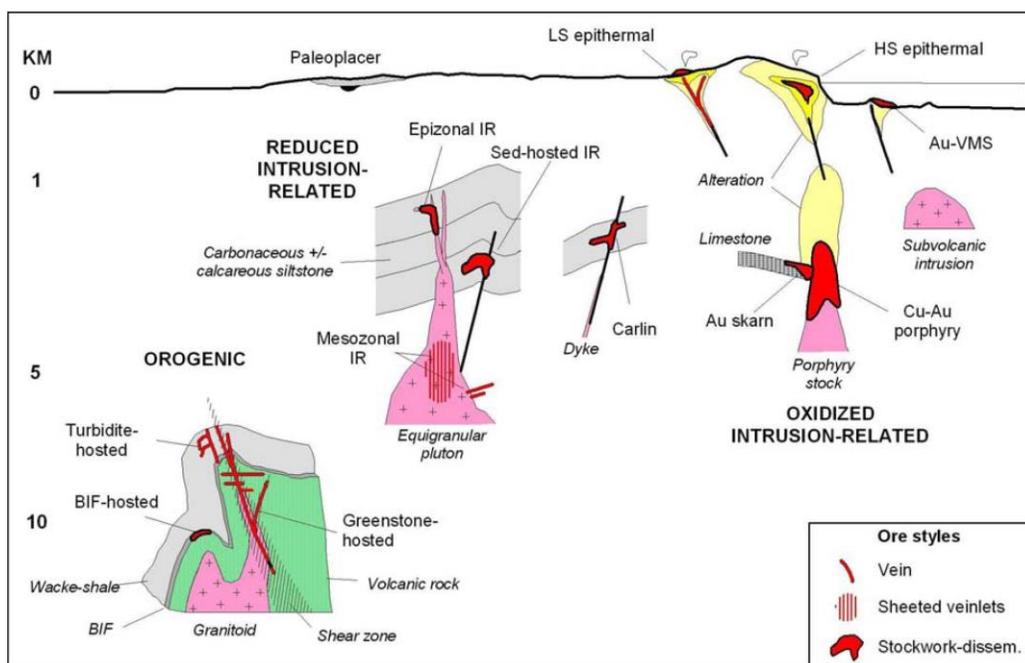
ductilidad y alta densidad. Además, es un buen conductor eléctrico y de calor, con un alto punto de fusión (1064.18 °C), lo que lo hace importante en diversas industrias, (Lozano & Pulido, 1986).

El oro se encuentra en estado nativo y a menudo asociado con otros metales como plata, cobre, bismuto, mercurio y elementos del grupo del platino, así como en compuestos como telururos y seleniuros, (Macdonald, 2007). Los depósitos de oro se clasifican según características tectónicas y químicas, incluyendo yacimientos orogénicos en margenes divergentes, yacimientos de pórfido de Cu-Au-Mo y VMS en ambientes convergentes, yacimientos epitermales de alta y baja sulfuración, y depósitos relacionados con placeres en ambientes denudacionales, (Leal, 2011).

Figura 2

Diagrama esquemático que muestra los diferentes tipos de formación de los yacimientos de oro.

Tomado de: (Leal, 2011).



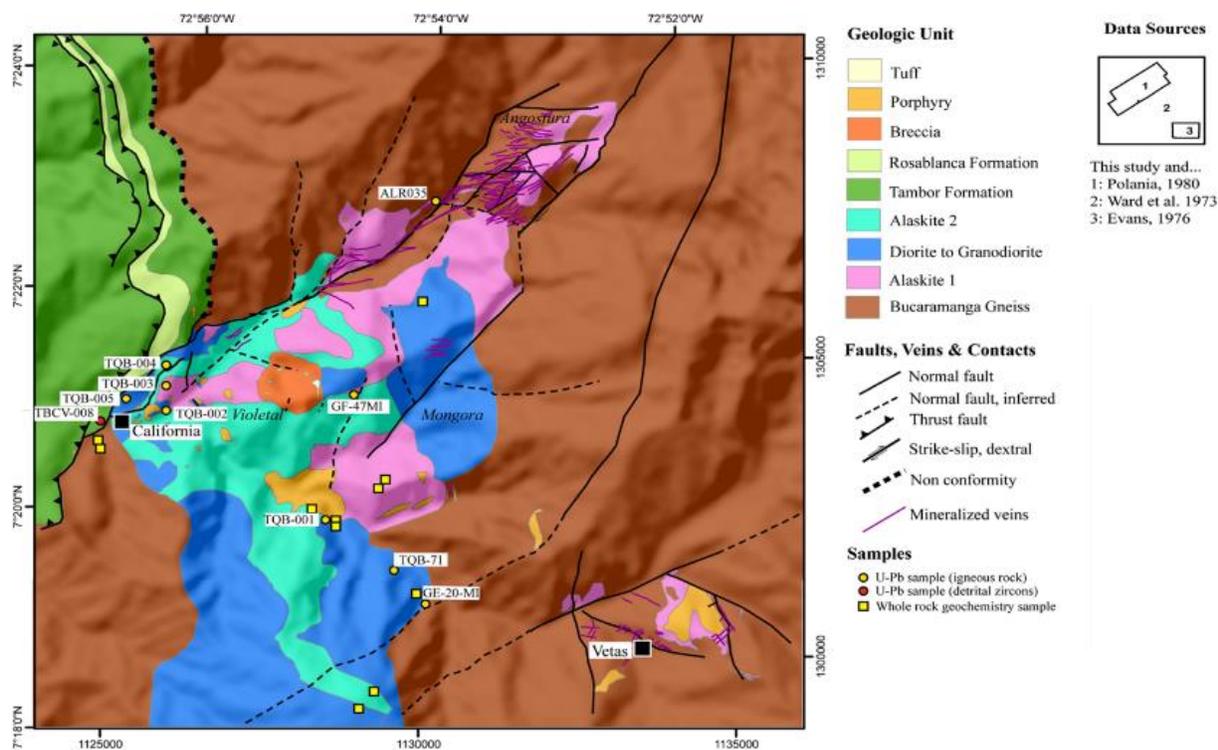
5.3 Marco Geológico

5.3.1 Geología regional

El contrato de concesión 10395 se encuentra ubicado sobre el bloque de Maracaibo, (Cediel et al., 2003), más precisamente en el macizo de Santander, que se define como una región geológica dominada por un basamento Mesoproterozoico en el que la litología principal corresponde al gneis de Bucaramanga con edades de 680 ± 140 M.a. reportadas por (Goldsmith et al., 1971) con base en Rb – Sr en hornblenda de un neis biotítico de la zona de Berlín – Vetas y de 945 ± 40 M.a. reportadas por (Ward et al., 1973) con base en K – Ar en hornblenda de un neis hornbléndico proveniente de las cercanías a Ocaña. Este cuerpo se reporta principalmente en la zona con características de gneis cuarzo-feldespático, biotítico y anfibolítico (Ureña Suarez & Zuluaga, 2011). Ensamblados durante la orogenia Greenvilliana Orinoquiense 0.47 Ga Quetame-Caparonensis, (Restrepo, Pace & Cediel, 2010). En la zona se evidencia también la presencia de diferentes pulsos de granitoides del Triásico – Jurásico principalmente clasificados como alaskitas, dioritas y monzogranitos así como un grupo de pulsos porfiríticos de granodiorita con edades entre 8-10 M.a. correspondientes al Mioceno los cuales se encuentran altamente relacionados con la genética de la importante mineralización de Au, Cu, Ag en sistemas de tipo pórfido y epitermales de alta e intermedia sulfuración (Mantilla et al, 2013). (Fig. 3).

Figura 3

Mapa geológico regional tomado de (Mantilla et al, 2013)



5.3.2 Geomorfología

El reconocimiento de rasgos morfoestructurales a partir de la fotointerpretación de características topográficas y geomorfológicas, permiten inferir estructuras y rasgos tectónicos deformativos para la definición de zonas con potencial en mineralización. La ocurrencia de depósitos minerales y la impronta en las rocas preexistentes, modifica características composicionales, petrofísicas y morfológicas.

La evaluación morfoestructural y litológica enmarca profundamente el paisaje subyacente a las ocurrencias minerales. La presencia de un terreno inmaduro de alta montaña, resultado de paleosuperficies heredadas y múltiples eventos tectónicos que han participado en su evolución, condicionan la determinación de zonas con geformas originadas por la exhumación o levantamiento de cuerpos rocosos, aportan a la determinación de un régimen transpresivo y en su

contraparte depresiones y estructuras de colapso pueden indicar el dominio de un régimen transtensivo. Es importante reconocer materiales competentes y estructuras que infieran una resistencia a la erosión con el fin de determinar zonas con metasomatismo y emplazamiento de cuerpos filonianos compuestos de minerales altamente resistentes a la meteorización.

5.3.3 Geología estructural

Una falla geológica es una estructura compleja, establecida por una discontinuidad, con desplazamiento paralelo a las paredes, dominado por mecanismos de deformación frágil y que se forma, mediante la unión de pequeñas fracturas de tensión que se expanden a lo largo de su propio plano de discontinuidad (Fossen, 2010).

Es imperativo reconocer la disposición y control tectonoestructural en la mineralización, el espaciado y dilatación de los complejos rocosos favorece a los procesos de ascenso de fluidos, entrapamiento y precipitación de este tipo de yacimientos minerales. La favorabilidad de emplazamiento de sistemas relacionados a intrusiones ígneas, de forma disseminada o en venas y vetillas se relaciona con fallas de alto ángulo de buzamiento y la intersección de dos o más sistemas de fallas.

La orientación de las fracturas esta condiciona por los esfuerzos principales y el comportamiento mecánico de los materiales, la heterogeneidad en la litología a lo largo de un terreno y a cualquier escala, puede resultar en la formación de fallas no planares (Lilli & Oyarzun, 2013). La curvatura a lo largo del trazo o plano de falla es conocida como inflexión o flexura. Estas inflexiones generalmente producen zonas de apertura o cierre de espacios debido a esfuerzos diferenciales en el área de la inflexión, siendo transpresión las zonas de cierre de espacio y transtensión las zonas de apertura de espacio.

Las fallas y fracturas asociadas son abundantes en la mayoría de los depósitos epitermales de oro y plata y pueden servir como control principal sobre la ubicación, distribución y forma de los yacimientos. Las fallas proporcionan las vías principales para el ascenso de fluidos hidrotermales profundos y de alta temperatura hacia el ambiente epitermal poco profundo. (Cox, et al 2001; Micklethwaite, 2009; Rowland y Simmons, 2012) y también permiten el descenso de temperatura al permitir el paso de fluidos más fríos (aguas meteóricas). Las vetas mineralizadas comúnmente ocupan redes de fallas complejas, especialmente en tramos de dilatación entre segmentos de falla echelon y a lo largo de fallas con geometrías sigmoidales, y se pueden formar vetas más grandes durante numerosos ciclos de apertura por fallas sísmicas y sellado por precipitación de cuarzo, calcita y otras gangas y minerales (Sibson, et al.1975; Micklethwaite, 2009). Pequeñas fracturas de extensión y de corte en la pared inferior y la pared colgante de fallas más grandes pueden formar zonas de vetas laminadas o de stockwork estrechos (Begbie, et al. 2007). Los patrones de permeabilidad y flujo de fluidos en los sistemas epitermales son complejos y varían según el régimen tectónico regional, la litología y las estructuras preexistentes; estos pueden evolucionar en respuesta a perturbaciones de tensión locales, como el emplazamiento de diques, deslizamiento oblicuo en fallas normales o pulsos de alta presión de fluido (Cox, et al. 2001; Rowland y Simmons, 2012). La permeabilidad y el flujo de fluidos también aumentan y disminuyen con el tiempo: las fallas se rompen y aumentan la permeabilidad y el flujo de fluidos, y el espacio abierto se llena a medida que los minerales hidrotermales precipitan, lo que reduce la permeabilidad y el flujo de fluidos. Las zonas de flujo de fluido vertical mejorado se localizan en las puntas (extremos) de las fallas, en las zonas de paso y donde cambian los buzamientos de la falla (Cox, et al. 2001; Micklethwaite, 2009; Faulds, et al. 2011; Rowland y Simmons, 2012). Los estudios estructurales y de textura detallados de los depósitos epitermales muestran que la

mineralización epitermal de oro y plata se asocia típicamente con pulsos de fluido transitorios y repetidos a través de redes de fallas en lugar de procesos de estado estacionario. Las fallas normales, de deslizamiento oblicuo, de rumbo y inversas son comunes en los sistemas epitermales de oro y plata e influyen fuertemente en la distribución del mineral. Las fallas de postmineralización pueden desmembrar y desplazar los depósitos epitermales e inhibir o mejorar la erosión de estos depósitos poco profundos.

El Macizo de Santander es una región geológica con predominio de un régimen transpresivo, donde se distinguen dominios limitados por fallas longitudinales mayores con cinemática sinistral. Este estilo estructural lo diferencia de otras regiones geológicas como el Macizo de Floresta al sur y la Serranía de Perijá al norte, donde predomina la compresión (fallas inversas, eventualmente con componente de rumbo). Hacia el centro de la zona de Pamplona se presentan tensores en distintas direcciones y asociados a todo tipo de fallas, pero se puede distinguir un predominio de Esfuerzo Máximo Horizontal W-E y otro SW-NE, el primero con más evidencia de campo como el más reciente. Hacia los bordes, relacionados con la cinemática dextral y sinistral de las fallas de Boconó y Chitagá, en el centro del Macizo de Santander, hacia la zona del municipio de Vetas, se observan rasgos que se relacionan con la influencia de Pamplona, configurando una zona de mayor elevación topográfica en “pop-up”. (Velandia, et al. 2017)

En el DMVC las principales estructuras de tendencia norte-noreste NNE, se conocen como el sistema de fallas Cucutilla/Vetas (Lavigne, 2011) prolongación de la Zona de Transición Transversal de la Falla de Boconó. Así como el frente de la Cuña de Pamplona se manifiesta en fallas inversas, la deformación en sus bordes se transmite especialmente en fallas transcurrentes que la restringen lateralmente. En el límite norte se puede observar el desplazamiento de rumbo

dextral de la Falla de Boconó, que al entrar a Colombia (en varios trazos menores y subparalelos) se conecta con las fallas inversas de la cuña orogénica por lo que se han interpretado como ramales en una terminación transpresiva de Boconó (“cola de caballo”). Esta influencia del desplazamiento lateral de Boconó configura la zona que Osorio et al. (2008) denominan Zona de Transición Transversal, la cual tiene continuidad en el Macizo de Santander con implicaciones importantes en la deformación en profundidad ya que por tratarse de una zona transcurrente rompería la corteza y facilitaría el tránsito de fluidos en sus segmentos transtensivos y así ayudaría a explicar la presencia de las mineralizaciones en la zona de Vetas y California. (Velandia, et al. 2017)

La Falla de Boconó (FB) es un accidente transcurrente dextral, que se extiende desde la depresión del Táchira al SW hasta el poblado de Morón en el estado Carabobo al NE, con una longitud total cercana a los 550 km, surcando longitudinalmente los Andes de Mérida y bordeando por el noroeste la depresión de Yaracuy. En su extremidad sur, la falla se conecta con el sistema de piedemonte llanero colombiano a través del sistema de fallas de Chinácota- Bramón, luego de sufrir dos inflexiones en ángulo recto opuestas; estructura conocida como el indentor Pamplona. (Audemard, 2016).

La deformación en el límite sur de la cuña orogénica se presenta en desplazamientos de rumbo sinestrales a lo largo de las fallas de Chucarima (activa) y Chitagá, cuya terminación al W puede relacionarse también con los cabalgamientos del frente de deformación, pero que con relación al Macizo de Santander puede configurar otra zona transversal (de Chitagá) con estructuras transtensivas, como fallas normales con rumbo NW. (Velandia, et al. 2017)

Las principales estructuras a escala de la zona de estudio son estructuras con rumbo noreste NE, como las estructuras El Dorado, Trompetero y La Peter, zonas de fallas con rumbo

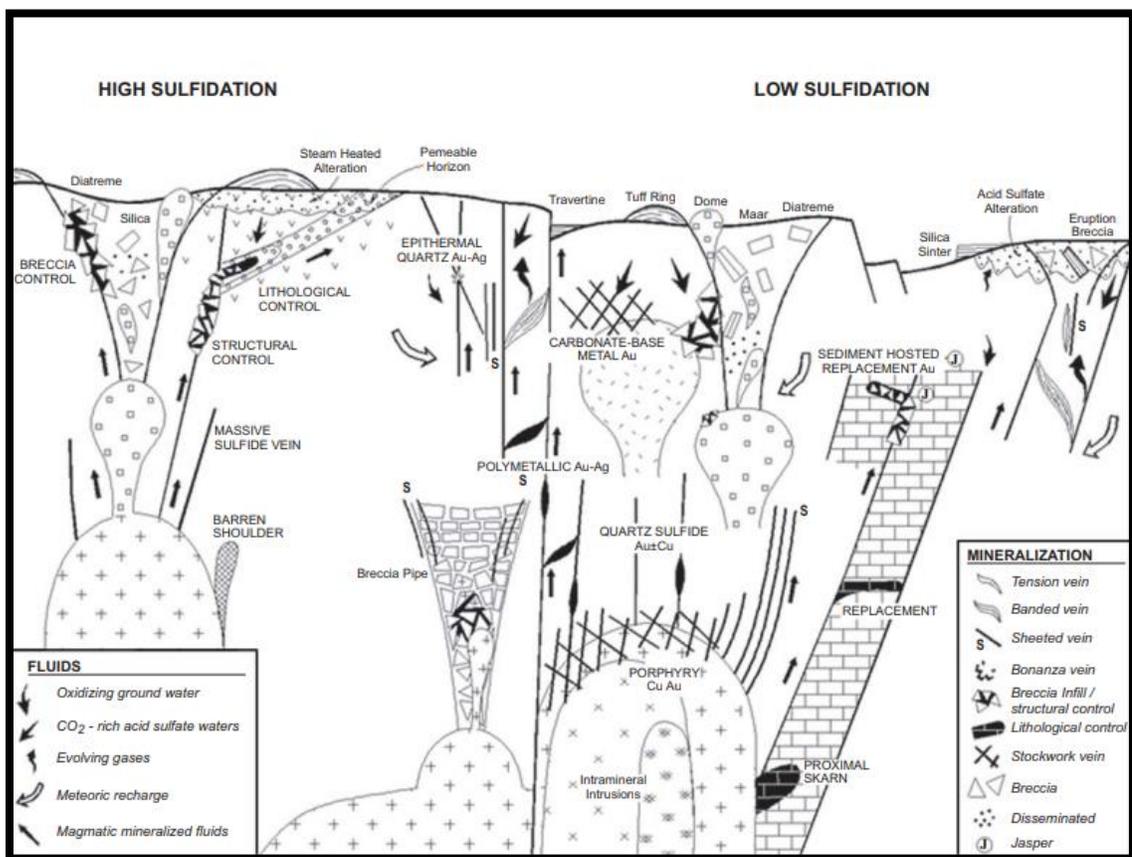
aproximadamente este-oeste EW, como la estructura San Bartolo, y zonas de vetas laminares mineralizadas con rumbo noroeste NW presentes en cuerpos intrusivos. Atravesando estas estructuras hay un sistema de fallas normales no mineralizadas con tendencia norte-sur NS.

5.4 Tipo de Yacimiento Mineral

Con base en una serie de características que incluyen el entorno tectónico, el control estructural sobre la distribución y agrupación de ocurrencias y depósitos, la forma general de mineralización y la asociación con la alteración, los depósitos minerales de oro y plata del Distrito Minero de Vetas-California, pertenecen a la clase de depósitos epitermales de oro y plata. Además, la variación en los detalles de los depósitos individuales que incluyen estilos de veta versus estilos de reemplazamiento, texturas de veta mineralizada y roca caja, además de minerales de sulfuro asociados y sus abundancias, y alteración asociada, indica que existe un espectro de tipos de mineralización epitermal de alta sulfuración a baja sulfuración en el distrito. La figura muestra un modelo general para depósitos epitermales de oro y plata en un ambiente de pórfido, que incluye mineralización de cobre \pm molibdeno y es aplicable a la exploración en el DMVC.

Figura 4

Modelo conceptual de estilos de mineralización de arco magmático epitermales Au-Ag y pórfidos Cu-Mo. Tomado de (Corbett, 2002).



La mineralización de oro en el territorio de Vetás está alojada en zonas de cizalla que exhiben múltiples fases de emplazamiento y reactivación de vetas de cuarzo asociadas con una intensa alteración argílica y mineralización de sulfuros. Estas vetas de relleno de fallas tienen un buzamiento de moderado a pronunciado y se encuentran predominantemente en rocas gneísicas. Un paquete distinto, pero probablemente relacionado, de stockwork y vetas laminadas de inmersión poco profunda, asociado con alteración de cuarzo-sericita-pirita. Los dos estilos de mineralización se superponen y se interpretan como cogenéticos. Los datos cartográficos recientes en la zona sugieren que las áreas de alteración de sílice-sericita-pirita dentro de los gneises precámbricos y rocas graníticas más jóvenes, tienen características similares a los conjuntos de alteración presentes en los depósitos La Bodega/Mascota y Angostura del Macizo de Santander en

el noreste de Colombia. Según los datos publicados, se informa que la mineralización de oro en La Bodega y Angostura es de tipo epitermal de alta sulfuración. Las concentraciones más bajas de sulfuros en Vetas, impronta de mineralización y control estructural sugieren que puede pertenecer a una clase epitermal de intermedia sulfuración. Los depósitos del subtipo de sulfuración intermedia son estructuralmente muy similares a los de baja sulfuración, ambos conforman el conjunto de epitermales alcalinos según Sillitoe (1977), aunque las características geoquímicas de los fluidos mineralizantes asociados y de las mineralizaciones metálicas en sulfuración intermedia suele guardar una mayor afinidad con los depósitos de alta sulfuración (Einaudi y otros, 2003; Sillitoe y Hedenquist, 2003).

5.5 Mineralización

El sistema de vetas hidrotermales se encaja predominantemente en el gneis anfibolítico de color gris a negro, dentro de la propiedad del proyecto también se reconocen cuerpos intrusivos dentro del gneis, los cuales se catalogan como microgranito y diques que varían texturalmente de dacita a pórfido dacita. La mineralización de oro y plata se produce dentro de una red de vetas cuarzo con un evidente control estructural, subparalelas, tabulares, ocasionalmente interseccionadas o sigmoideas, la mineralización es estructuralmente compleja y marca la intersección de estructuras con tendencia este-oeste y estructuras con tendencia noreste-suroeste. Las vetas están alojadas predominantemente en gneis y también se encuentran en los contactos entre rocas intrusivas y gneis, presentan halos de alteración que varían desde unos pocos centímetros hasta varios metros de ancho y consisten en gneis con alteración fílica y ocasionalmente argílica, a menudo acompañados de sulfuros disseminados y/o vetillas de cuarzo. Las venas tienen un ancho irregular, con cavidades ocasionales y tienen una textura coliforme o crustiforme. Generalmente consisten en cuarzo finamente cristalino de color gris a blanquecino o

calcedonia microcristalina intercalada con adularia de color gris más oscuro, acompañada de sulfuros en su mayoría pirita y en menor proporción esfalerita, arsenopirita y galena, El oro visible se observa comúnmente en cuarzo y dentro de cavidades en cuarzo. La alteración es variante en cuanto el espesor en los orillos de la veta, se observa diferencialmente de acuerdo con la permeabilidad de la roca determinado por el grado de fracturamiento, la foliación y la mineralogía más susceptible al metasomatismo químico durante el emplazamiento de los fluidos.

6. Resultados

6.1 Trabajo de Campo

6.1.1 Reconocimiento de la mina

En la etapa inicial del proyecto se desarrolló el reconocimiento del área de trabajo en la empresa, así como del recurso humano presente en ella. Acompañados de un operario experimentado se dio ingreso a los túneles mineros identificando el proceso minero en desarrollo el cual se divide en tres fases:

6.1.1.1 Determinación del área de extracción. Para este proceso se emplea la técnica conocida coloquialmente como cateo. Técnica ancestral donde se toman algunas muestras de la estructura, se pulverizan y posteriormente se pasan por un proceso de agitación con agua para identificar partículas de oro las cuales se separan por densidad.

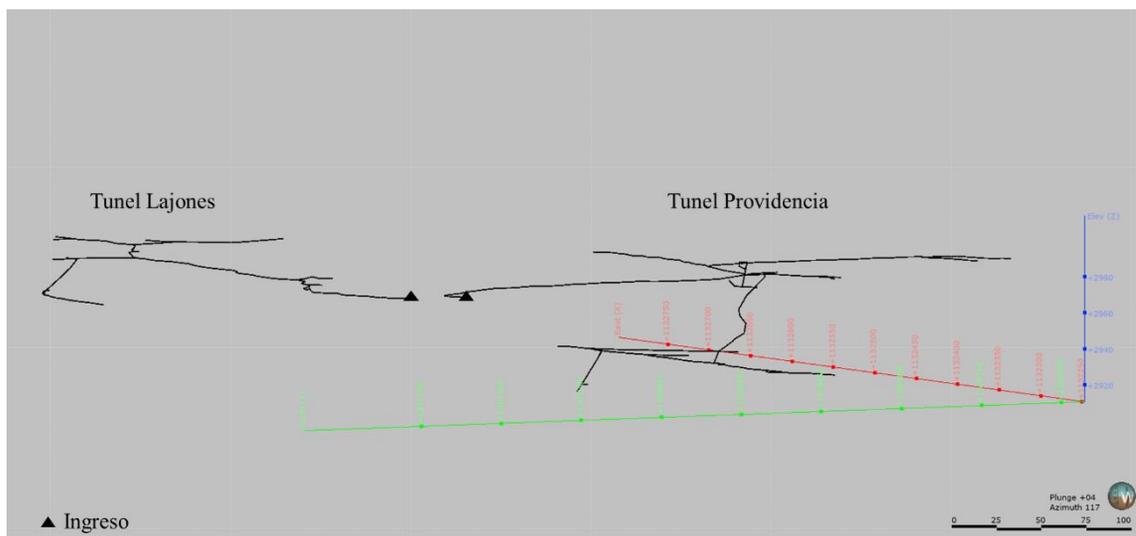
6.1.1.2 Proceso de extracción. Corresponde al conjunto de operaciones necesarias para la extracción del material rocoso. Esto involucra actividades como la barrenación, detonación y transporte de material mediante coches sobre rieles conocidos como vagonetas.

6.1.1.3 Recuperación metalúrgica. En la fase final el material extraído es llevado a la planta de beneficio donde es tratado mediante procesos de molienda, agitación y cianuración para la recuperación del metal de interés.

Esta primera visita al área de estudio dio como resultado el levantamiento topográfico de los túneles de la mina mediante el uso de poligonales con brújula y decámetro (Fig. 5), así como el reconocimiento de las principales vetas trabajadas.

Figura 5

Cartografía de túneles.



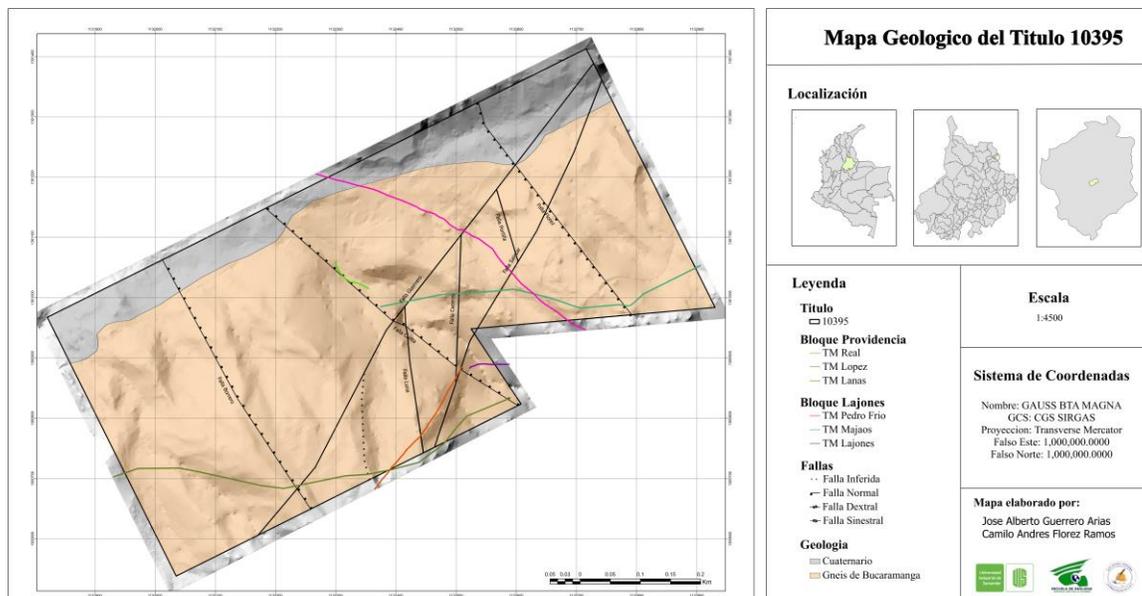
6.1.2 Levantamiento geológico

Al tener conocimiento del área de trabajo se realizó una caracterización geológica de la zona para determinar las litologías presentes, así como las principales características texturales y mineralógicas de los cuerpos mineralizados. La caracterización geológica se realizó utilizando las diferentes vías de acceso a la zona a escala 1:10000 y dentro de los túneles de la mina a escala 1:500. Se evidencia el dominio litológico de la unidad Gneis de Bucaramanga con presencia de cuerpos intrusivos félsicos a manera de vetas de poco espesor las cuales no son representativas

para la escala de la cartografía, así como la presencia de depósitos cuaternarios sobre las quebradas El Salado y Cunta, (Fig. 6).

Figura 6

Mapa geológico del Título Minero 10395.



La geología de los cuerpos mineralizados está determinada por la presencia de las alteraciones argílica y argílica avanzada con su mineralogía característica dada por cuarzo residual, alunita e illita en algunos puntos al contacto con la roca encajante y sulfuros como la pirita y calcopirita.

En la zona del bloque noroeste del túnel Lajones la mineralización se dispone en una red venas subparalelas, de anastomosadas a tabulares, los espesores varían y no son continuos, las vetas catalogadas como Veta Delirios y Veta Majaos con tendencia 210-250 en azimut de rumbo, con espesores entre los 6 a los 25 centímetros, sinuosas, fuertemente afectadas por la complejidad estructural de este bloque que generan adelgazamientos y estrangulaciones a lo largo de la extensión de la vena, ocasionalmente con textura crustiforme y predominio composicional de

cuarzo blanco-grisáceo con disseminación de sulfuros principalmente pirita. La veta Lajones y la veta Pedro Frio de tendencia 260- 310, con espesores más constantes entre 8 y 16cm, geometría generalmente tabular, controladas estructuralmente entre los planos de falla, se identificó estructuras brechoides en intersticios de bifurcación de la veta, con distinción de textura coloforme con bandas de cuarzo calcedónico de color gris a blancuzco, adularia de color gris oscuro y bandas polimetálicas conformadas principalmente por pirita. La alteración es variante en el espesor, se identifica como fílica o cuarzo-sericita por el reemplazamiento hidrotermal de feldespatos potásico y plagioclasa por estos minerales, también se observan minerales como illita, clorita y pirita en menor proporción dentro de la alteración, la alteración argílica se encuentra sectorizada no tan abundante, se reconoce como alteración argílica moderada, con presencia de alunita, caolinita y esmectita sin evidencias de una alteración mucho más ácida por la no presencia de cuarzo vuggy. La zona del bloque de Providencia presenta vetas más constantes que se extienden hasta los títulos mineros adyacentes, la producción es más constante, son estructuras vetiformes tabulares de espesores entre los 7 centímetros hasta los 50 centímetros, compuestas principalmente de cuarzo criptocristalino con disseminación de minerales sulfuros, ocasionalmente con texturas coloformes, bandas distintivas de sulfuros polimetálicos en asociación con oro nativo representando zonas de bonanza.

6.1.3 Geología estructural de la mina

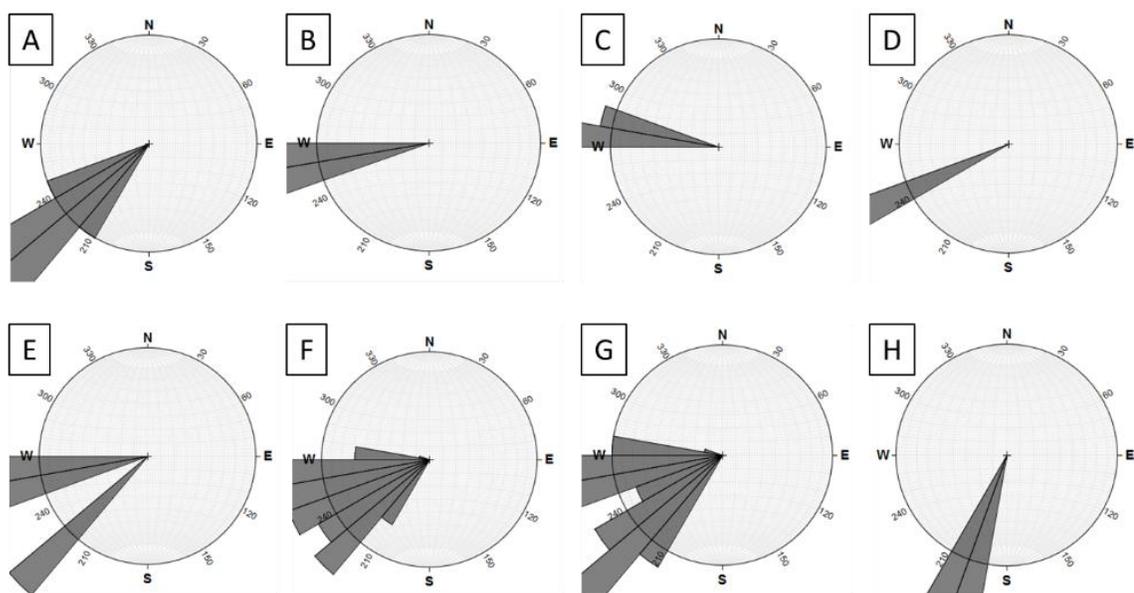
La geología estructural es de gran importancia en el desarrollo de las actividades mineras relacionadas, abarcando desde su fase de planificación hasta la identificación de áreas de interés económico. Durante la segunda fase de trabajo de campo, previamente informados sobre el área de estudio, se ejecutó una campaña de adquisición masiva de datos. Estos datos enriquecieron significativamente nuestro entendimiento de los eventos tectónicos en la mina y su relación con la

mineralización. Como resultado de esta campaña, se logró la identificación de diversas estructuras geológicas, destacando principalmente las estructuras falladas y los cuerpos mineralizados (Fig. 6), sin omitir otras características de la roca.

La recopilación de datos estructurales de los cuerpos mineralizados en la mina se llevó a cabo de manera sistemática y precisa. Se tomaron en intervalos de 5 y 10 metros a lo largo de los cuerpos dentro de los túneles, donde se garantizaba una continuidad y accesibilidad óptima. Este procedimiento permitió la identificación y análisis de las diferentes tendencias de mineralización presentes en la mina. (Fig. 7).

Figura 7

Tendencia principal de las vetas. A. Delirios 2. B. Lajones. C. Pedro Frio. D. Majaos. E. La Derecha. F. López. G. Lanás. H. Real.



Las estructuras falladas fueron identificadas mediante la observación de planos que exhibían estrías de falla, acompañadas de escalones recristalizados, útiles para la determinación de la

cinemática de estas (Fig. 8). Los datos recopilados llevaron a la identificación de un total de 7 fallas, cuyos nombres fueron asignados por el personal en prácticas (Tabla 1). Es importante mencionar la presencia de la Falla Cunta, previamente documentada en diversos estudios realizados en la región. Esta se define por el trazo de la quebrada Cunta, que atraviesa el título minero y divide el área de trabajo en dos sectores conocidos como Lajones y Providencia.

Figura 8

Estrías de falla. F1. Guerrero. F2. Salazar. F3. Cáceres.



Tabla 1

Fallas

Nombre de Falla	Azimut	Buzamiento	Tipo de Falla
Falla Cunta	306	63	Dextral – Normal
Falla Borrero	315	66	Dextral – Normal
Falla Flórez	153	70	Dextral – Normal
Falla Guerrero	218	72	Sinistral – Inversa
Falla Salazar	208	75	Sinistral – Inversa

Falla Cáceres	193	47	Dextral
Falla Luna	200	61	Dextral
Falla Portilla	200	35	Dextral

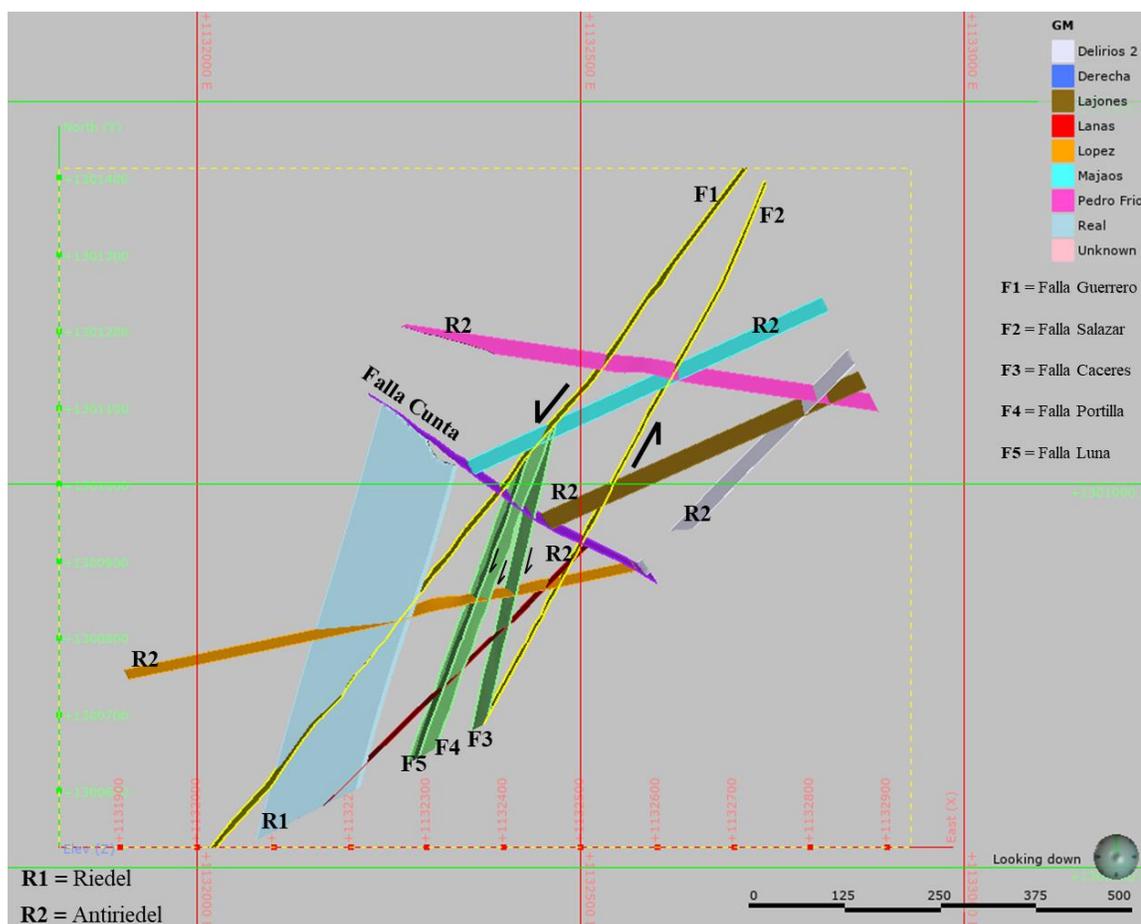
El análisis y visualización de estas estructuras evidencia la complejidad estructural de la zona de estudio. La información recopilada muestra la presencia de dos eventos tectónicos relacionados a los sistemas de fallas Chitagá – Boconó. Las estructuras NW – SE se asocian al sistema de fallas de Chitagá. Las estructuras N – S y NE – SW se asocian al sistema de fallas Boconó. Estas estructuras generan un sistema en enrejado directamente relacionado con la mineralización.

El sistema en enrejado se origina como resultado de la interacción de las fallas Guerrero y Salazar, las cuales dan lugar a la formación de un dúplex conformado por las fallas Cáceres, Luna y Portilla, así como estructuras inferidas a partir de los lineamientos estructurales. Es importante destacar que estas estructuras no se encuentran mineralizadas. (Fig. 9).

Los cuerpos mineralizados están directamente relacionados con las fallas Guerrero y Salazar como estructuras Riedel y Antiriedel, (Fig. 9). Esto sugiere que los fluidos mineralizantes se movilizaron y emplazaron a través de los espacios generados por estas estructuras.

Figura 9

Sistema de enrejado. Cota 2950 msnm.



6.2 Tratamiento y análisis de laboratorio

6.2.1 Análisis petrográfico

Dentro del análisis petrográfico bajo la técnica de microscopía de luz transmitida, se reconocen con más detalle la mineralogía y posterior interpretación mineralogénica de la mena y la ganga que hacen parte del depósito mineral. La toma de las muestras se realizó en dos zonas estratégicas donde se aseguró tomar el sector mineralizado junto a su respectiva alteración, para poder analizar su comportamiento paragenético.

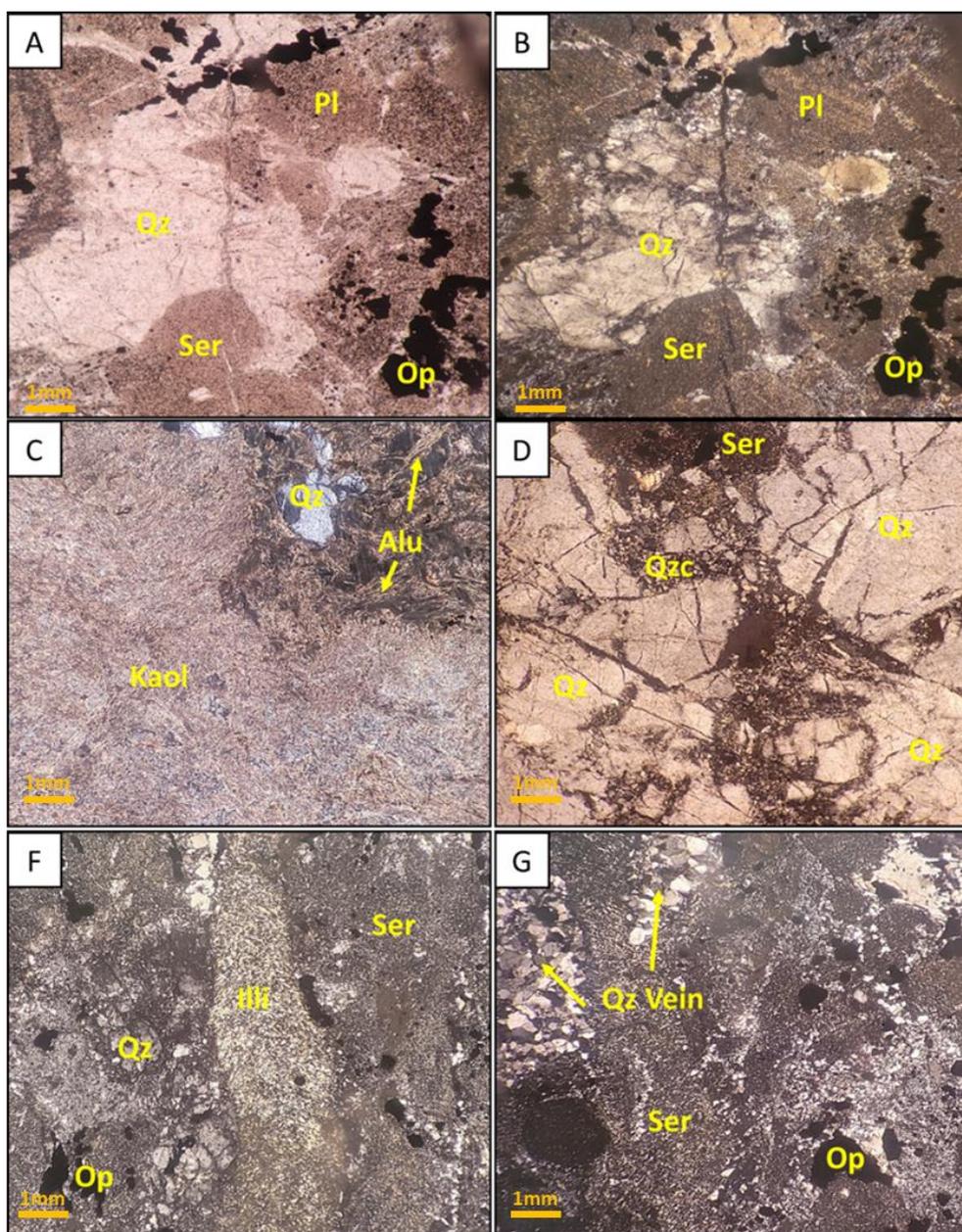
Una de las secciones se toma en una zona con una alteración aparentemente fílica (cuarzo-sericita), se observa bajo microscopía el dominio del reemplazamiento de feldespatos por sericita y cuarzo, el cuarzo en menor proporción, reconociendo zonalmente fuera de los halos de alteración

que la roca huésped o encajante es un gneis biotítico con alto contenido en feldespatos (plagioclasa) y con foliación ampliamente observable a lo largo de su estructura néisica de bandas de colores blancas y negras, estas características son parcialmente a totalmente borradas por la alteración hidrotermal, el metasomatismo de la roca caja con el fluido mineralizante origina el dominio de la asociación mineral cuarzo+sericita+pirita (fig. 10), y en menor proporción la presencia de clorita e illita. El contenido de sulfuros diseminados en estas zonas de alteración sericita-cuarzo es mayor, macroscópicamente se identifica pirita como el más abundante, agregados metálicos de colores plateados y grises oscuros formando bandas reconocidos como minerales de arsénico (arsenopirita, tennantita) acompañados raramente de calcopirita.

La descripción de la segunda sección delgada aportó a la determinación dentro del sistema mineralizado una alteración hidrotermal más ácida, con la presencia abundante de arcillas como esmectita y caolinita, con muy poca o nula presencia de sericita, al igual de la presencia de otros minerales como la alunita, claves para catalogar la alteración como “argílica intermedia o moderada” no al grado de una alteración de “argílica avanzada” al no observarse cuarzo oqueroso (vuggy) y presencia de sílice residual, la presencia de la asociación mineral esmectita-caolinita-alunita nos puede aportar datos de temperatura de rangos entre los 150 - 250° C y pH 3,5 a 5 en esta parte del sistema. (Sillitoe & Hedenquist, 2003).

Figura 10

Fotografías de secciones delgadas MP1, MP2 y MP3 en objetivo 5X.



A y B. Sección MP1 PPL y XPL respectivamente, se observa parcialmente destrucción masiva de feldespatos con reemplazamiento a sericita (Ser), en asociación mineral con cuarzo (Qz) y minerales opacos (Op) identificados como pirita. En individuos moderadamente alterados se observan características primarias como la macla polisintética de las plagioclasas (Pl). C. Sección MP3 XPL, alteración argílica pervasiva con dominio de caolinita (Kaol), sectorialmente se observan vetilleos con halos de agregados de alunita (Alu). D. Sección MP1 XPL, ejemplares de cuarzo (Qz) con intenso fracturamiento y relleno intergranular de cuarzo criptocristalino (Qzc), sericita (Ser) y sulfuros. F. Sección MP2 XPL, prominente

alteración sericita (Ser), cuarzo (Qz), pirita con agregados lenticulares de illita (Ill). G. Sección MP2 XPL, se observa abundante alteración filica bordeando venas de relleno hidrotermal compuestas principalmente por cuarzo (Qz) y sulfuros.

6.2.2 Análisis e interpretación de datos litogeoquímicos

El análisis multielemental bajo la técnica ICP del sistema mineralizado de la mina La Providencia, aportó la cuantificación de 66 elementos químicos en 110 muestras tomadas estratégicamente dentro de las zonas de labores activas del proyecto, estos datos no solo aportaron a la propuesta de un modelo de bloques clave en el proceso de estimación de recursos, también se tomaron con el fin de afrontar hipótesis sobre algunas problemáticas dentro del proceso minero. Existía la hipótesis de que bajos niveles de producción de mineral aurífero estarían relacionados con el proceso metalúrgico de tratamiento y aprovechamiento, se enfatiza sobre el arsénico (As) como elemento problema en el proceso ya que encapsula el oro y limita su liberación de los minerales que lo contengan. En base a la problemática geometalúrgica presentada se desarrolló un análisis de los datos obtenidos en relación con el arsénico donde se observan algunas muestras con valores máximos arrojados de 1483 ppm, al igual que una media de muestreo 230.18 ppm, se intentó correlacionar la abundancia de As con el contenido de diferentes elementos importantes en el sistema como oro (Au), plata (Ag), cobre (Cu), molibdeno (Mo), plomo (Pb), zinc (Zn), mercurio (Hg), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K), hierro (Fe) y azufre (S), mediante la implementación de la correlación de Pearson determinada en la metodología del proyecto donde se obtuvieron los siguientes resultados, (Tabla 2 y 3).

Tabla 2

Análisis estadístico de los elementos As, Au, Ag, Cu, Mo, Pb y Zn

ACTIVIDADES DE APOYO GEOLÓGICO 44

Datos estadísticos	As	Au	Ag	Cu	Mo	Pb	Zn
No. de muestras	110	110	110	110	110	110	110
Mínimo ppm	0.1	0.5	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1
Maximo ppm	1483	105.05	10	1629.1	139.49	1547.3	2885
Media aritmética ppm	230.1836	4.362091	6.485455	123.1009	15.955545	92.31545	415.5564
Desviación estándar	220.389	13.59582	3.885479	227.6934	19.958575	180.2528	549.6428
Varianza	48571.29	184.8463	15.09694	51844.27	398.3447	32491.08	302107.2
Media Ln	4.87074	0.332304	1.312467	4.022039	2.3638256	3.562807	5.324024
Covarianza As_x	48571.29	109.525	378.3102	23831.35	363.88107	5902.879	23051.33
ρ	1	0.036553	0.441788	0.474907	0.0827256	0.148591	0.190294

Tabla 3

Análisis estadístico de los elementos Hg, Ca, Na, K, Fe y S

Datos estadísticos	Hg	Ca	Na	K	Fe	S
No. de muestras	110	110	110	110	110	110
Mínimo ppm	0.005	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Maximo ppm	9.57	150000	2500	19300	150000	50000
Media aritmética ppm	0.592	10255.46	220.9282	4565.456	34508.18	21621.82
Desviación estándar	1.248378	29830.2	290.4695	2383.326	21000.86	12797.63
Varianza	1.558448	8.9E+08	84372.56	5680245	4.41E+08	1.64E+08
Media Ln	-1.55067	7.496823	3.881207	8.149197	10.11371	9.518821
Covarianza As_x	70.9587	-1575338	-6366.49	15990.29	1866469	1303844
ρ	0.257911	-0.23962	-0.09945	0.030443	0.403268	0.462281

El coeficiente de correlación de Pearson (ρ) se mide de la siguiente manera:

- *Entre 0 – 0.09 correlación inexistente.*
- *Entre 0.10 – 0.29 correlación débil.*
- *Entre 0.30 – 0.49 correlación moderada.*
- *Entre 0.50 – 1 correlación fuerte.*

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis geoestadístico se logró determinar una relación moderada entre los contenidos de arsénico y los contenidos de elementos como Ag, Cu, Fe y S lo que permite determinar que el enriquecimiento de As en el sistema presenta una interacción con los compuestos formados por la Ag y el Cu, sin embargo al no ser una relación fuerte se crea una nueva hipótesis que indica que el enriquecimiento elemental se da a lo largo de cada etapa del proceso mineralizante y no en el pulso principal que da la mineralización del depósito.

6.2.3 Modelamiento

La fase de modelamiento se desarrolló a partir de los datos recopilados en la fase de campo, para ello se utilizó el software Leapfrog Geo que permite la visualización de la información en 3D y de manera detallada de los datos. Se desarrollaron dos modelos los cuales se clasifican como modelo geológico – estructural y geometalúrgico.

Este modelo se generó a partir de la información recopilada en la campaña estructural, permitiendo visualizar en profundidad cada una de las estructuras y su interacción entre sí, siendo útiles a la hora de desarrollar el planeamiento minero, así como en la determinación de las zonas de mayor y menor interés económico, el modelamiento de estas estructuras dio como resultado la visualización del sistema de enrejado descrito anteriormente y su comportamiento en profundidad, (Fig. 11).

Los cuerpos mineralizados se modelan en dos bloques divididos por la falla Cunta los cuales se definen como bloque Lajones y Providencia. Se realiza de esta manera debido a la falta de información clara de la falla en campo por lo que no se puede determinar la continuidad de estos en los dos bloques, (Fig. 13).

Figura 11

Modelo Geológico – Estructural.

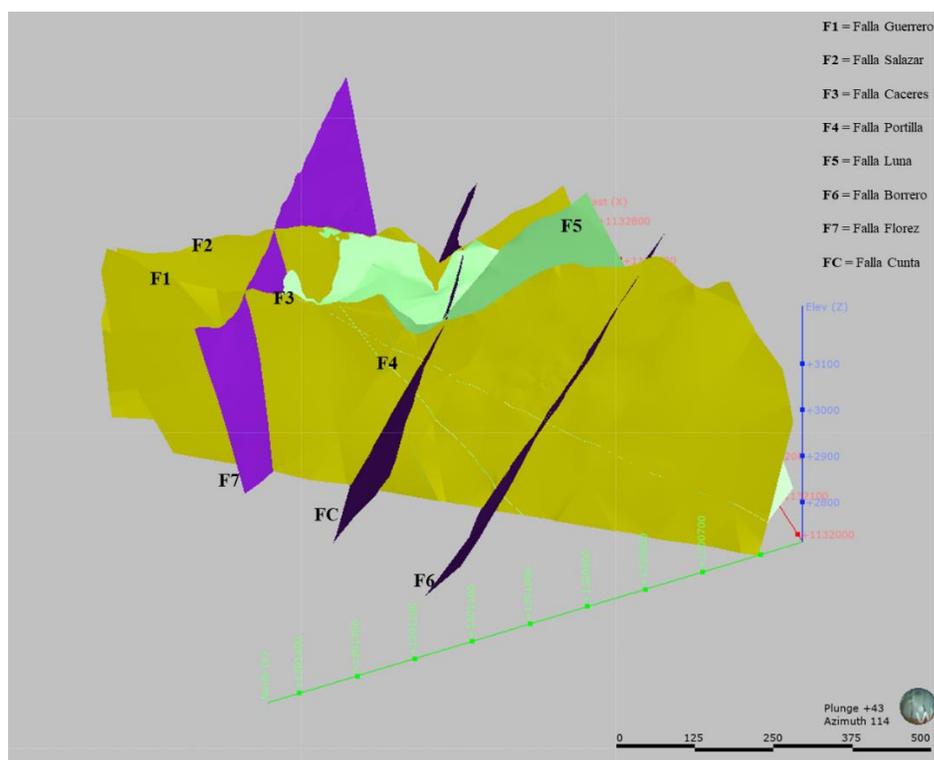


Figura 12

A. Sección W-E del sistema de fallas de la mina. **B.** Sección con azimuth 210^a del sistema de fallas de la mina.

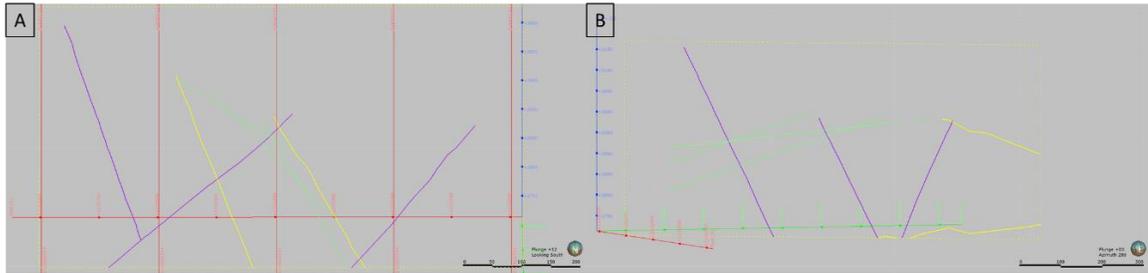
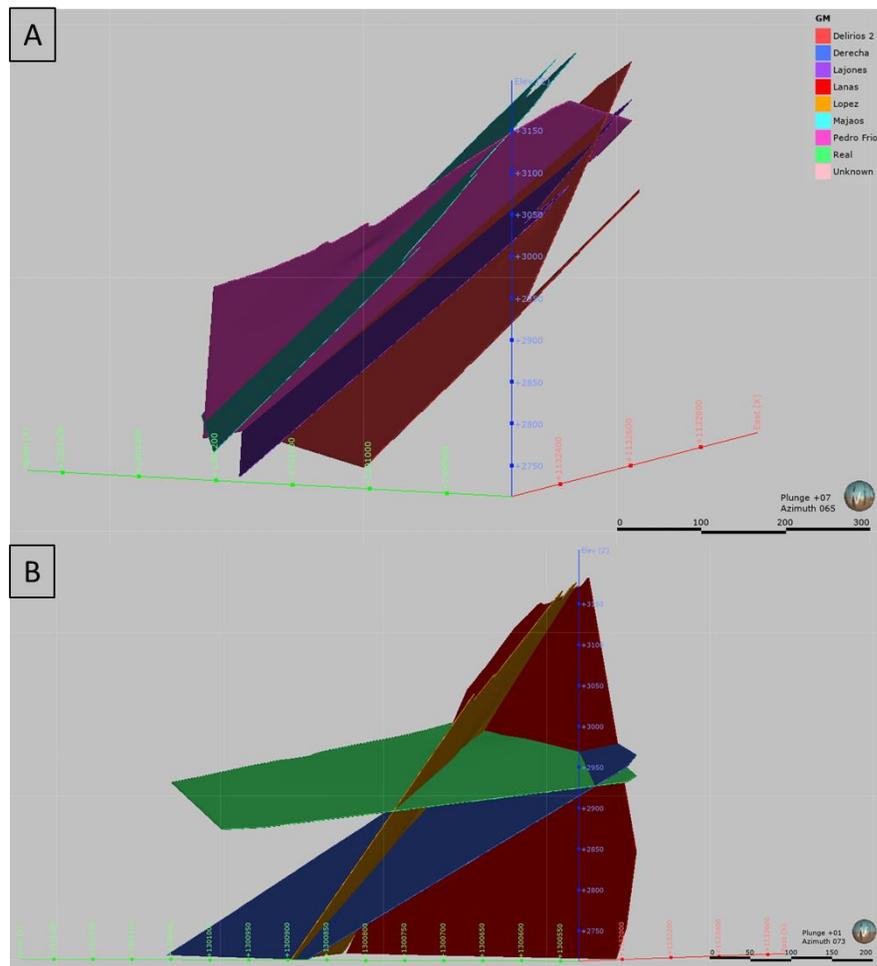


Figura 13

Modelamiento de Vetas. A. Bloque Lajones. B. Bloque Providencia.



7. Conclusiones

Se reconoce el yacimiento aurífero de la mina La Providencia como un sistema magmático – hidrotermal de tipo epitermal de intermedia sulfuración controlado estructuralmente por un enrejado de fallas oblicuas de alto ángulo con tendencias S25°-30°W/75°W y S10°-20°/60W estrechamente relacionadas con las zonas de transición transversales de Boconó y Chitagá a las cuales también se asocian el sistema de fallas La Baja – Cucutilla, Angosturas, Vetas – El Volcán y Móngora que son participes del control estructural de otros depósitos dentro del Distrito Minero Vetas – California (DMVC).

Se identifica una relación litogeoquímica moderada entre el arsénico (As) con los compuestos relacionados con plata (Ag) y (Cu) ayudando de esta manera a conocer las áreas potencialmente problemáticas para el aprovechamiento geometalúrgico.

Las zonas de mena dentro de la mina La providencia se caracterizan por una mineralización vetiforme compuesta principalmente por cuarzo y sulfuros (pirita, calcopirita, esfalerita, galena, arsenopirita y sulfosales de plata y arsénico) con presencia ocasional de oro nativo.

Se definen vetas de texturas mayoritariamente coloformes definidas por cuarzo calcedónico y minerales metálicos diseminados o formando bandas, en menor proporción texturas crustiformes con precipitación de cristales de cuarzo y algunos sulfuros dentro de cavidades, estas vetas se encuentran relacionadas a dos tipos de alteraciones; alteración fílica con el dominio de la asociación mineral cuarzo + sericita + pirita y alteración argílica moderada con asociaciones minerales como cuarzo + alunita + caolinita.

Dentro de la propuesta de modelo geológico – estructural se identifican dos tipos de estructuras definidas como estructuras de falla no mineralizadas con tendencias $N45^{\circ}-60^{\circ}W/65^{\circ}W$, $S25^{\circ}-30^{\circ}W/75^{\circ}W$ y $S10^{\circ}-20^{\circ}/60W$ las cuales no permiten el ingreso de fluidos y los cuerpos mineralizados con tendencias $S70^{\circ}-90^{\circ}W/50^{\circ}W$ que están directamente relacionados a estructuras de tipo antiriedel de las fallas principales del enrejado siendo parte del régimen transtensivo que permite la apertura de espacios para el ingreso y posterior emplazamiento de los fluidos mineralizantes.

8. Recomendaciones

Con el fin de mejorar el conocimiento geológico de los depósitos minerales presentes en el territorio santandereano, se recomienda a la comunidad académica, en especial a la Universidad Industrial de Santander un mayor acercamiento y trabajo en equipo con la industria minera presente en el territorio abriendo más espacios de cooperación mediante prácticas empresariales y trabajos de investigación que permitan dar un mayor aporte científico que aporte al crecimiento económico de la región mediante el uso de buenas prácticas técnicas, sociales y ambientales.

El desarrollo de las labores mineras en la actualidad evidencia una falta de conocimiento geológico y geotécnico en este tipo de empresas pequeñas, por lo tanto, se recomienda la implementación de profesionales afines a la geología que permitan mejorar el desarrollo de sus labores y así tener un mayor aprovechamiento de los depósitos.

Se sugiere el desarrollo de estudios en materia de la geología estructural que puedan determinar de manera científica y teórica el sistema estructural de manera local con una mayor recopilación de información geológica para establecer la relación de los eventos estructurales junto con los eventos mineralizantes.

Se considera relevante que el desarrollo de este tipo de proyectos en empresas pequeñas, medianas y grandes sean desarrollados mediante equipos interdisciplinarios conformados no solo por geólogos o ingenieros con conocimientos técnicos sino también por trabajadores sociales y profesionales afines al cuidado del medio ambiente y de esta manera tener proyectos sostenibles que aporten al desarrollo de los territorios.

Referencias Bibliográficas

- Audemard, F.A. (2016). *Evaluación paleosísmica del segmento San Felipe de la Falla de Boconó (Venezuela noroccidental): ¿responsable del terremoto del 26 de marzo de 1812?.* Boletín de Geología, 38 (1): 125-149.
- Begbie, M. & Sporli, K. & Mauk, J.. (2007). *Structural Evolution of the Golden Cross Epithermal Au-Ag Deposit, New Zealand.* Economic Geology. 102. 873-892. 10.2113/gsecongeo.102.5.873.
- Cediel, F., Shaw, R. P. & Caceres, C. (2003). *Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics.* AAPG Memoir 79, p. 815-848.
- Corbett (2002). *Epithermal Gold for Explorationists.* AIG Journal, Paper 2002-01
- Cox, S.F. & Knackstedt, M.A. & Braun, Jean. (2001). *Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal systems.* Rev. Econ. Geol.. 14. 1-24.
- Echavarría, L.E. & Etcheverry R.O. (1998). *Características geoquímicas de la mineralización epitermal del área El Dorado-Monserrat, Provincia de Santa Cruz, Argentina.* Revista geológica de Chile v25, No 1.
- Faulds, James & Coolbaugh, Mark & Bouchot, Vincent & Moeck, Inga & Oğuz, Kerem. (2010). *Characterizing Structural Controls of Geothermal Reservoirs in the Great Basin, USA, and Western Turkey: Developing Successful Exploration Strategies in Extended Terranes.* Proceedings World Geothermal Congress. 25-29
- Fossen, H. (2016). *Structural geology.* Cambridge University press.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology.* New York: Cambridge University Press.

- García, C. (1996). *Estudio geológico y mineralógico de la mina La Providencia y el depósito de colas de la Mina Reina de Oro (Municipio de Vetas, Santander)*. Informe final Colciencias Universidad Industrial de Santander. 125p.
- García, C., Uribe, E. (2003). *Los Delirios: Un yacimiento hidrotermal de oro y plata en la región de Vetas, Santander (Colombia)*. Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander, Vol. 25, N° 40, pp. 91-103.
- García, W., Rey, G. (1991). *Análisis estructural y mineralógico de los yacimientos de oro y plata de la mina La Tosca*. Tesis de Pregrado, Inédita. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.
- Goldsmith, R., Marvin, R. & Mehnert, H., (1971). *Radiometric Ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes*. US Geological Survey, Professional Paper, (750D): D44-D49. Denver.
- Gonzalez Barrios, & Angel, R. (1996). *Manual de arranque y operacion de una planta de recuperación de metales preciosos por cementación. Sonora*. Universidad de Sonora.
- INGEMMET. *Ensayo al fuego*. Dirección de laboratorios, Laboratorio de química analítica.
- IQS Tech Transfer (2018). Espectrofotómetro de emisión atómica-ICP. Universitat Ramon Llull: <https://www.iqs.edu/es/noticia/icp-oes-una-tecnica-destacada-para-el-analisis-de-impurezas-metalicas#:~:text=En%20este%20equipo%20se%20utiliza,sea%20una%20t%C3%A9cnica%20muy%20selectiva.>
- Lasprilla, G., Lozano, M. (1991). *Evaluación geológica del yacimiento de oro y plata de la mina Reina de Oro, Municipio de Vetas, Santander*. Tesis de Pregrado, Inédita. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.

- Lavigne James, G. (2011). *Technical Report on the Vetas Gold Project, Department of Santander, Colombia*. NI 43-101 report.
- Leal Mejia, H. (2011). *Phanerozoic Gold Metallogeny In The Colombian Andes: Tectono-Magmatic*. Barcelona.
- Lillo, J., & Oyarzun, R. (2013). *Geología estructural aplicada a la minería y exploración minera*. Madrid: Roberto Oyarzun & Paloma Cubas.
- Lozano, Q. H., & Pulido, U. O. (1986). *Situación actual del oro y la plata en Colombia. Geología, génesis, aspectos mineros, reservas y producción*. Boletín Geológico Volumen 27- No. 3, 1-56.
- Macdonald, E. H. (2007). *Handbook of gold exploration and evaluation*. Washington D.C: Woodhead Publishing.
- Mantilla Figueroa, L. C., Bissig, T., Valencia, V., & Hart, C. J. (2013). *The magmatic history of the Vetas-California mining district, Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia*. Journal of South American Earth Sciences 45, 235-249.
- Mathur, R. et al. (2003). *Re-Os isotopes applied to the epithermal gold deposits near Bucaramanga, northeastern Colombia*. Journal of South American Earth Sciences, No. 15, pp. 815-821.
- Mendoza, H. et al. (1979). *Geología y geoquímica del área de California, Santander*. Boletín Geológico Ingeominas, Vol. 22, pp 3-52.
- Micklethwaite, Steven. (2009). *Mechanisms of faulting and permeability enhancement during epithermal mineralisation: Cracow goldfield, Australia*. Journal of Structural Geology. 31. 288-300. 10.1016/j.jsg.2008.11.016.

Ministerio de Minas y Energía, Minenergía. Obtenido de Transformación minera:

<https://www.minenergia.gov.co/es/misional/transformación-minera/>

Niemeyer, H. (1999). Apuntes de geología estructural.

Osorio, J., Hernández, C., Torres, E., & Botero, P., (2008). *Modelo geodinámico del Macizo de Santander*. Informe interno Ingeominas, 152p.

Philips, G., & Powell, R. (2015). *Hydrothermal alteration in the Witwatersrand goldfields*. *Ore Geology Reviews*, 245-273.

Presidencia de la República de Colombia, (2016). *Decreto 1666 del 21 de octubre del 2016 “Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, relacionado con la clasificación minera”*. Bogotá.

Rowland, J. & Simmons, F.. (2012). *Hydrologic, Magmatic, and Tectonic Controls on Hydrothermal Flow, Taupo Volcanic Zone, New Zealand: Implications for the Formation of Epithermal Vein Deposits*. *Economic Geology*. 107. 10.2113/econgeo.107.3.427.

Restrepo-Pace, P.A., Cediell, F., (2010). *Northern South America basement tectonics and implications for paleocontinental reconstructions of the Americas*. *Journal of South American Earth Sciences* 29, 764-771.

Rosello, E. (2010). *Curso de Geología Estructural, material didáctico*. CONICET, Universidad de Buenos Aires.

Royal Society of Chemistry. (2023). Royal Society of Chemistry. Obtenido de Periodic Table: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/79/gold>

Sanchez, M., & Pulido, D. (2023). *Análisis estructural e hidrotermal del sistema kárstico del Peñon (Santander)*. Universidad Industrial de Santander.

Ureña Suarez, C. L., & Zuluaga, C. A. (2011). *Petrografía del Neis de Bucaramanga en cercanías a Cepitá, Berlín y Vetas - Santander*. Geología Colombiana, 37-55

Velandia Patiño, F. (2017). *Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga*.

Ward, D.; Goldsmith, R.; Cruz, J. & Restrepo, A. (1973). *Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander*. Ingeominas, Boletín Geológico 21 (1-3): 1- 132. Bogotá.